

امکان سنجی استفاده از انرژی باد در استان مرکزی

مطالعه موردی: ایستگاه خمین

مهدی جهانگیری^۱ - علی عبدالهی^۲ - مهدی صاحبی^۳ - احمد صداقت^۴ - محسن ثقفیان^۵

دانشگاه صنعتی اصفهان

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک، M.Jahangiri@me.iut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری مکانیک، A.Abdollahi@me.iut.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری مکانیک، M.Sahebi@me.iut.ac.ir

^۴ استادیار مکانیک، Sedaghat@cc.iut.ac.ir

^۵ استادیار مکانیک، Saghafian@cc.iut.ac.ir

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 خمین در استان مرکزی انجام شده است. به منظور برآورد اولیه انرژی باد در این ایستگاه محاسبات لازم بر روی اطلاعات آماری اندازه‌گیری شده توسط سازمان انرژی‌های نو ایران انجام شده است. با توجه به داده‌ها، محاسبات در یک بازه یک‌ساله انجام گرفته است. ابتدا سرعت باد در ارتفاع‌های ۴۰ متری، ۳۰ متری و ۱۰ متری در ماه‌های مختلف مطالعه شده است. این ایستگاه دارای میانگین سرعت به ترتیب ۳/۹۳ متر بر ثانیه، ۳/۸۱ متر بر ثانیه و ۳/۳۳ متر بر ثانیه در ارتفاع‌های یاد شده است. همچنین گلباد بیشترین جهت وزش باد بررسی گردیده است. از نمودار گلباد سرعت و جهت در ارتفاع ۳۰ متری دیده می‌شود که جهت باد غالب در جهتی بین شمال و شمال غربی می‌باشد، اما نمودار گلباد جهتی در ارتفاع ۳۷/۵ متری جهت باد غالب را در جهتی بین جنوب و جنوب شرقی نشان می‌دهد که دلیل این تفاوت این است که احتمالاً داده‌های گزارش شده توسط پایگاه اینترنتی سازمان انرژی‌های نو ایران دارای اشکال است. در ایستگاه خمین با توجه به گلباد این ایستگاه نمی‌توان بیان کرد که در طول سال جهت غالب باد ثابت می‌باشد. این موضوع در امر چیدمانی توربین‌ها مهم است، زیرا که ثابت بودن جهت باد مزیت عمده‌ای برای نیروگاه می‌باشد. همچنین با ارزیابی توان متوسط باد سالیانه را در ارتفاع‌های ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری دیده می‌شود ارتفاع ۴۰ متری برای نصب توربین بادی مناسب‌تر است.

کلید واژه

انرژی باد، ایستگاه خمین، توربین باد، توزیع ویبول، چگالی توان، گلباد.

۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۸ مصرف انرژی جهان معادل ۴۷۴ اگزاژول ($4.74 \times 10^{20} J$) بوده که ۸۰ تا ۹۰ درصد انرژی مصرفی جهان از منابع فسیلی حاصل شده است [۱]. این در حالیست که پتانسیل انرژی باد به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی حدود ۱۵ برابر مصرف انرژی جهان است [۲]. 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 ۲۰۰۸ حدود ۴۳ درصد از تجهیزات نصب شده جدید جهت تولید انرژی در اروپا مربوط به انرژی باد بوده است [۳]. در ایران، به عنوان اولین تمدنی که ۹۰۰ سال قبل از میلاد از انرژی باد برای پمپ آب و خرد کردن دانه استفاده کرده است [۴]، فعالیت‌هایی در راستای تولید توان از منابع بادی در حال انجام است. در ایران ظرفیت تولید ۱۰ هزار مگاوات برق از نیروگاه‌های بادی پیش‌بینی شده است که در حال حاضر نیروگاه بادی منجیل با ظرفیت ۷۰ مگاوات و نیروگاه بادی بینالود با ظرفیت ۲۸ مگاوات برق تولید می‌کند [۵]. طبق گزارش سازمان جهانی انرژی باد [۶]، ایران با ۲۳/۳٪ رشد در رده سی و پنجم تولید برق بادی جهان در سال ۲۰۰۸ قرار داشته است. آمریکا، آلمان، اسپانیا، چین و هند با تولید ۲۰ هزار تا ۱۰ 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 [۵].

