

## امکان سنجی و ارزیابی اقتصادی انرژی باد در شمال استان خوزستان – مطالعه موردی شهر شوشتر

مجتبی بیگری<sup>۱</sup>، احسان اله عصاره<sup>۲</sup>، مجتبی ندائی<sup>۳</sup>، ایمان پول تنگری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۲/۱۱/۵

### چکیده:

در این مقاله، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه شوشتر در استان خوزستان در ۲۰ ماه متوالی با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول برآورد شده است. ضمناً خطای بدست آمده از مدل ویبول با ۳ مدل دیگر مورد مقایسه قرار گرفت که ثابت شد در شهر شوشتر تابع توزیع ویبول بهترین مدل برای مدل سازی داده های بادی می باشد. نتایج اولیه حاصل از تجزیه و تحلیل داده های باد حاکی از آن است که منطقه مورد مطالعه پتانسیل خوبی برای استفاده از توربین های بادی ندارد. نهایتاً امکان سنجی اقتصادی نصب توربین های بادی کوچک در شوشتر توسط نرم افزار RETScreen صورت گرفت و مشخص شد که محل مورد مطالعه از لحاظ اقتصادی حتی برای نصب توربین های بادی کوچک انتخاب شده نیز مناسب نیست. در نهایت، پیشنهاد شد که در مطالعه بعدی در شهر شوشتر امکان سنجی استفاده از سایر سیستم های انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی و همچنین استفاده از سیستم های ترکیبی Hybrid (فتوولتائیک-بادی و...) بررسی شود.

### کلمات کلیدی:

انرژی باد، شوشتر، خوزستان، تابع ویبول، RETScreen

ehsanolah.assareh@yahoo.com  
mojtabacontact@aol.com

۱) استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان  
۲) دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان (نویسنده مسئول)  
۳) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه محیط زیست و انرژی  
۴) دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

## مقدمه

استفاده از انرژی باد دارای سابقه طولانی است. اولین ماشین های بادی در قرن هفتم قبل از میلاد در نقاط مرتفع افغانستان برای خرد کردن غلات به کار می رفتند. اولین آثار ماشین های بادی در ایران، تبت و چین در حدود ۱۰۰۰ سال قبل یافت شده است. ماشین های بادی از ایران و خاورمیانه به کشورهای اطراف دریای مدیترانه و اروپای مرکزی راه یافت. اولین ماشین های بادی در انگلستان در حدود سال ۱۱۵۰، فرانسه ۱۱۸۰، فنلاند ۱۱۹۰، آلمان ۱۲۲۲ و در دانمارک در ۱۲۵۹ میلادی پدیدار شدند. این توسعه سریع در اثر جنگ های صلیبی بود که موجب انتقال دانش ماشین های بادی از ایران به اروپا شد. [۴]

در اروپا، کارایی ماشین های بادی در قرن دوازده تا نوزده میلادی به سرعت توسعه یافت و در اواخر قرن نوزدهم، ماشین های بادی اروپایی دارای محور چرخنده به قطر ۲۵ متر و بدنه ای به قطر ۳۰ متر شد. در هلند ۹۰ درصد از انرژی مورد نیاز صنایع از باد بود. انقلاب صنعتی موجب کاهش ماشین های بادی شد. با این حال در سال ۱۹۰۴، باد ۱۱ درصد از انرژی صنایع هلند را تأمین می نمود و در آلمان ۱۸۰۰۰ واحد انرژی باد نصب شده بود. همزمان با کاهش ماشین های بادی در اروپا، دانش این ماشین ها به امریکای شمالی منتقل شد. ماشین های بادی کوچک برای پمپاژ آب برای احشام عمومیت زیادی یافت. این ماشین ها به طور کامل خودتنظیم بودند و نیازی به مراقبت نداشتند. صفحه چرخان آنها در جهتی که بیشترین سرعت وزش باد وجود دارد، قرار می گرفت. [۲۱]

در مناطقی که دارای باد مداوم و با سرعت بالای ۸ گره (۴ متر بر ثانیه) هستند می توان از توربین های بادی برای مصارف گوناگون استفاده نمود که یکی از این مصارف، پمپاژ آب کشاورزی است. پمپاژ آب از چاه ها توسط انرژی باد هم به روش مستقیم با استفاده از پمپاژ مکانیکی و هم به روش غیر مستقیم با تولید انرژی برق بادی ممکن است. پمپاژ مکانیکی آب ارزان است و در سرعت های پایین باد انجام می شود و هزینه نگهداری و تعمیرات چندان زیادی ندارد. اما تولید انرژی برق بادی هم هزینه های زیادی دارد و هم به باد های با سرعت بالاتر نیاز دارد، همچنین نگهداری و تعمیر توربین و ژنراتور به هزینه زیاد و نیروی متخصص نیاز دارد. با این حال، انرژی الکتریکی تولید شده با توربین های بادی دارای مصارف گوناگون است و قابلیت ذخیره سازی هم دارد. [۵]

