Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره هشتم، شماره ۳، پاییز ۸۵

ارزیابی فنی و اقتصادی احداث توربین های کوچک برق بادی در بروجرد

عبدالرحیم رحیمی
مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
E-mail: arahimi_k@yahoo.com
مجید ثقفی
سازمان انرژی اتمی ایران – دفتر برنامه ریزی و مطالعات اقتصادی

چکیده

تولید انرژی الکتریکی کشور در ۶ سال گذشته بطور متوسط سالانه ۸/۲۹ درصد رشد داشته است. با این وجود با پیشی گرفتن رشد مصرف برق در سال جاری ، با خاموشی و کمبود الکتریسیته روبرو خواهیم بود. یکی از راههای مواجه با این مشکل ، استفاده از توربین های کوچک برق بادی برای تامین قسمتی از الکتریسیته مصرفی واحدهای مسکونی و یا تجاری دور از شبکه سراسری و یا در مجاورت آن است.

این نوشتار، بر اساس داده های اقلیمی و هواشناسی ۱۰ ساله منطقه بروجرد و با استفاده از پیشرفته ترین نرم افزارهای پتانسیل سنجی انرژی و شبیه سازی ، اقدام به ارزیابی فنی و اقتصادی احداث یک توربین بادی ۵/۵ کیلو وات در منطقه نموده است. در پایان، میزان انرژی قابل حصول و منافع حاصل از احداث این توربین نیز، محاسبه شده است.

واژه های کلیدی: برق-انرژی - توربین بادی- پتانسیل سنجی-بروجرد

مقدمه

قیمت تولید الکتریسیته توسط نیروگاههای بادی از سال ۱۹۸۰ تا امروز بیش از ۸۰ درصد کاهش یافته است. قبل از سال ۱۹۸۰ بهای هر کیلو وات ساعت انرژی برق بادی، بیش از ۳۰ سنت بود ولی هم اکنون در نیروگاه های مدرن برق بادی ، هزینه تولید هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی، از ۵ سنت نیز کمتر شده است [۱]. این رقم با حمایت های دولت در ایالات متحده تا سال ۲۰۱۰به ۱/۵ سنت در هر کیلو وات ساعت، برای واحدهای کوچک برق بادی کاهش خواهد یافت.[۲]

در سال ۲۰۰۵، ظرفیت تولید توربین های بادی نصب شده در جهان بیش از ۵۸۹۸۲ مگا وات بوده است که، تقریبا ۱٪ ظرفیت تولید الکتریسیته جهانی را شامل شده است. ظرفیت تولید الکتریسیته توسط نیروگاههای برق بادی از سال ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۰۵ ، چهار برابر افزایش یافته است.[۳]

کشورهای زیادی مانند آلمان، دانمارک، آمریکا، اسپانیا از انرژی باد، برق قابل ملاحظه ای تولید میکنند. به طور مثال، کشور آلمان نزدیک به ۱۵۰۰۰ مگا وات از برق تولیدی خود را تا پایان سال ۲۰۰۳ از نیروگاههای برق بادی تامین می نمود.[۴] در سال ۱۹۹۷ میلادی، کمیسیون انرژی اتحادیه اروپا اعلام کرد ۱۲ درصد انرژی برق اروپا تا سال ۲۰۱۰ میلادی از منابع تجدید پذیر تامین خواهد شد[۵].

ذکر این نکته ضروری است که، متوسط سرعت باد سالیانه ، عامل مهمی در تعیین قیمت تمام شده برق تولیدی است. از آنجا که، میزان انرژی قابل حصول با توان سوم سرعت باد متناسب است، لذا، افزایش کوچکی در سرعت باد به نسبت، باعث افزایش قابل توجهی در تولید الکتریسیته و کاهش قیمت تمام شده برق تولیدی می شود. بر اساس محاسبات ، تولید الکتریسیته با وزش

www.SID.ir

Archive of SID

باد ۵ متر بر ثانیه، دو برابر تولید الکتریسیته با وزش باد ۴ متر بر ثانیه است.

مشخصات محل نصب توربین بادی

از آنجایی که هدف اصلی این نوشتار، ارزیابی فنی و اقتصادی برای نصب یک توربین ۵/۵ کیلو واتی برق بادی در شهر بروجرد (به عنوان مطالعه موردی) است، ذیلا به تشریح مشخصات جغرافیایی و منطقه ای این شهر پرداخته می شود.

شهر بروجرد واقع در دامنه ارتفاعات زاگرس و بر روی آبرفتهای دشت سیلاخور و در حالت پایکوهی قرار دارد. این شهر بطور متوسط در ارتفاع ۱۵۸۰ متری از سطح دریا و در حداقل ۴۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا حداکثر ۴۹ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و حداقل ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا حداکثر ۳۴ درجه و ۶ دقیقه عرض شمالی قراردارد. براساس نتایج بدست آمده از سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۷۵ مرکز آمار ایران، شهرستان بروجرد، دارای ۳۱۶۰۱۴ نفر جمعیت است. در همین سال شهر بروجرد دارای ۲۲۳۲۲۶ نفر جمعیت بوده و تراکم جمعیت آن در هر کیلومتر مربع ۱۹۶/۷۷ نفر است. طبق آخرین پیش بینی سالنامه آماری استان لرستان ، جمعیت شهرستان بروجرد در سال ۱۳۸۴ ، ۳۴۲۴۱۴ نفر برآورد شده است.

برای محاسبه دقیق انرژی قابل حصول از وزش باد در شهر برجرود ، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک منطقه ، اطلاعات مربوط به سرعت و جهت هر سه ساعت یکبار باد در سالهای ۱۳۸۰ ، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ را در اختیار قرار داد. شایان ذکر است که، ثبت اطلاعات مذکور در ایستگاه سینوپتیک بروجرد، واقع در ارتفاع ۱۶۲۹ متری از سطح دریا انجام گرفته است.

تئوری و روش محاسبه انرژی قابل حصول باد

با توجه به ماهیت تصادفی وزش باد با اندازه گیریهای طولانی در بازه های زمانی مختلف از تابع چگالی احتمال سرعت باد (Weibull Density Function) برای محاسبه انرژی باد استفاده می شود[۶].

رابطه (۱)
$$f(V)=\frac{k}{c}\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}}$$

همچنین تابع توزیع تجمعی نیز عبارت است از:

رابطه (۲)
$$F(V)=1-e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}}$$

در رابطه فوق V سرعت باد، c و k به ترتیب پارامترهای مقیاس و شکل هستند. این پارامترها را می توان با استفاده از متد Maximum likelihood با روش تکراری از معادلات زیر محاسبه نمود.