رحیم زاده و جهانگیری [۷] با استفاده از روش‌های آماری و اطلاعات هواشناسی سرعت و چگالی انرژی باد را در چند ایستگاه هواشناسی کشور بررسی نمودند. گندمکار و همکاران [۸] تغییرات سالانه و روزانه سرعت باد در منطقه سیستان را جهت تولید برق بادی مورد مطالعه قرار دادند. عامری و همکاران [۹]، 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 [۱۰] بررسی شد که این منطقه به عنوان یکی از مناطق بادخیز جهان معرفی شده است. اخیراً یک مطالعه امکان‌سنجی نصب توربین باد توسط مصطفایی پور [۱۱] برای چند شهر استان یزد انجام شده است. وی بر اساس داده‌های آماری ۱۳ ساله از ۱۱ ایستگاه پتانسیل انرژی باد از نظر سرعت و جهت را مورد بررسی قرار داده است. کیهانی و همکاران [۱۲]، یک برآورد آماری از توابع توزیع سرعت و جهت باد براساس داده‌های ۱۱ 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 خمین

[۵] در استان مرکزی، در ۱۲ ماه متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل انرژی باد در این ایستگاه با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول برآورد شده است.

۲- ایستگاه مورد مطالعه

استان مرکزی تقریباً در مرکز ایران بین ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۵۷ دقیقه و ۵۱ درجه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. شهرستان خمین که در این استان واقع شده است، از شمال به شهرستان اراک و شازند، از مشرق به محلات، از جنوب به گلپایگان و از مغرب به الیگودرز محدود است. شهرستان خمین ۲۲۶۷ کیلومتر مربع مساحت داشته که این رقم ۷/۶ درصد مساحت کل استان مرکزی است. مرکز این شهرستان، شهر خمین در ۵۰ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی تا ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۱۸۱۵ متری از سطح دریا قرار گرفته است. از اطلاعات سرعت و جهت باد این شهرستان از تاریخ سپتامبر ۲۰۰۶ تا آگوست ۲۰۰۷ در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه برای هر داده برداری، استفاده شده است.

۳- تحلیل آماری داده‌های بادی

۳-۱- 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 [۴]:

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

که در آن U نمایانگر سرعت و $\int_c^\infty p(U) dU = 1$. یکی از این توابع که 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 و به فرم زیر 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 انباشتی (cumulative function distribution) که برای تخمین زمانی که سرعت باد در یک بازه خاص قرار می‌گیرد به صورت زیر است [۱۳،۴]:

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

برای تعیین c و k از روابط تجربی زیر استفاده می‌شود [۱۴،۴]:

۳-۱-۱- رابطه تجربی ارائه شده توسط Justus

با داشتن انحراف معیار و سرعت متوسط می‌توان ضرایب k و c را مطابق فرمول زیر بدست آورد:

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1.086} \quad (4)$$

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

در رابطه اخیر Γ ، تابع گاما می‌باشد.

۳-۱-۲- رابطه تجربی Lysen

در روش فوق ابتدا ضریب k از معادله (۴) بدست

آمده و سپس به کمک معادله (۶) مقدار C بدست می آید.

$$\frac{c}{U} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (۶)$$

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

۳-۲- چگالی توان

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

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_c^{\infty} U^3 p(U) dU \quad (۷)$$

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

$$\frac{\bar{E}}{A} = \left(\frac{\bar{P}}{A} \right) (N \Delta t) \quad (۸)$$

نسبت $K_e = \frac{U^3}{(\bar{U})^3}$ 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:

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU \quad (۹)$$

انتگرال فوق با استفاده از روش‌های عددی قابل

محاسبه است. از روش ذوزنقه در حل انتگرال فوق داریم [۱۳]:

$$\bar{P}_w = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{2} (U_{i+1} - U_i) \times (p(U_{i+1})P_w(U_{i+1}) + p(U_i)P_w(U_i)) \quad (۱۰)$$

۳-۳- شدت آشفتگی (Turbulence Intensity)