پیشرفت های اخیر در توسعه انرژی باد در کشور را می توان با اشاره ای به تهیه نقشه صفر اطلس بادی کشور بیان نمود. با یک مطالعه نرم افزاری توسط ECOWIND و با استفاده از داده های آماری باد، منحنی عملکرد توربین باد و پارامترهای اقتصادی تخمین مناسبی برای قیمت تمام شده ی برق پیدا شد حاکی از اقتصادی بودن برق تولیدی در نیروگاه بادی منجیل و بینالود است. همچنین پتانسیل انرژی باد در منطقه منجیل توسط مصطفایی پور و ابرقویی [۱۵] بررسی شد که این منطقه به عنوان یکی از مناطق بادخیز جهان معرفی شده است. اخیرا یک مطالعه امکان سنجی نصب توربین باد

توسط مصطفایی پور [۱۴] برای چند شهر استان یزد انجام شده است. وی بر اساس داده های 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 بر اساس داده های ۱۱ ساله باد در تهران انجام دادند و مطالعه آنها نشان داد که محل مورد بررسی پتانسیل خوبی برای استفاده از انرژی باد ندارد.

در بررسی وضعیت باد در ایستگاه های سینوپتیک کشور طی سال های ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۵ میلادی مشخص شد که در کل کشور، ایستگاه زابل (منطقه سیستان) بهترین شرایط را برای احداث مزارع بادی دارد. [2] گندمکار [۳] در پژوهشی به منظور ارزیابی وضعیت انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان به این نتیجه رسید که پس از ایستگاه زابل، ایستگاه ساحلی چابهار بهترین شرایط را برای استفاده از انرژی باد دارد.

ندایی [۱۸] در یک تحقیق با بکار گیری مدل آماری ویبول نشان داد که پتانسیل باد در شهر آبادان در جنوب استان خوزستان در ارتفاعات بالا بسیار قابل توجه است. امکان سنجی چند توربین مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که انرژی خروجی یک نوع توربین بادی (مدل Enercon E101) با ظرفیت ۳ مگاوات در ارتفاعات بالا به مقدار بیش از ۹۵۰۰ مگاوات ساعت در سال خواهد رسید. ضریب ظرفیت این توربین بادی تقریباً ۳۷٪ محاسبه شده است که این نرخ نشان می دهد هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ انرژی خروجی، این توربین گزینه مناسبی برای نصب در آبادان می باشد.

با مرور کارهای پیشین در زمینه پتانسیل سنجی انرژی باد، در بعضی موارد به این نتیجه رسیده شده که در منطقه مورد مطالعه سرعت باد دارای پتانسیل ضعیف می باشد و امکان گسترش انرژی باد در مقیاس بزرگ و حتی متوسط وجود ندارد (مشابه نتایج بدست آمده در تهران [۱۲] و یا در در شهر بایک کرمان [۱۶]). با این وجود، مطالعه ای به صورت دقیق تر در این مناطق (تهران، شهر بایک کرمان و ...) انجام نشد که آیا امکان گسترش انرژی باد در مقیاس کوچک تر از دیدگاه اقتصادی فراهم است یا خیر. در این مقاله، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه شوشتر در شمال استان خوزستان در ۲۰ ماه متوالی با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. پتانسیل انرژی باد در این ایستگاه با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول برآورد شده است. ضمناً خطای بدست آمده از مدل ویبول با ۳ نوع مدل دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. پس از اطمینان از این موضوع که امکان نصب و بهره برداری از توربین های با مقیاس متوسط و بزرگ وجود ندارد، نهایتاً امکان سنجی اقتصادی نصب توربین های بادی کوچک تر در شوشتر توسط نرم افزار RETScreen انجام شد تا مشخص شود که آیا محل مورد مطالعه از لحاظ اقتصادی وضعیت خوبی برای نصب این توربین های بادی دارد یا خیر.

## تحلیل آماری داده های بادی

## تابع توزیع ویبول

برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک محل مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از آن از روش های آماری مختلفی استفاده می شود که بعضی از آنها عبارتند از مدل Weibull، مدل Rayleigh، مدل Log-normal، مدل Logistic و ... . تحقیقات [۸، ۱۱، ۱۸، ۱۹، ۲۲، ۲۳] نشان داده است که در اکثر مواقع مدل آماری ویبول مطابقت بسیار خوبی با توزیع سرعت باد دارد. اگر سری زمانی داده های اندازه گیری شده در یک ارتفاع خاص موجود، باشد می توان تابع توزیع احتمال ویبول سرعت را به صورت زیر نوشت [۱۲]:

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

$(k > 0, v > 0, c > 1)$

که در فرمول بالا  $U$  سرعت باد،  $c$  ضریب مقیاس ویبول و  $k$  ضریب شکل ویبول می باشد. ضرایب ویبول  $c$  و  $k$  نشان دهنده پتانسیل باد منطقه مورد مطالعه می باشند. اساساً ضریب  $c$  اشاره بر بادخیز بودن ناحیه مورد مطالعه دارد در حالی که ضریب  $k$  مشخص می کند که چقدر توزیع باد بر روی یک سرعت خاص معطوف شده است. (اگر سرعت های باد اتفاق افتاده در یک ناحیه به یک مقدار مشخص از سرعت باد معطوف شوند، در آن صورت، تابع توزیع باد دارای یک ضریب شکل  $k$  بالایی خواهد بود).