رابطه (۳)
$$k=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}V_i^k\ln(V_i)}{\sum_{i=1}^{n}V_i^k}-\frac{\sum_{i=1}^{n}\ln(V_i)}{n}\right)^{-1}$$

رابطه (۴)
$$c=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}V_i^k\right)^{\frac{1}{k}}$$

در معادلات مذکور V_i سرعت باد در بازه زمانی i و n تعداد سرعت غیر صفر باد است. انرژی بادی که از مساحت A که پره توربین می چرخد میگذرد با توان سوم سرعت باد نسبت مستقیم دارد و عبارت است از:

رابطه (۵)
$$P(V)=\frac{1}{3}\rho AV^3$$

در این معادله ρ چگالی هوای منطقه است. چگالی توان باد یک سایت (Wind Power Density) بر اساس توزیع ویبول به صورت زیر محاسبه می شود:

رابطه (۶)
$$\frac{P}{A}=\int_0^{\infty}P(V)\,f(V)dV=\frac{1}{2}\rho c^3\Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right)$$

در معادله فوق Γ تابع ریاضی گاما و T بازه زمانی مدنظر است. در یک توربین ایده آل رتور در V_O سرعت آغاز (Cut-in) شروع به چرخش نموده و انرژی تولیدی تا سرعت نامی V_R افزایش پیدا کرده و پس از آن انرژی تولیدی تا V_O سرعت توقف (Cut-off) ثابت میماند. در سرعتهای بالاتر از V_O برای جلوگیری از خرابی توربین متوقف میشود.

www.SID.ir

Archive of SID

نهایتا انرژی تولیدی توربین در بازه زمانی T عبارت است از: رابطه (۷)

$$E_{TW}=T\int_{V_I}^{V_R}P(V)\,f(V)dV+T\int_{V_R}^{V_O}P_R\,f(V)dV$$

در این رابطه P_R توان نامی ثابت در سرعت نامی V_R است. P را در رابطه بالا با معادله (۵) و $f(V)$ را با معادله (۱) جایگزین میکنیم:

رابطه (۸)

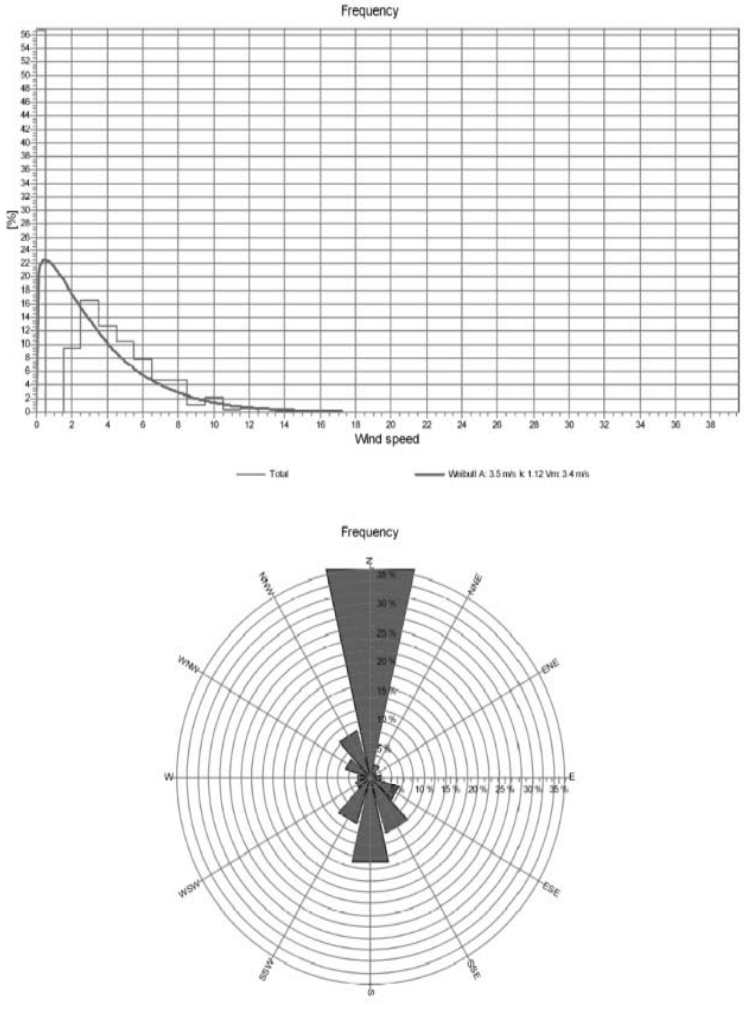
$$E_{TW}=\frac{\rho}{2}TA\Big(\int_{V_R}^{V_O}V^3\frac{k}{c}(\frac{V}{c})^{k-1}e^{-(\frac{V}{c})^k}dV+V_R^3\int_{V_R}^{V_O}\frac{k}{c}(\frac{V}{c})^{k-1}e^{-(\frac{V}{c})^k}dV\Big)$$

انتگرال رابطه ۸ را به روش تحلیلی نمیتوان حل نمود و باید از روشهای عددی استفاده نمود. برای محاسبه انرژی واقعی تولیدی توربین E_{TA} باید راندمان آنرا در رابطه بالا لحاظ نمود.

برای حل معادلات فوق و محاسبه انرژی قابل حصول در بروجرد با استفاده از داده های هواشناسی در دسترس از نرم افزار WindPro و Wasp از کمپانی EMD [۷] که دارای بالاترین اعتبار بین المللی برای محاسبه انرژی قابل حصول و چیدمانی مطلوب توربینهای بادی است، استفاده شده است.

آنالیز نرم افزاری اطلاعات

طبق آمار و اطلاعات جمع آوری شده از اداره هواشناسی بروجرد و همچنین سازمان هواشناسی ، و بر اساس مدل ریاضی فوق ، با استفاده از نرم افزار محاسبات لازم در خصوص آنالیز باد منطقه صورت



نمودار ۱ - گلباد و فرکانس سرعت باد در سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ شهر بروجرد

www.SID.ir

Archive of SID

پذیرفت. در ابتدا، سرعت و جهت های باد را بر اساس واحدهای SI و با توجه به سال ، ماه ، روز و ساعت اندازه گیری مرتب نموده و اطلاعات سه سال متوالی را در این محاسبات منظور می نماییم. دلیل استفاده از ۳ سال متوالی ، در نظر گرفتن تاثیرات اقلیمی سالهای متوالی در بدست آوردن انرژی قابل حصول بوده است. در نمودار ۱ اطلاعات سالهای۱۳۸۰ ، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ ادغام شده و از مجموع اطلاعات در دسترس سرعت و جهت باد در بازه زمانی هر ۲۴ ساعت، آنالیز شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است، باد غالب در جهت شمال می باشد. متوسط سرعت سه سالانه باد ۳/۴۹ متر بر ثانیه است.

متوسط سرعت وزش باد در سالهای ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ به ترتیب ، ۳/۸۷ ، ۳/۶۵ و ۲/۹۷ متر بر ثانیه بوده است. با توجه به اینکه بادهای بالاتر از ۳/۸ متر بر ثانیه، برای احداث توربین های کوچک برق بادی اقتصادی است[۸] ، متوسط سرعت سالانه باد ۳/۵ متر بر ثانیه در منطقه مورد نظر، برای احداث توربین شرایطی نزدیک به شرایط ایده آل را دارا است.

کل اطلاعات در دسترس، مربوط به سرعت های باد ۳ ساله منطقه تعداد ۸۱۲۴ مورد مشاهده بوده که از ابتدای سال ۱۳۸۰ تا انتهای سال ۱۳۸۲ می باشد. از مجموع اطلاعات جمع آوری شده ۳۰۷۷ مورد مشاهده از اطلاعات ثبت شده که، ۳۷ درصد کل اطلاعات را شامل است، سرعت های ۰ و ۱ و ۲ است که برای به حرکت در آوردن توربین انتخابی مناسب نمی باشد.