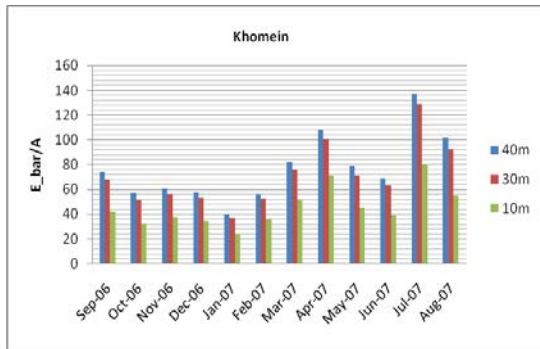
آشفتگی در باد به دلیل هدر رفتن انرژی جنبشی باد و تبدیل آن به انرژی گرمایی بر اثر تشکیل و نابودی گردابه‌های کوچک، رخ می‌دهد. آشفتگی باد ممکن است در زمان طولانی ثابت باشد اما در بازه‌های زمانی کوچک بسیار متغیر است. معمولاً آشفتگی جریان بدلیل زبری سطح (درختان، ساختمانها و ...) و ارتفاع بالای سطح بوجود می‌آید [۱۳]. وجود آشفتگی در جریان باد نه تنها از توان آن می‌کاهد، بلکه باعث ایجاد پدیده خستگی در توربین باد می‌شود [۱۳]. یکی از معیارهای اندازه گیری آشفتگی، شدت آشفتگی است که بصورت انحراف معیار استاندارد سرعت باد به سرعت متوسط تعریف می‌شود:

$$TI = \frac{\sigma_U}{U} \quad (۱۱)$$

در رابطه اخیر انحراف معیار استاندارد و سرعت متوسط روی یک بازه زمانی معمولاً ۱۰ دقیقه محاسبه می‌شوند [۴].

۴- نتایج

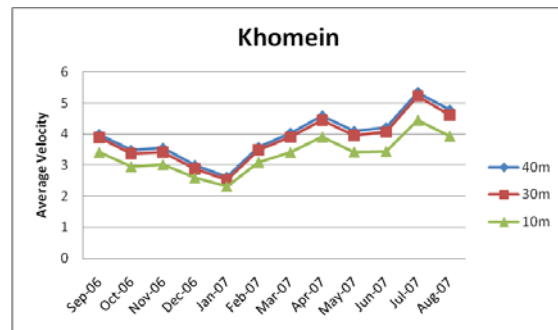
با استفاده از اطلاعات سرعت و جهت باد شهرستان خمین که از تاریخ سپتامبر ۲۰۰۶ تا آگوست ۲۰۰۷ در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه برای هر داده برداری در اختیار ما است، نمودارهای توزیع سرعت، توان



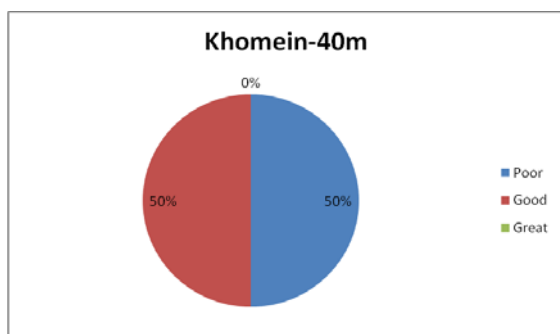
شکل ۳- چگالی انرژی باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری

متوسط، چگالی انرژی ماهیانه در ارتفاع های ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری در شکل های ۱ تا ۳ رسم شده است. همانطور که از تمام این سه نمودار برداشت می شود، دیده می شود که در ارتفاع ۴۰ متری مقدارهای سرعت متوسط، توان متوسط، چگالی انرژی متوسط نسبت به ارتفاع های دیگر و در یک ارتفاع همین مقادیر مربوط به ماه ژولای ۲۰۰۷ نسبت به ماههای دیگر بالاتر است.

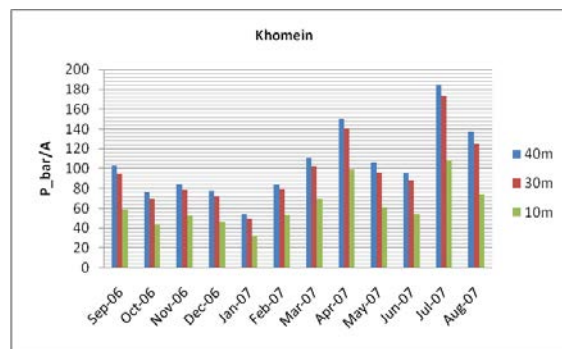
شکل های ۴ تا ۶ نمودار های ارزیابی توان متوسط باد سالیانه را در ارتفاع های ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متری نشان می دهد. معیار ارزیابی توان متوسط باد برای نصب توربین بادی در توان متوسط باد کمتر از ۱۰۰ ضعیف، ۱۰۰-۷۰۰ خوب و بیشتر از ۷۰۰ عالی ارزیابی می شود [۴]. همانطور که دیده می شود ارتفاع ۴۰ متری از نظر ارزیابی مناسب تر است که این تاییدی بر نتایج گرفته شده از شکل های قبل می باشد.