روش های متفاوتی برای به دست آوردن ضرایب ویبول وجود دارد که از جمله آنها می توان به روش maximum likelihood، روش graphical، روش WASP (moments) و ... اشاره کرد. در این مطالعه، از روش maximum likelihood برای یافتن ضرایب ویبول  $c$  و  $k$  استفاده شده است.

## چگالی توان باد

چگالی توان باد (توان باد بر واحد سطح) به چگالی 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  $A$  توسط توربین باد (قطر رتور) وابسته است. چگالی توان متوسط به صورت زیر تعریف می شود [۱۸]:

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

## شدت آشفستگی

آشفستگی در باد به دلیل هدر رفتن انرژی جنبشی باد و تبدیل آن به انرژی گرمایی بر اثر تشکیل گردابه های کوچک رخ می دهد. آشفستگی باد ممکن است در زمان طولانی ثابت باشد اما در بازه های زمانی کوچک بسیار متغیر است. معمولاً آشفستگی جریان به دلیل زبری سطح (درختان، ساختمان ها و ...) و ارتفاع بالای سطح به وجود می آید. وجود آشفستگی در جریان باد نه تنها از توان آن می کاهد، بلکه باعث ایجاد پدیده خستگی در توربین بادی می شود [۱۸]. یکی از معیار های اندازه گیری آشفستگی، شدت آشفستگی است که به صورت انحراف معیار استاندارد سرعت باد به سرعت متوسط تعریف می شود:

$$TI = \frac{\sigma}{U} \quad (3)$$

که در رابطه (۸)، انحراف معیار استاندارد و سرعت متوسط روی یک بازه زمانی معمولاً ۱۰ دقیقه محاسبه می شود [۱۷].

## نتایج

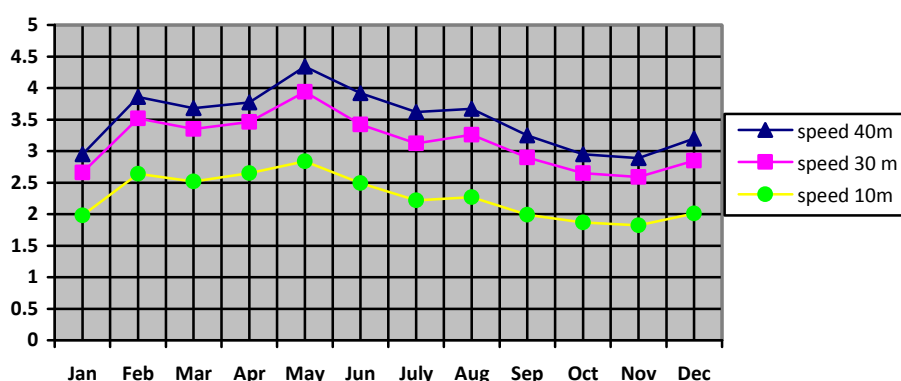
ایستگاه شوشتر با مشخصات جغرافیایی  $32^{\circ}3'N$   $48^{\circ}51'E$  و با ارتفاع تقریباً ۱۵۰ متر از سطح آب های آزاد در جنوب غربی کشور و در بخش شمال استان خوزستان واقع شده و فاصله آن تا تهران ۸۳۱ کیلومتر می باشد [۱]. داده های سرعت باد به مدت ۲۰ ماه از نوامبر سال ۲۰۰۷ تا اگوست ۲۰۰۹ با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه استخراج شده و تحلیل روی آن صورت گرفته است. متوسط دمای ایستگاه  $25/6^{\circ}C$  و متوسط رطوبت هوا  $40/66\%$  برآورد شده است. اندازه گیری سرعت باد در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری انجام شده در حالی که اندازه گیری جهت باد در دو ارتفاع ۳۰ و ۳۷٫۵ متر صورت گرفته است. در جدول (۱) پارامترهای مربوط به سرعت و توان باد که از تحلیل آماری در ۳ ارتفاع یاد شده به دست آمده، آورده شده است.