در طی سه سال، ثبت اطلاعات که در بازه های زمانی هر ۳ ساعت یکبار انجام پذیرفته است ، در ۳۰ مورد از اطلاعات ثبت شده که ۳٪ کل اطلاعات را شامل می شود ، سرعت باد بالاتر از ۱۴ متر بر ثانیه ثبت شده است. که بالاترین سرعت های ثبت شده ، ۲۴ متر بر ثانیه در تاریخ ۱۳۸۱/۱/۱۵ ساعت ۱۲ ظهر و ۲۰ متر بر ثانیه در تاریخهای ۱۳۸۲/۲/۱۲ و ۱۳۸۱/۱/۱۵بوده است. با توجه به مطالعات ، اطلاعات در دسترس آنالیز صورت گرفته از رژیم باد منطقه ، جهت تند بادها، عموما از جنوب و جنوب شرق بوده است.

استفاده اطلاعات در خصوص سرعت متوسط سالانه ، ماهانه و روزانه در انتخاب توربین بادی متناسب با اقلیم منطقه تاثیر بسزایی دارد. توربین های با توان کم، در بادهایی با سرعت بین ۲ و ۳ متر بر ثانیه، انرژی الکتریکی یا مکانیکی تولید می نمایند در صورتی که، توربین های با توان بالا در سرعت های بالاتر از ۴ یا ۵ متر بر ثانیه، شروع به حرکت و تولید انرژی می نمایند. هر نوع بی توجهی نسبت به اقلیم ، متوسط سرعت روزانه، ماهانه و سالانه، می تواند در انتخاب توربین مناسب و در نتیجه کارایی آن مشکل ایجاد نماید.از آنجایی که بادهای موثر بر حرکت توربین های بادی کوچک بادهایی با سرعت بیش از ۲ متر بر ثانیه می باشد ، اقدام به حذف دادهای ۲ و کمتر از ۲ متر بر ثانیه نمودیم.با حذف این اطلاعات ، سرعتها و جهت های موثر و معنی دار نمود پیدا می نمایند.

نمودار ۲ میانگین سرعتهای بالاتر از ۲ متر بر ثانیه و فرکانس آنها و همچنین پارامتر های A و k را نشان می دهد.همانگونه که مشخص است ، بیشترین سرعت در جهت های جنوب (S) ، جنوب جنوب غربی (SSW) می باشد.

نمودار ۳ سرعت و جهت باد در سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ را با حذف سرعت های ۰ ، ۱ و ۲ متر بر ثانیه (حذف ۳۷٪ اطلاعات) نشان می دهد. . همانگونه که مشخص است، سرعت باد در ماههای منتهی به فصل پائیز به شکل قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در همین مدت جهت باد غالب در جهت جنوب می باشد. این نمودار از آن جهت حائز اهمیت است که، رفتارهای ناگهانی و اطلاعات ناهمگون را به وضوح نشان میدهد. خوشبختانه در اقلیم بروجرد وزش باد در تمامی ماههای سال وجود دارد . اگرچه میانگین سرعت باد در فصل تابستان کمتر از پائیز و زمستان است ، اما متوسط سرعت باد بیش از ۳/۵ متر بر ثانیه است.

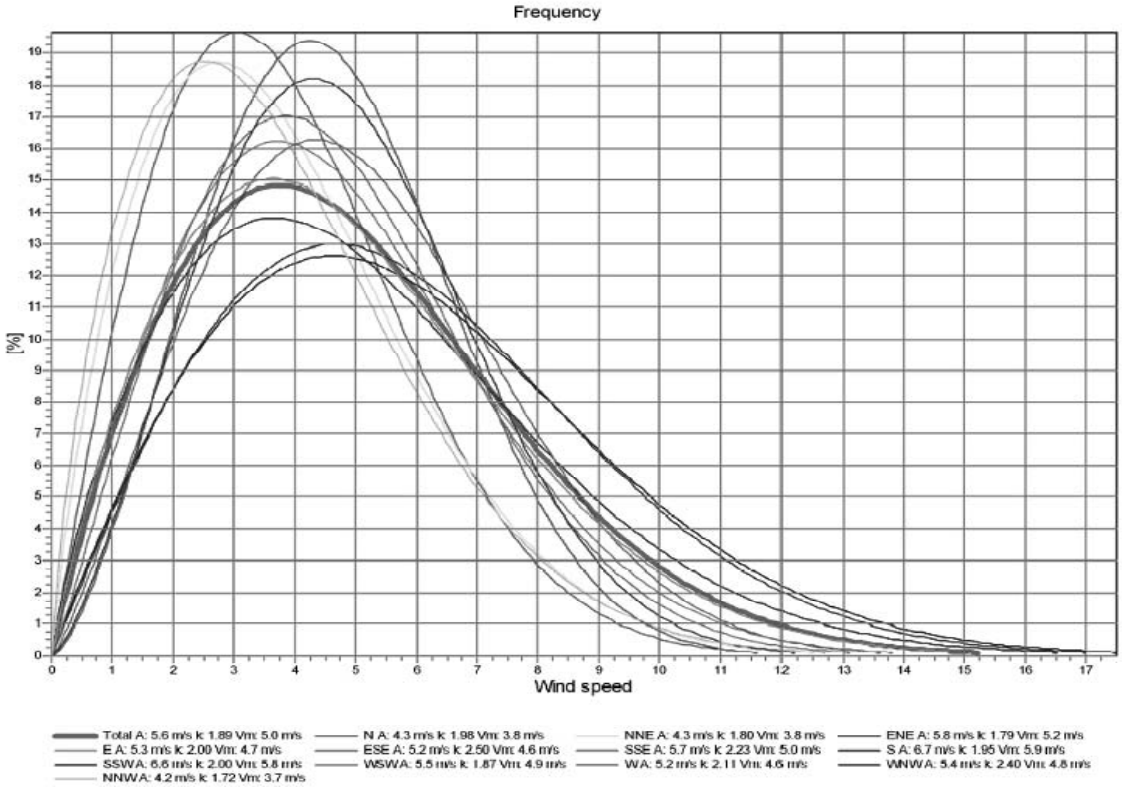
اوج وزش باد در ساعت های گرم حوالی ظهر در بروجرد است. که، با راهکارهای مناسب می توان از این

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ - پارامتر A و K و فرکانس سرعت باد در جهت های مختلف در سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲