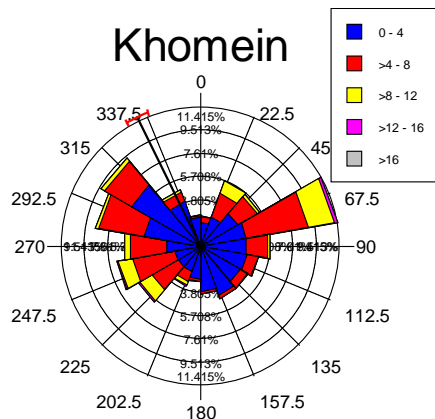
شکل ۱- سرعت متوسط باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری



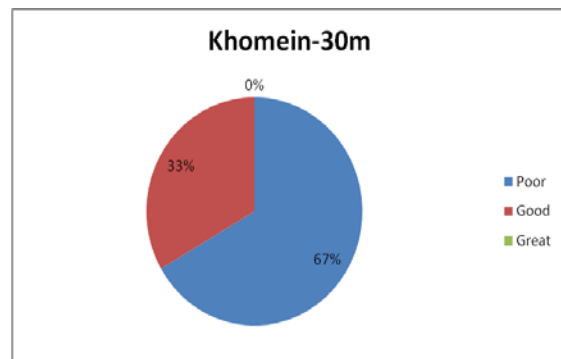
شکل ۴- ارزیابی توان متوسط باد سالیانه در ارتفاع ۴۰ متری



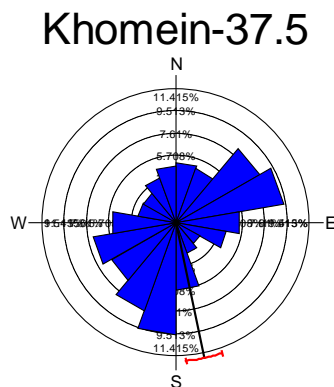
شکل ۲- توان متوسط باد ماهیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری



شکل ۷- گلباد سرعت و جهت در ارتفاع ۳۰ متری



شکل ۵- ارزیابی توان متوسط باد سالیانه در ارتفاع ۳۰ متری



شکل ۸- گلباد جهت در ارتفاع ۳۷/۵ متری

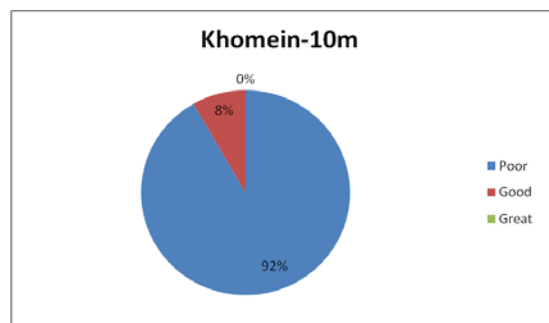
در جدول ۱ مقادیر مربوط به توان متوسط، چگالی انرژی باد، انحراف معیار، فاکتور الگوی انرژی (K_e)، انباشتگی سرعت سالیانه این ایستگاه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری آورده شده است.

Parameter	40 ^m	30 ^m	10 ^m
p/A	105.3035	97.25193	62.89803
E/A	922.4759	851.9431	550.9972
sigma	2.785871	2.716267	22.292
K_e	2.717379	2.750175	2.674186
Cumulative density	0.684998	0.684289	0.688854

جدول ۱- اطلاعات سالیانه در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و

۴۰ متری

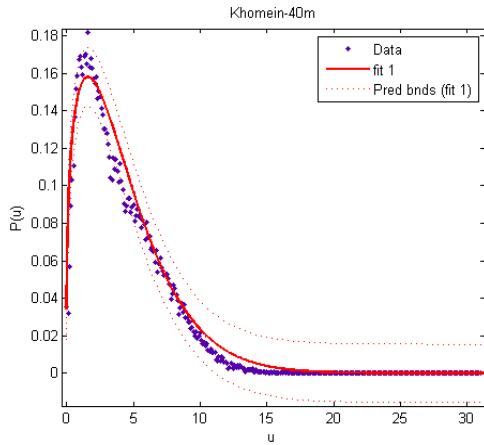
در شکل های ۹ تا ۱۵ نمودارهای توزیع ویبول با