جدول (۱) محاسبه پارامترهای مربوط به سرعت و توان باد

	۱۰ m	۳۰ m	۴۰ m
Mean wind speed (m/s)	۲/۲۹	۳/۱۷	۳/۵۴
Max. ۱۰-min average wind speed (m/s)	۳/۳۶	۴/۲۶	۴/۵۸
Gust wind speed (m/s)	۲۴/۶ (۹/۹/۲۰۰۸ ۱۸:۵۵)	۳۱/۸ (۹/۹/۲۰۰۸ ۱۸:۵۵)	۳۳/۱ (۹/۹/۲۰۰۸ ۱۸:۵۵)
Weibull distribution coefficients	k=۱/۵۵ c=۲/۵۶ m/s	k=۱/۴۸ c=۳/۵۰ m/s	k=۱/۵۵ c=۳/۹۵ m/s
Wind power density (W/m <sup>2</sup> )	۲۱/۷۲	۵۰/۹۱	۶۸/۴۵

پتانسیل انرژی باد برای نصب توربین های بادی در سرعت متوسط کمتر از  $4 \text{ m/s}$  ضعیف،  $4-5/5 \text{ m/s}$  مرزی،  $5/5-6/7 \text{ m/s}$  خوب تا خیلی خوب و برای سرعت های بالاتر از  $6/7 \text{ m/s}$  عالی ارزیابی می شود [۱۴]. در محل مورد مطالعه مشخص است که سرعت باد در ۳ ارتفاع ضعیف می باشد. همچنین بر اساس طبقه بندی کلاس چگالی توان باد [20]، معلوم می شود که پتانسیل انرژی باد نیز در شوشتر برای نصب توربین های بادی ضعیف می باشد. البته این بدان معنا نیست که امکان گسترش انرژی باد در شوشتر وجود ندارد. برای ارزیابی دقیق تر لازم است که امکان سنجی اقتصادی و فنی توربین های بادی کوچک برای استفاده در منازل مورد بررسی قرار گیرد که در بخش های بعدی به آن خواهیم پرداخت. در ردیف سوم جدول، سرعت تندباد<sup>۱</sup> آورده شده است که برابر بیشترین سرعتی است که در بازه زمانی ۲۰ ماهه ثبت شده است. به عنوان مثال، بیشترین سرعت تند باد که از نوامبر سال ۲۰۰۷ تا آگوست ۲۰۰۹ در ارتفاع ۴۰ متر در شهر شوشتر اتفاق افتاده،  $33/1 \text{ m/s}$  و زمان اتفاق آن ۱۸:۵۵ ۹/۹/۲۰۰۸ می باشد.

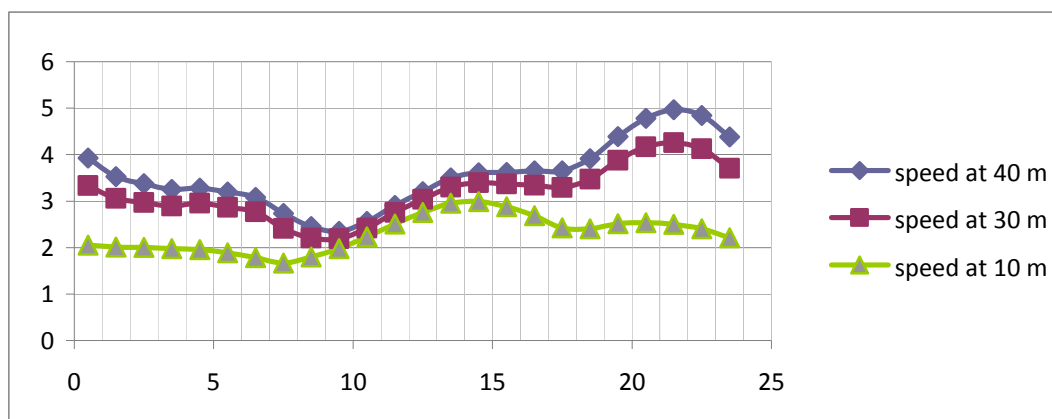
در شکل (۱) توزیع ماهانه سرعت متوسط باد در ۳ ارتفاع مختلف نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱) پیداست، سرعت ماهانه بین  $1/8 \text{ m/s}$  و  $4/3 \text{ m/s}$  متغیر است. بیشترین سرعت باد مربوط به ماه می می باشد. کمترین سرعت باد نیز در ماه های ژانویه، اکتبر و نوامبر اتفاق افتاده است. تنها ماهی از سال که دارای سرعت باد بیشتر از  $4 \text{ m/s}$  می باشد، ماه می در ارتفاع ۴۰ متر می باشد. با توجه به شکل (۱)، مشخص است که متوسط سرعت باد در ماه های فوریه، مارچ، آپریل، می، ژوئن، جولای و آگوست دارای مقداری بیش از ۳٫۵ متر بر ثانیه می باشد. با توجه به اینکه سرعت شروع به کار<sup>۲</sup> در بسیاری از توربین های بادی کوچک معادل ۳ الی ۳٫۵ متر بر ثانیه می باشد، به این نتیجه می رسیم که در این ماه ها، امکان تولید برق بادی در مقیاس کوچک وجود دارد. اما از دیدگاه اقتصادی نیز این طرح باید مورد بررسی قرار گیرد تا از امکان پذیر بودن آن در شرایط موجود اطمینان حاصل کرد.