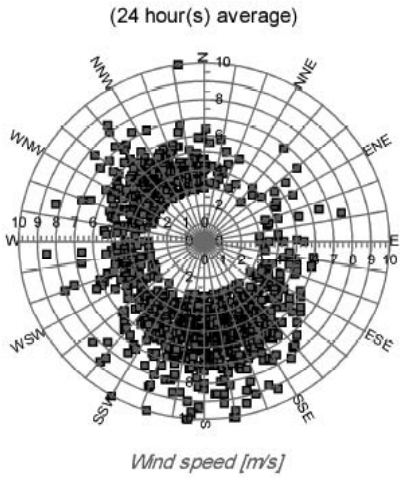
قسمت	پارامتر A [m/s]	متوسط سرعت باد[m/s]	پارامتر k	فرکانس	درصد فرکانس
N -۰	۴/۳۴	۳/۸۴	۱/۹۸۴	۱۰/۳۱	۱۰/۳
NNE-۱	۴/۳۰	۳/۸۲	۱/۸۰۱	۳/۲۱	۳/۲
ENE-۲	۵/۸۰	۵/۱۶	۱/۷۹۰	۱/۵۰	۱/۵
E-۳	۵/۲۸	۴/۶۸	۱/۹۹۹	۲/۷۷	۲/۸
ESE -۴	۵/۲۱	۴/۶۲	۲/۵۰۴	۷/۹۴	۷/۹
SSE -۵	۵/۶۸	۵/۰۳	۲/۲۳۰	۱۴/۲۳	۱۴/۲
S -۶	۷/۶۹	۵/۹۳	۱/۹۵۳	۲۲/۶۷	۲۲/۷
SSW -۷	۶/۵۹	۵/۸۴	۱/۹۹۶	۱۲/۵۱	۱۲/۵
WSW -۸	۵/۴۷	۴/۸۶	۱/۸۷۱	۳/۹۸	۴/۰
W -۹	۵/۲۲	۴/۶۳	۲/۱۱۲	۳/۲۱	۳/۲
WNW -۱۰	۵/۳۸	۴/۷۷	۲/۴۰۴	۶/۸۳	۶/۸
NNW -۱۱	۴/۱۹	۳/۷۴	۱/۷۲۴	۱۰/۸۳	۱۰/۸
متوسط	۵/۵۸	۴/۹۶	۱/۸۹۴	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰



نمودار ۲ - فرکانس سرعت باد در جهت های مختلف ، سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ شهر بروجرد

www.SID.ir

Archive of SID



Monthly mean values of wind speed in m/s

Month	2001	2002	2003	mean	mean of months
Jan	5.6		5.5	5.6	5.6
Feb	5.4		6.2	5.7	5.8
Mar	5.2	5.6	5.9	5.6	5.6
Apr	5.5	5.9	5.3	5.6	5.6
May	4.7	4.9	4.9	4.8	4.8
Jun	4.9	4.9	4.5	4.8	4.8
Jul	4.7	4.9	4.9	4.8	4.8
Aug	4.7	4.3	4.8	4.6	4.6
Sep	4.7	4.2	5.0	4.6	4.6
Oct	5.7	4.5	6.1	5.4	5.4
Nov	5.4	5.2	5.9	5.5	5.5
Dec	5.6	6.2	5.4	5.7	5.7
mean, all data	5.2	5.1	5.3	5.2	
mean of months	5.2	5.1	5.4		5.2

نمودار ۳ - گلباد ۲۴ ساعته در سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ با حذف سرعت های ۰ ، ۱ و ۲ متر بر ثانیه

گردش خود بخودی ، استفاده بهینه بعمل آورد. با توجه به وزش تند بادهایی با سرعت های بیش از ۲۴ متر بر ثانیه از سمت جنوب و جنوب غربی ، طراحی دقیق سازه ها، برای مقاومت در برابر وزش بادهای تند با لحاظ کردن ضرائب ریسک مهندسی، ضروری است.

در قسمت فوقانی نمودار ۴ ، گلباد ۳ ساله شهر بروجرد به همراه متوسط سرعت در ماهها و سالهای مختلف و همچنین متوسط سه ساله سرعت باد را نشان می دهد. در قسمت فوقانی همچنین گلباد شهر بروجرد نشان داده شده است . همانگونه که مشخص است ، بادهای غالب منطقه از سمت جنوب و با سرعت بیشتری می وزد . این مطلب نشان دهنده این است که، در سمت جنوب توربین ، کمترین زبری ممکنه را داشته باشد. .

از آنجایی که زبری (Roughness) دریاها و دریاچه های صفر می باشد ، بهترین حالت قرار گرفتن توربین ، احداث آن در ضلع شمالی دریاچه مصنوعی بروجرد است. در قسمت میانی نمودار ۴ ، نمودار سرعت –جهت باد در ساعات و ماههای مختلف سال را نشان می دهد. همانگونه که مشخص است، بیشترین سرعت باد در ساعات میانی روز است که، متوسط سرعت بیش از ۵ متر بر ثانیه است و کمترین آن، در ساعات ابتدایی بامداد و انتهایی شب است. همچنین بیشتری سرعت باد در ماههای پایانی زمستان و ابتدایی بهار است. در هر دو نمودار بیشترین سرعت باد از سمت جنوب و جنوب غرب است.

در قست پایینی نمودار ، سرعت و جهت، هر سه ساعت یک بار در طول سه سال گذشته نشان داده شده است. صعودها و فرودهای ناگهانی نشان از کاهش و یا افزایش ناگهانی سرعت باد در منطقه است.

انتخاب توربین بادی

انتخاب توربین بادی وجانمایی آن، یکی از مهمترین عوامل در میزان انرژی سالانه تولیدی توربین است. از آنجایی که پراکندگی سرعت های باد در منطقه بروجرد بیشتر بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه است ، امکان استفاده از توربین های با توان بالا که از سرعت بالاتر از ۵ متر بر ثانیه شروع به حرکت می کنند امکان پذیر نمی باشد از اینرو، استفاده از توربین های با توان پائین مناسب تر است. توان باد، نرخ زمانی انرژی جنبشی جریان هوای ورودی به سطح معینی می‌باشد که برابر است با:

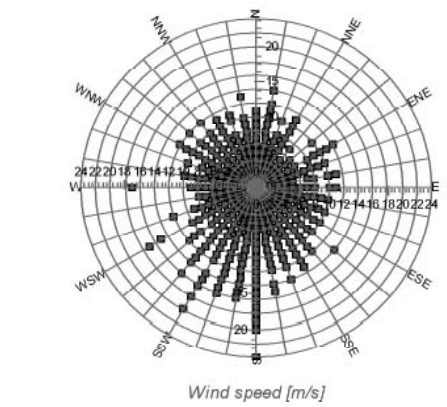
رابطه (۹)

$$\overline{p_w} = \frac{1}{2}\rho A \sum_{i=1}^{n} p(u_i) u_i^3$$

ρ چگالی باد، A سطح جاروب شده روتور توربین بادی، u سرعت و $p(u_i)$ تابع احتمال است. چگالی توان عبارتست از توان باد در واحد سطح جاروب شده