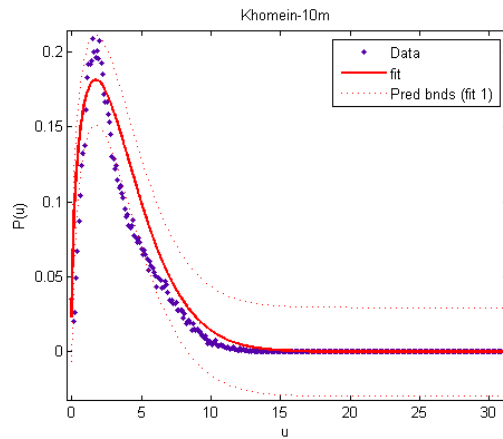
شکل ۶- ارزیابی توان متوسط باد سالیانه در ارتفاع ۱۰ متری

شکل های ۷ و ۸ نمودار گلباد این ایستگاه را نشان می دهند. همانطور که از نمودار گلباد سرعت و جهت در ارتفاع ۳۰ متری دیده می شود که جهت باد غالب در جهتی بین شمال و شمال غربی در زاویه کمتر از ۳۳۷/۵ مطابق شکل می باشد. اما نمودار گلباد جهتی در ارتفاع ۳۷/۵ متری جهت باد غالب را در جهتی بین جنوب و جنوب شرقی که این عجیب است که نشان می دهد احتمالاً داده های گزارش شده توسط پایگاه اینترنتی سازمان انرژی های نو ایران دارای اشکال است.

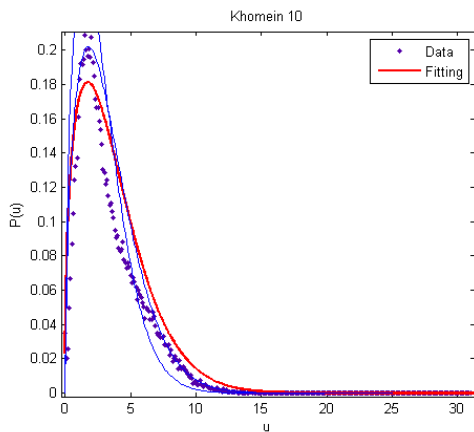
داده‌ها، فیت کردن، روابط تجربی لیسن و جوستوس، پهنای فرکانس ویبول در تمامی ارتفاعها، توزیع انباشتگی و ویبول فیت شده ترسیم شده است.



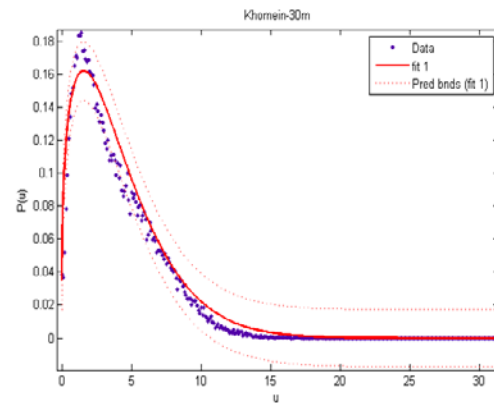
شکل ۱۱- پهنای فرکانس ایستگاه خمین در ارتفاع ۴۰ متری



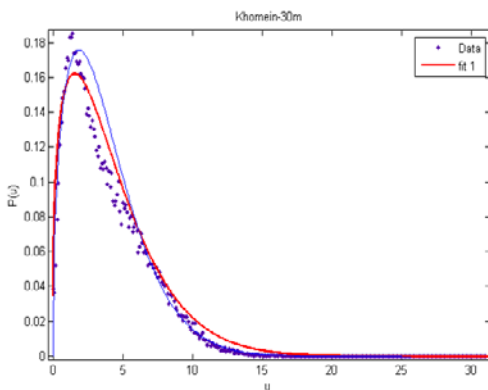
شکل ۹- پهنای فرکانس ایستگاه خمین در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۱۲- توزیع ویبول ایستگاه خمین با داده‌ها، فیتینگ در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۱۰- پهنای فرکانس ایستگاه خمین در ارتفاع ۳۰ متری



شکل ۱۳- توزیع ویبول ایستگاه خمین با داده‌ها، فیتینگ در ارتفاع ۳۰ متری

متر بر ثانیه ، $3/81$ متر بر ثانیه و $3/33$ متر بر ثانیه در ارتفاع‌های یاد شده است. همچنین گلباد بیشترین جهت وزش باد بررسی گردیده است. در ایستگاه خمین بیشترین فرکانس وزش باد در وزش باد در جهتی بین شمال و شمال غربی اتفاق افتاده است که نمی‌توان بیان کرد که در طول سال جهت غالب باد ثابت می‌باشد. این موضوع در امر چیدمانی توربین‌ها مهم است، زیرا که ثابت بودن جهت باد مزیت عمده‌ای برای نیروگاه می‌باشد.