شکل (۱) متوسط ماهانه سرعت باد در ایستگاه شوشتر

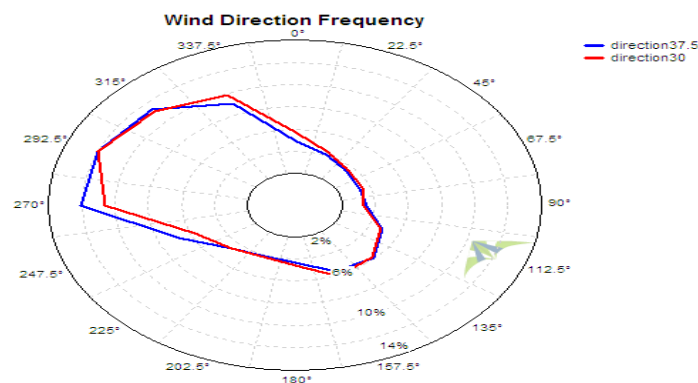
- 1) Gust wind speed
- 2) Cut-in-speed

همچنین در نمودار شکل (۲) متوسط روزانه سرعت باد برای ۳ ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در شوشتر ترسیم شده است. این نمودار از این جهت سودمند است که مقادیر بالای سرعت باد در ساعات مختلف شبانه روز را گزارش می‌دهد. همانطور که از این نمودار مشخص است، بهترین مقادیر سرعت باد در ارتفاع های ۳۰ و ۴۰ متر در ساعات ۶ بعد از ظهر الی ۱۲ شب رخ داده است در حالی که سرعت های خوب در ارتفاع ۱۰ متر در ساعات ۱۲ ظهر الی ۵ بعد از ظهر به وقوع پیوسته است.



شکل ۲) متوسط روزانه سرعت باد در ایستگاه شوشتر

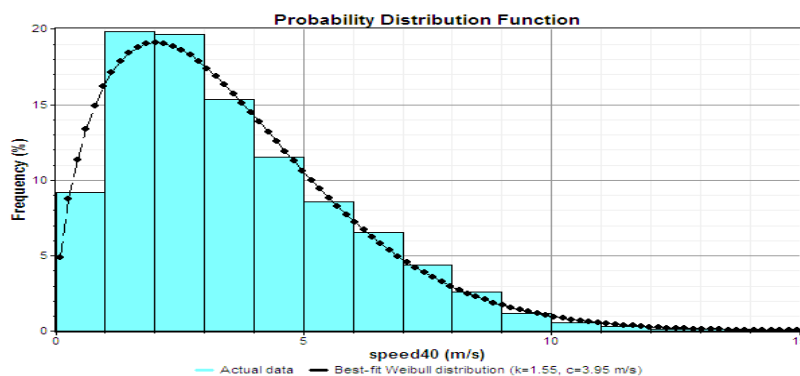
گلباد<sup>۱</sup> نموداری است که توزیع جهت باد را نشان می‌دهد. در شکل (۳) گلباد بر اساس زمان (فرکانس) وزش در ارتفاع های ۳۰ و ۳۷,۵ متری ترسیم شده است. همانطور که از این شکل پیداست، بیشترین فرکانس وزش باد از طرف شمال غرب می‌باشد.



شکل ۳) گلباد بر اساس فرکانس وزش باد در ۳۰ و ۳۷,۵ متری

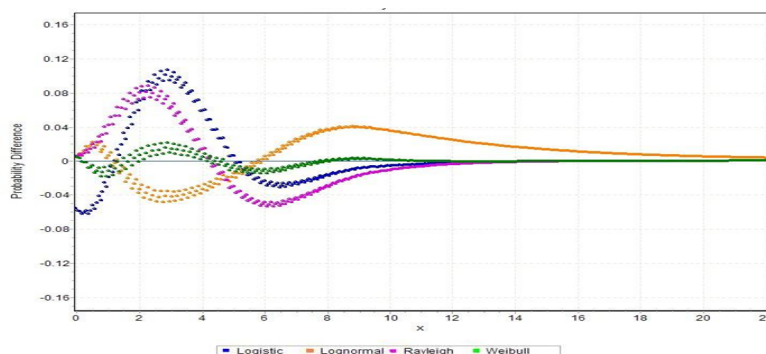
1) wind rose

شکل (۴) توزیع ویبول سرعت در ایستگاه شوشتر در ارتفاع ۴۰ متر را نشان می دهد. ضرایب شکل و مقیاس توزیع ویبول برای ۳ ارتفاع در جدول (۱) آورده شده است. ترسیم ویبول با سرعت اندازه گیری که به صورت نرمالیزه شده توسط نمودار میله ای نشان داده است، سازگاری خوبی دارد.