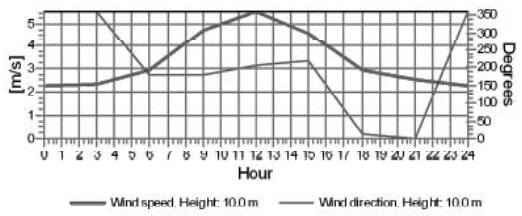
www.SID.ir

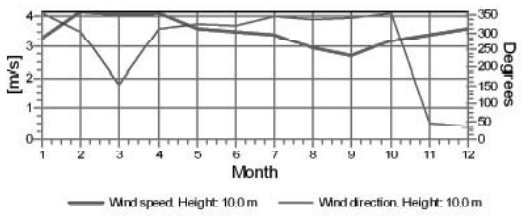
Archive of SID

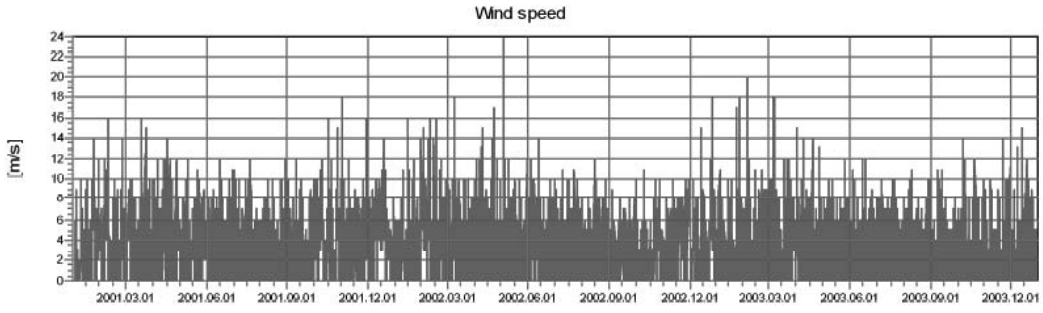


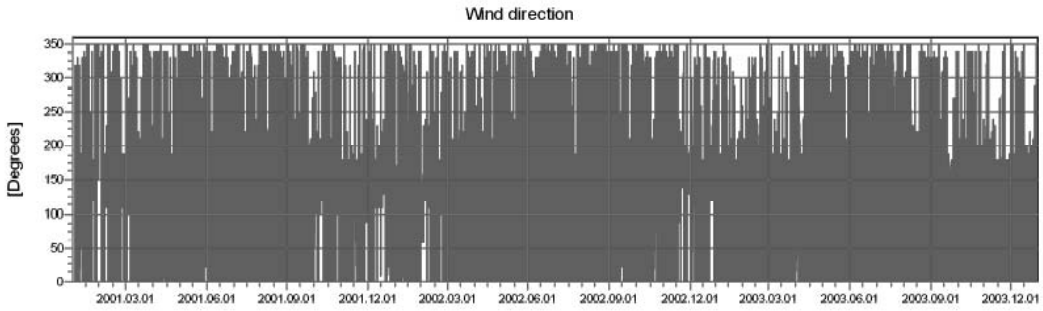
Monthly mean values of wind speed in m/s

Month	2001	2002	2003	mean	mean of months
Jan	3.6	3.6	2.7	3.3	3.3
Feb	4.2	5.3	3.0	4.2	4.2
Mar	3.8	4.3	4.0	4.1	4.1
Apr	4.3	4.2	3.8	4.1	4.1
May	3.9	3.6	3.4	3.6	3.6
Jun	3.6	3.7	3.2	3.5	3.5
Jul	3.2	3.6	3.3	3.4	3.4
Aug	3.4	2.8	2.5	2.9	2.9
Sep	3.4	2.7	1.9	2.7	2.7
Oct	4.3	2.8	2.5	3.2	3.2
Nov	4.1	3.6	2.5	3.4	3.4
Dec	4.5	3.6	2.6	3.6	3.6
mean, all data	3.9	3.6	3.0	3.5	
mean of months	3.9	3.7	3.0		3.5









نمودار ۴ - گلباد ۲۴ ساعته در سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ همراه با سرعت باد در ساعتهای مختلف روز و ماههای مختلف سال

روتور. با توجه به اینکه چگالی توان، مستقل از مساحت روتور توربین می‌باشد، از آن به عنوان مشخصه قدرت باد استفاده می‌شود. به همین ترتیب چگالی انرژی، عبارتست از انرژی باد در واحد سطح جاروب شده روتور.

ضریب ظرفیت عبارتست از، نسبت توان متوسط خروجی توربین به توان نامی توربین که، برای محاسبه این ضریب باید منحنی توان توربین در دسترس باشد. مطابق مطالعات وبررسی های بعمل آمده برای شهر بروجرد وبا توجه به شرایط منطقه و محدودیت های مالی و همچنین با توجه به جداول گلباد ، سرعت متوسط سالانه ، متوسط سرعت های بالاتر از ۲ متر بر ثانیه ، توربینی با مشخصات زیر که یک نوع استاندارد از توربین ها ی موجود در بازار های جهانی است ، انتخاب شد. برای بیشتر شدن متوسط سالانه سرعت باد از یک دکل ۵۰ متری برای قرار گرفتن توربین استفاده شد. مشخصات

www.SID.ir

Archive of SID

توربین انتخابی به شرح جدول زیر است.

با استفاده از اطلاعات هواشناسی و با توجه به رابطه شماره ۹ ، انرژی قابل حصول سالانه در هر متر مربع و در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین در شهربروجرد، توسط نرم افزار محاسبه شده و برابر با ۱۴۲۷ کیلو وات ساعت بر متر مربع می باشد.

که این مقدار انرژی برابر با ۱۶۳ وات بر متر مربع است.

برای مقایسه پتانسیل باد منطقه با کلاس بندی استاندارد احداث نیروگاههای برق بادی جدول ۳ [۹] که از کلاس بندی سایتهای بادی که توسط دپارتمان انرژی آمریکا (U.S. Department of Energy) منتشر شده، استفاده شده است. مطابق جدول مشاهده می گردد که سایت بادی بروجرد در در کلاس ۱ قرار می گیرد.

استفاده از انرژی باد در صورتی که سرعت وزش باد از حد معینی بالاتر باشد اقتصادی است و تنها نوع توربین و نوع استفاده متفاوت است. در مناطقی که پتانسیل انرژی باد کم است ، استفاده از توربین های با توان کم و یا توربین های آبکش توصیه می شود . بر اساس مطالعه انجمن بین المللی انرژیهای تجدید پذیر ، منطقه ای که متوسط سرعت باد سالیانه آن از ۳/۸ متر برثانیه بالاتر باشد ، برای احداث توربین بادی مناسب است.[۸] در قسمتهای بعدی و بر اساس محاسبات انجام گرفته، متوسط سرعت سالیانه در ارتفاع ۵۰ متری سطح زمین (محل نصب توربین) در شهر بروجرد ۴/۲ متر بر ثانیه بر آورد شده است. همانگونه که مشخص است، این توربین با حداقل وزش باد ۳/۵ متر بر ثانیه شروع به حرکت می کند. در سرعتهای ۱۲ و ۱۳ متر بر ثانیه بیشترین توان خروجی را داشته و با سرعت های بیشتر از ۲۵ متر بر ثانیه توربین می ایستد.

پس از محاسبات ، انرژی تولیدی توسط توربین بادی ۵/۵ کیلو وات در ارتفاع ۵۰ متر محاسبه می شود. این انرژی تولیدی با باد متوسط ۴/۲ متر بر ثانیه شهر بروجرد ، مقدار ۶/۸ مگاوات ساعت در سال محاسبه شده است. (جدول ۴)

جدول ۲ - مشخصات توربین انتخابی برای منطقه بروجرد

ارتفاع هاب	فرکانس خروجی	rpm	تعداد ژنراتور	قطر روتور	نوع توربین
۵۰ m	۵۰Hz	۱۰۰	۱	۵/۵ m	۵/۵ Kw