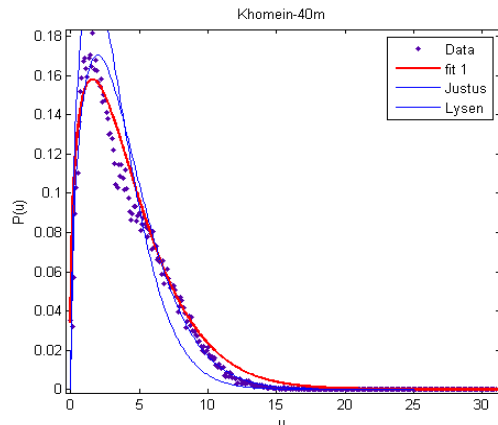
در انتها باید اذعان داشت که کار حاضر تنها یک مطالعه اولیه، به منظور تخمین پتانسیل انرژی باد در شهر مذکور می‌باشد. برای کارهای جدی‌تر باید داده‌های اندازه‌گیری شده برای چند سال را بررسی نمود. علاوه بر آن دانستن شرایط محیطی از قبیل نوع زمین، ارتفاع منطقه می‌تواند در روند تصمیم‌گیری برای محل قرارگیری ایستگاه توربین باد مؤثر باشد.

۶- مراجع

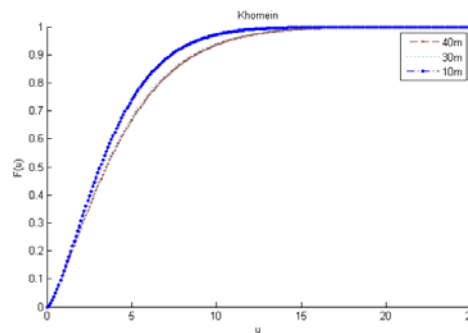
- [1] International Energy Agency (IEA), www.iea.org/
- [2] American Wind Energy Association (AWEA), www.awea.org/
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC), <http://www.gwec.net/>
- [4] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, p.11, 2002.

[۵] سازمان انرژی‌های نو ایران

<http://www.sun.org.ir/>



شکل ۱۴- توزیع ویبول ایستگاه خمین با داده‌ها، فیتینگ، فرمول تجربی لیسن و جوستوس در ارتفاع ۴۰ متری



شکل ۱۵- تابع توزیع انباشتگی در ارتفاعهای ۳۰، ۴۰، و ۱۰ متری

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل آماری داده‌های بادی ایستگاه خمین که در استان مرکزی قرار گرفته پرداخته شده است. داده‌های بادی این ایستگاه از پایگاه اینترنتی سازمان انرژی‌های نو ایران اخذ شده است. داده‌های بادی مربوط به فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در سه ارتفاع ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۴۰ متر از سطح زمین ثبت شده بود، به صورت آماری و مستقیم تحلیل شد. این ایستگاه دارای میانگین سرعت به ترتیب $3/93$

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp.93-111, 2010.
- [12] A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhastia, 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] <http://www.re-energy.ca>
- [16] <http://www.asoy.netfirms.com/cordinents.htm>
- [17] Windturbines Reference Pages, <http://www.windturbines.ca/>
- [18] The Virtual Websites for Wind Power Technology Worldwide, www.windturbinewarehouse.com/
- [19] Windturbines Reference Pages, <http://www.windturbines.ca/>
- [20] ENERCON Windblatt, <http://www.enercon.de/>
- [6] World Wind Energy Association (WWEA), www.wwindea.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، ۱۳۸۲
- [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 ۲۷، شماره ۶، صص ۹۵-۱۰۴، ۱۳۸۶-۱۳۸۲
- [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 Mostafaeipour and Hossein Abarghooei, "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 Mostafaeipour, "Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran,"