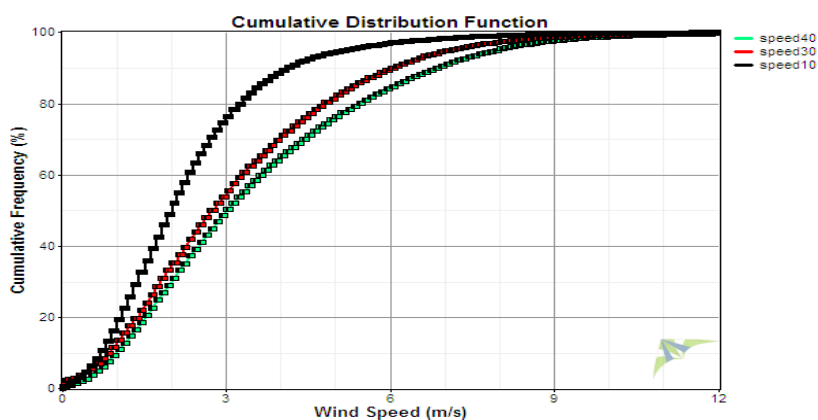
شکل ۴) نمودار توزیع ویبول سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متر در شوشتر

در شکل (۵) نمودار مربوط به خطای ۴ نوع تابع توزیع متداول (Log-normal, Rayleigh, Weibull) و Logistic در ارتفاع ۴۰ متر ترسیم شده است. این نمودار که probability difference graph نامیده می شود به وضوح نشان دهنده مقدار اختلاف بین مقادیر بدست آمده با استفاده از تابع توزیع احتمال مورد استفاده و مقادیر واقعی سرعت باد می باشد و یا به عبارتی، به ما می گوید که چه تابعی سازگاری بهتری روی داده های سرعت باد دارد. در این نمودار، محور X نشان دهنده سرعت باد می باشد. همانطور که مشاهده می شود، از لحاظ سازگاری داده های باد با مقادیر بدست آمده از تابع توزیع احتمال مورد نظر، مدل ویبول کمترین خطا را نسبت به سه مدل دیگر دارد. در رتبه های بعدی، مدل های Log-normal, Rayleigh و در نهایت، مدل Logistic قرار دارند. پس می توان نتیجه گرفت که در شهر شوشتر بهترین تابع توزیع برای مدل سازی آماری داده های باد، مدل ویبول است.



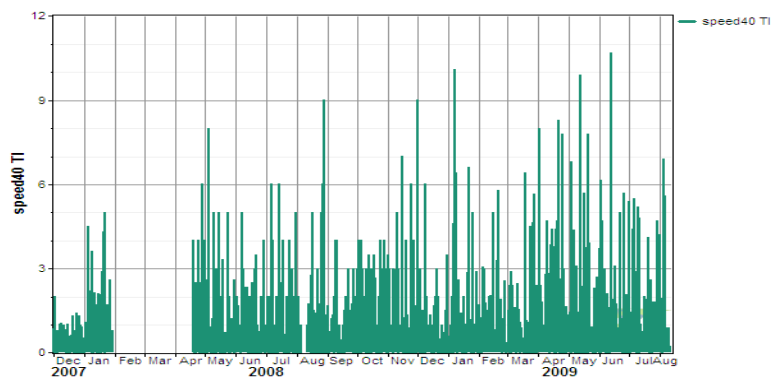
شکل ۵) مقایسه سازگاری ۴ تابع توزیع احتمال Weibull (Log-normal, Rayleigh, Logistic) با داده های سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متر در شوشتر

در شکل (۶) تابع توزیع انباشتگی سرعت برای ۳ ارتفاع در شوشتر ترسیم شده است. این تابع کسر زمانی را نشان می‌دهد که سرعت باد کوچکتر، بزرگتر یا مساوی یک سرعت داده شده است. به عنوان مثال، از این نمودار مشخص می‌شود که برای ارتفاع‌های ۱۰ متر، ۳۰ متر و ۴۰ متر به ترتیب حدود ۱۰٪، ۳۰٪ و ۳۶٪ سرعت‌های باد بیشتر از مقدار ۴ m/s می‌باشند. مقدار ۴ متر بر ثانیه از این جهت مهم است که سرعت شروع به کار برای بسیاری از توربین‌ها محسوب می‌شود.