جدول ۳ - کلاس بندی پتانسیل مناطق بادخیز

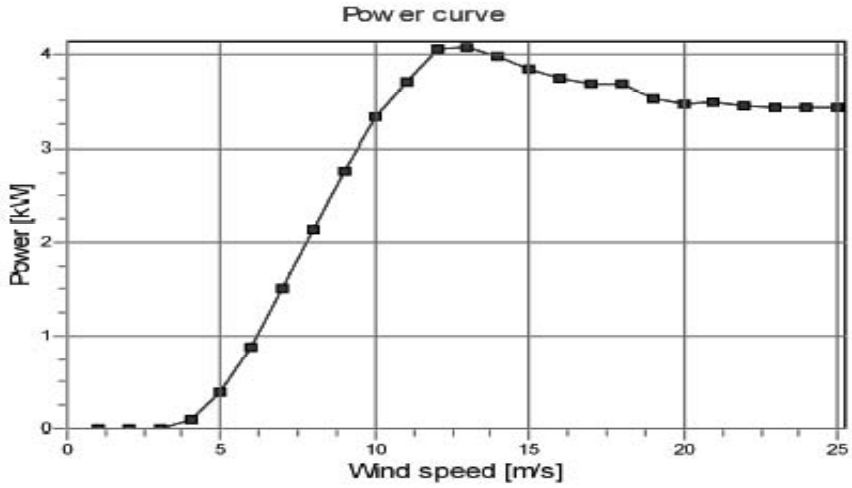
چگالی توان باد ۵۰m (W/m2)	کلاس بندی توان باد
۰-۲۰۰	۱
۲۰۰-۳۰۰	۲
۳۰۰-۴۰۰	۳
۴۰۰-۵۰۰	۴
۵۰۰-۶۰۰	۵
۶۰۰-۸۰۰	۶
۸۰۰-۲۰۰۰	۷

جدول ۴ - انرژی سالیانه قابل حصول در سایت انتخابی و انرژی سالیانه تولیدی توربین

نتیجه محاسبات براساس ارتفاع هاب ۵۰ متری از سطح زمین انرژی باد: ۱/۴۲۷ kWh/m2 متوسط سرعت باد: ۴/۲ m/s							
	نمودار توان			انرژی سالیانه			
محاسبه انرژی سالیانه براساس نوع توربین استاندارد WTG Volks-Wind	توان	قطره برها	ارتفاع	تولید انرژی الکتریکی	تولید انرژی الکتریکی با ۱۰٪ کاهش	متوسط سرعت باد	فاکتور ظرفیت
	۶ kW	۵/۵ متر	۵۰ متر	۶/۸ MWh	۶ MWh	۴/۲ متر بر ثانیه	۱۴ درصد

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۵- نمودار قدرت توربین بادی انتخابی برای شهر بروجرد

ارزیابی اقتصادی

الف) بهای توربین انتخابی:

بطور کلی طی سال ۲۰۰۰، در دنیا ، خرید و نصب توربین های با توان بالا ، به ازای هر کیلو وات، ۷۹۰ دلار هزینه داشته است. این قیمت، برای توربین های با توان پائین، بیشتر است. توربین بادی انتخابی با ارتفاع های ۵۰ متر با طول عمر ۲۵ سال ، همراه با گارانتی ۳ ساله، حدود ۱۰،۵۰۰ دلار قیمت دارد .]۱۰[(مطابق قیمت های بین المللی داده شده در جدول ۵)

هزینه تعمیر و نگهداری برای سایتهای بزرگ برق بادی ۲٪ هزینه خرید و نصب را شامل می شود. برای سایتهای کوچک، این هزینه افزایش می یابد. برای توربین نصب شده ، این هزینه ۲۰ درصد هزینه خرید و نصب معادل ۲۱۰۰ دلار در نظر گرفته شده است . با توجه به موارد فوق و با توجه به نرخ برابری ۹۱۰۰ ریال به ازای یک دلار آمریکا ، هزینه خرید ، نصب ، تعمیر و نگهداری این توربین معادل ۱۱۴،۶۶۰،۰۰۰ ریال برآورد می شود.

ب)محاسبه قیمت الکتریسیته تولیدی:

بر اساس سناریوی مرجع آژانس بین المللی انرژی، مصرف جهانی برق در دوره ۲۰۲۵-۲۰۰۲، تقریباً دو برابر خواهد شد . انتظار می رود در طول دوره ، پیش بینی تقاضای جهانی برق، با نرخ متوسط ۲/۶ درصد در سال از ۱۴۲۷۵ میلیارد کیلو وات ساعت در سال ۲۰۰۲ به ۲۶۰۱۸ میلیارد کیلو وات ساعت در سال ۲۰۲۵ بالغ گردد. در حدود ۵۸ درصد از افزایش تقاضای برق در دوره پیش بینی مربوط به اقتصاد کشور های در حال رشد خواهد بود .[۱۱]

در ایران به دلیل رشد فزاینده مصرف و افزایش قیمت جهانی نفت، قیمت فروش الکتریسیته هر ساله افزایش می یابد. در سال ۱۳۸۳ قیمت برق برای مصارف کشاورزی ،خانگی ، تجاری به ترتیب برابر با ۱۵ ریال ، ۱۰۴ ریال و ۴۴۹ ریال است. قیمت برق در سال ۱۳۸۳، نسبت به سال پیش از آن ، ۱۴/۹ درصد رشد داشته است. [۱۲].

از آنجایی که، توربین انتخابی برای شهر بروجرد در کنار واحدهای تجاری کنار دریاچه مصنوعی شهر نصب می شود ، لذا قیمت فروش برق به بخش تجاری، مبنای محاسبه قرار گرفته است. قیمت فروش برق به بخش تجاری در سال ۱۳۷۳ ، به ازای هر کیلو وات ساعت مصرف انرژی الکتریکی ۶۵ ریال و در سال ۱۳۸۳ ، ۴۴۹ ریال بوده است. با توجه به این روند چنانچه از رابطه تعدیل قیمت(Cost Adjustment Factor) برای محاسبه رشد سالیانه قیمت بشرح زیر استفاده شود.

$$r = \sqrt[n]{\frac{P_l}{P_f}} - 1$$

(دررابطه فوق P_l قیمت در آخرین سال ، P_f قیمت

www.SID.ir

Archive of SID

نمودار ۵- نمودار قدرت توربین بادی انتخابی برای شهر بروجرد

سال	۱۹۸۱	۲۰۰۰
محدوده ظرفیت	۱۹۸۱ :۲۵ kW	۲۰۰۰ :۱۶۵۰ kW
قطر پره ها	۱۰ متر	۷۱ متر
(دلار) هزینه کل	۶۵ $	۱۳۰۰ $
هزینه هر کیلو وات	۲۶۰۰ $	۷۹۰ $
(Kwh) تولید کل انرژی سالیانه	۴۵۰۰۰	۵۶۰۰۰۰۰

در اولین سال ، n تعداد سالهای دوره و r متوسط نرخ رشدسالانه)

$$r = \sqrt[10]{\frac{449}{64.3}} - 1 = 0.213$$

با توجه به محاسبه انجام شده، طی ۱۰ سال گذشته، متوسط نرخ رشد سالانه معادل ۲۱/۳ درصد است، لذا، با این سناریو ، می توان قیمت فروش برق از سال ۱۳۸۵ تا یک دوره ۲۵ ساله محاسبه و لحاظ نمود. از سویی دیگر، با توجه به سیاستهای جدید دولت در خصوص مهار تورم و یک رقمی نمودن آن ، نرخ رشد قیمت برق را از ۲۱/۳ درصد طی ۱۰ ساله گذشته ، به حدود ۱۵ درصد در طی سالهای آتی ۱۴۰۹-۱۳۸۵، کاهش داده و رقم حداکثر ۱۵ درصد رشد سالیانه را در محاسبات لحاظ نمودیم . با توجه به تولید سالیانه ۶/۸ مگا وات ساعت انرژی الکتریکی، کل مقدار فروش برق توسط توربین نصب شده دربروجرد طی ۲۵ سال آینده محاسبه می شود.

ج) محاسبه هزینه های زیست محیطی :

هزینه های اجتماعی انتشار گازهای گلخانه ای در بخش نیروگاهی کشور، بر اساس میزان تولیدی برق توسط نیروگاههای فسیلی کشور در سال ۱۳۸۳ ، برای SO_2 ،NOx و CO_2 به ازای هر کیلو وات ساعات برق تولیدی به ترتیب برابر با ۴۴/۸۹ ، ۵/۴۶ و ۹۰/۶۵ ریال خواهد بود که، جمعا رقمی معادل ۱۴۱ ریال بر آورد می شود.[۱۳] لذا می توان نتیجه گرفت که با نصب این توربین، سالانه از انتشار ۴/۵۶ تن CO_2 در هوا جلوگیری می نماید . [۱۳]

هزینه اجتماعی و زیست محیطی ناشی از عدم انتشاز گازهای فوق در سال ۱۳۸۳ مبلغ ۱۴۱ ریال بر آورد شده است در صورتی که با افزایش ۲۱ درصدی سالیانه قیمت انرژی ، هزینه های زیست محیطی نیز، با همین رشد افزایش یابد ، برای ۲۵ سال آینده نرخ رشدی برابر با ۱۵ درصد برای هزینه های زیست محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریکی در نظر گرفته می شود.

در جدول شماره ۶ پیش بینی قیمت فروش برق به واحدهای تجاری ، هزینه های اجتماعی و زیست محیطی ناشی از تولید آن به همراه قیمت فروش سالیانه ۶/۸ مگا وات ساعت برق تولیدی توربین نصب شده ، آمده است .

ج) محاسبه درآمدهای حاصل از فروش برق توربین بادی بروجرد :

حال به منظور برآورد درآمدهای حاصل از فروش برق تولیدی توربین بادی طی دوره عمر مفید (۲۵ سال آینده) وتبدیل ارزش این درآمدها به حال، می توانیم از رایج ترین تکنیک ها و شاخص های اقتصاد مهندسی و ارزیابی طرحها کمک بگیریم برای این منظور، از روش ارزش حال (PWM)[1] استفاده می نمائیم، بنابر این، مجموع کل درآمدهای حاصل از فروش برق تولیدی توربین بادی بروجرد که بتدریج طی ۲۵ سال آینده عاید می شود را به کمک رابطه زیر محاسبه می نماییم[۱۵] رابطه (۱۱)

$$PW = \sum_{i=1}^{n} R_i \left(\frac{1}{(1+r)^n}\right)$$

(در این رابطه PW مجموع ارزش حال کل درآمدهای حاصل از توربین برق بادی طی ۲۵ سال آینده با اعمال هزینه های زیست محیطی ، R_i درآمد سالیانه توربین ،

1- PRESENT WORTH METHOD

www.SID.ir

Archive of SID

r معادل متوسط سالیانه نرخ سود بانکی (۹ ٪) و n عمر مفید توربین است). حال با منظور نمودن مقادیر و داده های مورد نظر در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$PV = \sum_{i=1}^{n=25} P_i\left(\frac{1}{(1+0.09)^n}\right) = 271{,}582{,}570$$

ریال

با توجه به اعمال روش ارزش حال و انجام محاسبات فوق، در صورت نصب این توربین در کنار دریاچه مصنوعی بروجرد ، و طبق محاسبات جدول شماره ۶ ، مشاهده می شود که این توربین در طی دوره ۲۵ ساله خود (عمر مفیدپروژه) مجموعا مبلغ ۲۷۱/۵۸۲/۵۷۰ ریال یعنی معادل احداث ۱/۵ توربین ۵/۵ کیلو واتی دیگر در آمد ایجاد خواهد نمود . همچنین توربین مذکور پس از ۱۴ سال از زمان شروع بهره برداری، هزینه های سرمایه گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری خود را برگشت داده و از آن پس به سود دهی خواهد رسید.

جدول ۶- محاسبه ارزش حال مجموع در آمدهای حاصل فروش برق توربین بادی بروجرد

ارزش حال درآمدهای	ارزش حال در آمدهای	در آمد سالیانه حاصل	هزینه های اجتماعی کاهش	پیش بینی قیمت فروش	سال
تجعی حاصل از فروش	سالیانه با نرخ تنزیل ۹٪	از فروش برق و عدم	آلودگی محیط زیست	برق با نرخ رشد ۱۵٪	
برق و عدم آلودگی(ریال)	(فروش برق + عدم آلودگی)ریال	آلودگی به (ریال)	ریال بر کیلو وات (ساعت)	در سال (ریال بر کیلو وات ساعت)	
۵۳۰۵۸۷۰	۵۳۰۵۸۷۰	۵۳۰۵۸۷۰	۱۸۶	۵۹۴	۱۳۸۵
۱۰۹۰۳۸۰۶	۵۵۹۷۹۳۶	۶۱۰۱۷۵۱	۲۱۴	۶۸۳	۱۳۸۶
۱۶۸۰۹۸۸۶	۵۹۰۶۰۸۰	۷۰۱۷۰۱۳	۲۴۷	۷۸۵	۱۳۸۷
۲۳۰۴۱۰۷۱	۶۲۳۱۱۸۵	۸۰۶۹۵۶۵	۲۸۴	۹۰۳	۱۳۸۸
۲۹۶۱۵۲۵۶	۶۵۷۴۱۸۶	۹۲۸۰۰۰۰	۳۲۶	۱۰۳۹	۱۳۸۹
۳۶۵۵۱۳۲۴	۶۹۳۶۰۶۸	۱۰۶۷۲۰۰۰	۳۷۵	۱۱۹۴	۱۳۹۰
۴۳۸۶۹۱۹۳	۷۳۱۷۸۶۹	۱۲۲۷۲۸۰۰	۴۳۱	۱۳۷۴	۱۳۹۱
۵۱۵۸۹۸۸۱	۷۷۲۰۶۸۸	۱۴۱۱۳۷۲۰	۴۹۶	۱۵۸۰	۱۳۹۲
۵۹۷۳۵۵۶۱	۸۱۴۵۶۸۰	۱۶۲۳۰۷۷۸	۵۷۰	۱۸۱۶	۱۳۹۳
۶۸۳۲۹۶۲۷	۸۵۹۴۰۶۶	۱۸۶۶۵۳۹۴	۶۵۶	۲۰۸۹	۱۳۹۴
۷۷۳۹۶۷۶۱	۹۰۶۷۱۳۴	۲۱۴۶۵۲۰۳	۷۵۴	۲۴۰۲	۱۳۹۵
۸۶۹۶۳۰۰۴	۹۵۶۶۲۴۲	۲۴۶۸۴۹۸۴	۸۶۸	۲۷۶۳	۱۳۹۶
۹۷۰۵۵۸۲۸	۱۰۰۹۲۸۲۴	۲۸۳۸۷۷۳۲	۹۹۸	۳۱۷۷	۱۳۹۷
۱۰۷۷۰۴۲۲۱	۱۰۶۴۸۳۹۳	۳۲۶۴۵۸۹۱	۱۱۴۷	۳۶۵۴	۱۳۹۸
۱۱۸۹۳۸۷۶۳	۱۱۲۳۴۵۴۳	۳۷۵۴۲۷۷۵	۱۳۱۹	۴۲۰۲	۱۳۹۹
۱۳۰۷۹۱۷۲۱	۱۱۸۵۲۹۵۸	۴۳۱۷۴۱۹۱	۱۵۱۷	۴۸۳۲	۱۴۰۰
۱۴۳۲۹۷۱۳۵	۱۲۵۰۵۴۱۴	۴۹۶۵۰۳۲۰	۱۷۴۵	۵۵۵۷	۱۴۰۱
۱۵۶۴۹۰۹۲۱	۱۳۱۹۳۷۸۶	۵۷۰۹۷۸۶۸	۲۰۰۷	۶۳۹۰	۱۴۰۲
۱۷۰۴۱۰۹۷۰	۱۳۹۲۰۰۴۹	۶۵۶۶۲۵۴۸	۲۳۰۸	۷۳۴۹	۱۴۰۳
۱۸۵۰۹۷۲۶۱	۱۴۶۸۶۲۹۰	۷۵۵۱۱۹۳۰	۲۶۵۴	۸۴۵۱	۱۴۰۴
۲۰۰۵۹۱۹۷۱	۱۵۴۹۴۷۱۰	۸۶۸۳۸۷۲۰	۳۰۵۲	۹۷۱۸	۱۴۰۵
۲۱۶۹۳۹۶۰۱	۱۶۳۴۷۶۳۰	۹۹۸۶۴۵۲۸	۳۵۱۰	۱۱۱۷۶	۱۴۰۶
۲۳۴۱۸۷۱۰۰	۱۷۲۴۷۴۹۹	۱۱۴۸۴۴۲۰۷	۴۰۳۶	۱۲۸۵۳	۱۴۰۷
۲۵۲۳۸۴۰۰۳	۱۸۱۹۶۹۰۳	۱۳۲۰۷۰۸۳۸	۴۶۴۲	۱۴۷۸۱	۱۴۰۸
۲۷۱۵۸۲۵۷۰	۱۹۱۹۸۵۶۷	۱۵۱۸۸۱۴۶۴	۵۳۳۸	۱۶۹۹۸	۱۴۰۹
۲۷۱۵۸۲۵۷۰	۲۷۱۵۸۲۵۷۰	۱۱۲۹۰۵۲۰۸۸			مجموع