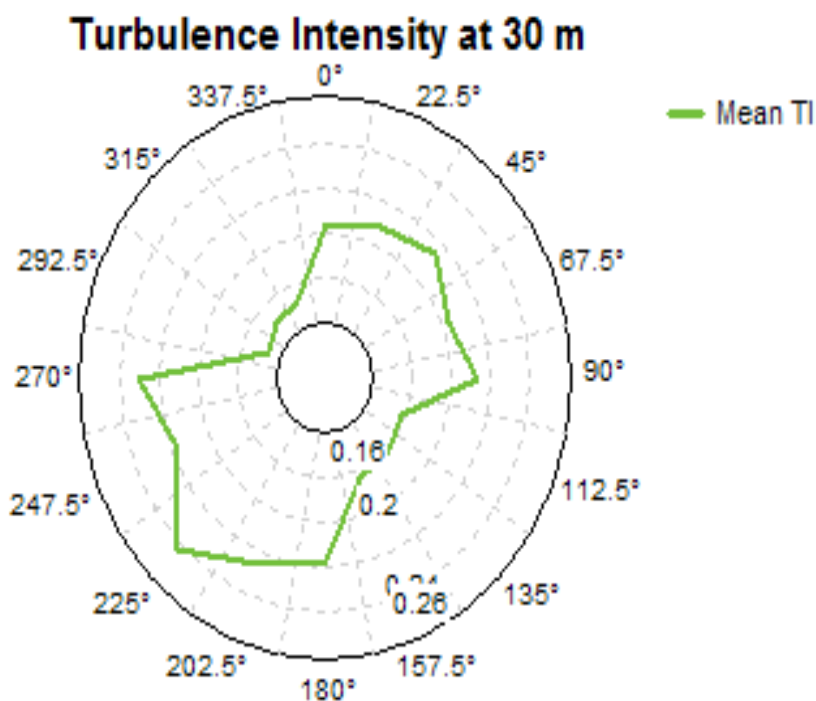
شکل ۶) تابع توزیع انباشتگی سرعت در ارتفاع‌های مختلف

شدت آشفستگی بر حسب زمان در شکل (۷) و در ارتفاع ۴۰ متر نشان داده شده است. بیشترین مقدار آشفستگی در ماه ژوئن و با مقدار ۱۰٫۸ رخ داده است. همانطور که مشخص است، در اکثر ماه‌های سال شدت آشفستگی دارای مقدار نسبتاً زیادی می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که شهر شوشتر نه تنها دارای پتانسیل پایین باد است، بلکه دارای شدت آشفستگی بالای باد هم می‌باشد. شدت آشفستگی بالا می‌تواند باعث خسارت و ضربه دیدن و خرابی پره‌ها و سایر اجزای توربین شود.

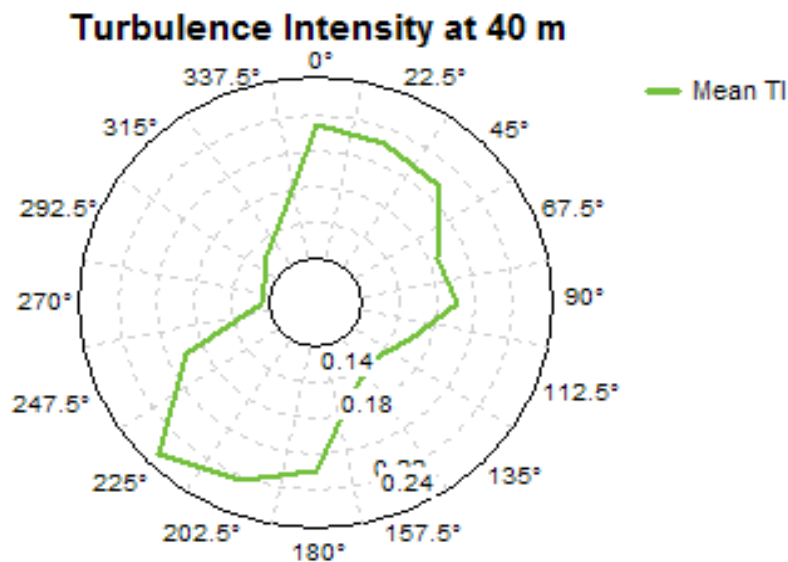


شکل ۷) شدت آشفستگی برای ارتفاع ۴۰ متر

برای اینکه این مشکل تا حدی حل شود، می توان با داشتن اطلاعات سمت و سرعت باد در یک ارتفاع مورد نظر و همچنین میزان انحراف معیار سرعت باد در هر ۱۰ دقیقه در همان ارتفاع مورد نظر، نمودار مربوط به متوسط جهت آشفتگی را در ارتفاع مورد نظر ترسیم کرد. (همانطور که از قبل می دانیم با تقسیم انحراف معیار در بازه ۱۰ دقیقه‌ای بر سرعت باد در همان بازه، توربولانس (شدت آشفتگی باد) به دست می آید). شکل (۸) گلباد مربوط به جهت شدت آشفتگی را در ارتفاع ۳۰ متر نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است جهت هایی که دارای بیشترین شدت آشفتگی باد است، شمال شرقی و جنوب غربی می باشد. بیشترین مقدار توربولانس در جهت جنوب غربی در بخش زاویه‌ای  $225^\circ$  با مقدار تقریباً  $0.25$  رخ داده است. همچنین برای ارتفاع ۴۰ متر نیز چنین نموداری در شکل (۹) رسم شده است با این تفاوت که داده های سمت باد از ارتفاع ۳۷.۵ متر مورد استفاده قرار گرفته است (با توجه به اینکه سنسور جهت باد در ۴۰ متری وجود ندارد). شکل (۹) نشان می‌دهد که همانند گلباد قبلی در ارتفاع ۳۰ متر جهت های شمال شرقی و جنوب غربی دارای توربولانس بیشتری می باشد. در ارتفاع ۴۰ متر بیشترین مقدار توربولانس در جهت جنوب غربی با مقدار تقریباً  $0.23$  رخ داده است.