www.SID.ir

Archive of SID

از طرف دیگر طبق مصوبه هیئت دولت ، نرخ خرید هرکیلو وات ساعت برق حاصل از تولید نیروگاههای بخش خصوصی و انرژیهای نو رقمی بالاتر از ارقام موجود است، بطوریکه در سال ۱۳۸۲ این رقم ۶۵۰ ریال بازای هر کیلو وات ساعت برای ۲۰ ساعت در شبانه روز (ساعات پر باری و متوسط) و ۴۵۰ ریال بازای هر کیلو وات ساعت برای ۴ ساعت در شبانه روز (ساعات کم باری) تخمین زده شده است.[۱۶] از این رو، سناریوی فوق با این فرض که حتی اگر مصوبه دولت اجرا نشود ، تهیه گردید و در صورت اجرای مصوبه فوق بدیهی است که سود مندی نصب این نوع توربین ها بیشتر از محاسبات فوق خواهد بود و از لحاظ اقتصادی کاملا دارای توجیه است.

نتیجه گیری

مطالعات و بررسیهای فنی و اقتصادی و زیست محیطی انجام شده توسط این مقاله علمی – تحقیقی حاکی از این است که در منطقه بروجردو سایر مناطق مشابه با دارا بودن متوسط وزش باد سالیانه ۳/۴۹ متر بر ثانیه و همچنین با توجه به اینکه توربینهای مورد نظر نیاز به مراقبت و تهیه سوخت نداشته و آلودگی محیط زیستی نیز ندارد، احداث توربینهای برق بادی کوچک در این منطقه، مناسب و مقرون به صرفه اقتصادی است. از طرفی به دلیل قرار گرفتن توربین مورد نظر در کنار دریاچه مصنوعی که محل پر رفت آمد و توریست پذیر شهر است، امکان انجام کار فرهنگی برای ترویج بهینه سازی مصرف سوخت و برق نیز در منطقه وجود دارد . در این منطقه، برای مکانهای تجاری و مسکونی دور از شبکه برق، استفاده از این تکنولوژی به منظور تامین قسمتی از برق مورد نیاز، از مزایای زیادی بر خورد دار است. همچنین در صورتی که از این تکنولوژی برای آبکشی از چاههای با عمق متوسط استفاده شود، بعلت راندومان بالاتر آن نسبت به توربین های برق بادی، مزایای اقتصادی آن افزون خواهد شد.

این نکته نیز شایان توجه است که، حمایتهای دولت در خرید تضمینی برق از واحدهای کوچک برق بادی ، و اضافه نمودن هزینه های زیست محیطی ناشی از آلودگی تولید برق توسط سوختهای فسیلی، انگیزه استفاده از این تکنولوژی نوین را افزایش می دهد. نهایتا اینکه به دلیل سادگی طراحی و کاربرد این نوع توربینها امکان آموزشی خوبی برای دانش آموزان ، دانشجویان و صنعتگران و متخصصین این رشته وجود داشته و بدین ترتیب تا حدودی زمینه تولید و اشتغال نیز در منطقه فراهم می شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از آقای مهندس عبدی زاده معاون محترم شهرداری بروجرد که در تهیه و جمع آوری داده های و اطلاعات هواشناسی و همچنین جانمایی توربین بادی نهایت همکاری و مساعدت را با این گروه تحقیقی داشته اند کمال تشکر وقدر دانی را داریم.

منابع

1. Wind Energy Weekly

2. Renewable Energy Concil www.irecusa.org

3. WikiPediA http://en.wikipedia.org/eiki/Wind_power

4. Wind Power Mounthly website, http://wind-power-monthly.com/

5. T Ackerman, An overview of wind energy-status 2002, Renewable and Sustainable Energy Reviews,6(2002) pp67-128

۶. ثقفی-م، شریفی- م، خلجی اسدی – م، «بررسی پتانسیل باد سیاهپوش در استان قزوین برای احداث نیروگاه برق بادی » ، پنجمین همایش ملی انرژی، بهار ۱۳۸۴-تهران.

www.SID.ir

Archive of SID

7. http://www.wasp.dk/,www.emd.dk

8. Renewable Energy Council www.irecusa.org

9. U.S. Department of Energy (www.eren.doe.gov)

10. The Economics of wind energy March2002 (www.awea.org)

۱۱. ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۳

14. American Wind Energy Association (www.awea.org/smallwind.html)

۱۵. طاهری- ش ، « ارزیابی اقتصادی طرحها»،انتشارات کویر، سال۱۳۷۴ ، صفحه۶۴.

۱۶. سخنرانی علی محمد احمدی، نماینده مردم لرستان در مجلس شورای اسلامی (دوره ششم) و رئیس پیشین مرکز توسعه انرژیهای نو –سازمان انرژی اتمی ایران-۱۳۸۱

www.SID.ir