شکل ۸) متوسط جهت شدت آشفتگی در ارتفاع ۳۰ متر



شکل ۹) متوسط جهت شدت آشفتگی در ارتفاع ۴۰ متر

### امکان سنجی اقتصادی استفاده از توربین های بادی کوچک با استفاده از نرم افزار RETScreen

نرم افزار RETScreen نرم افزار جامعی است که برای شبیه سازی و مدل سازی سیستم های انرژی های تجدید پذیر به کار می رود. این نرم افزار با داشتن اطلاعاتی همچون مقدار منبع انرژی (مثلا داشتن اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و...) موجود در ناحیه مورد مطالعه، نوع سیستم انرژی تجدیدپذیر بکار رفته در منطقه (نوع توربین، نوع پنل ها و...)، هزینه های سرمایه گذاری، هزینه های عملیاتی و نگهداری سیستم ها، پارامتر های اقتصادی همچون نرخ تورم، نرخ کاهش ارزش پول و ... می تواند هزینه الکتریسته حاصل از انرژی تجدید پذیر، مقدار الکتریسته و انرژی خروجی، مقدار کاهش گازهای گلخانه ای، سایر محاسبات اقتصادی و... را تخمین زده و در نهایت، تصمیم گیری در مورد احداث نیروگاه های بادی، خورشیدی و ... را راحت تر کند [۱۳].

در این بخش از مقاله، امکان سنجی اقتصادی نصب ۳ توربین بادی کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات هر کدام از توربین های بادی به همراه هزینه ها در جدول (۳) نشان داده شده است. هر ۳ توربین برای اتصال به صورت منفصل از شبکه (off-grid) در نظر گرفته شده اند. در این مقاله، فرض شده که توربین های ۵ و ۱۰ کیلوواتی برای منازل مسکونی معمولی با تعداد ۴ الی ۷ نفر مناسب می باشد در حالی که توربین ۵۰ کیلوواتی برای مجتمع های مسکونی

با تعداد ۱۰ الی ۱۵ نفر مناسب می باشد. برای هر ۳ توربین بادی فرض شده [۱۳] که نرخ تورم ۱۵٪، نرخ کاهش ارزش پول<sup>۱</sup> ۱۰/۸٪، نرخ افزایش قیمت سوخت<sup>۲</sup> ۱۵٪ و طول عمر پروژه ۲۰ سال باشد.

### هزینه

تحقیقات نشان می دهد که توربین های بادی کوچک مورد استفاده در مناطق مسکونی با ظرفیت کمتر از ۱۰۰ کیلووات به صورت تقریبی به ازای هر کیلووات دارای هزینه ای بین ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ دلار می باشند. آمار نشان می دهد که یک توربین بادی ۱۰ کیلووات (که مناسب برای استفاده یک خانه ی بزرگ مسکونی می باشد) بسته به نوع برج توربین، ارتفاع و ... دارای هزینه ای بین \$۵۰,۰۰۰ تا \$۸۰,۰۰۰ می باشد. هزینه ی توربین ها، هزینه های اولیه و نیز هزینه های عملیاتی و نگهداری در جدول (۲) برای ۳ توربین مورد استفاده آورده شده است. لازم به ذکر است که هزینه های اولیه شامل هزینه توربین، ساخت و ساز راه ها، زیربنای الکتریکی، مدیریت پروژه، نصب توربین ها، حق بیمه، هزینه دسترسی راه ها به توربین ها، هزینه اتصالات شبکه و خطوط انتقال نیرو و... هستند در حالی که هزینه های عملیاتی و نگهداری شامل هزینه سالانه ای است که جهت تعمیرات و نگهداری توربین ها صرف می شود [۲۴].

جدول (۲) مشخصات توربین های بادی و هزینه های برآورد شده

Turbine	Manufacturer	Rated Power (kW)	Hub-Height (m)	Rotor Diameter (m)	Turbine cost (\$)	Initial Cost (\$)	Operation & Maintenance Cost (\$)	References
S-343	Endurance	5	36.6	6.4	30,000	42,000	525	[21]
Bergey BWC Excel	Bergey	10	30.5	7	50,000	70,000	875	[22]
AOC 15/50	Atlantic Orient	50	30	15	250,000	350,000	4,375	[23]

### نتایج

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نرم افزار RETScreen در جدول (۳) برای ۳ توربین بادی کوچک مشاهده می شود. پارامترهای خروجی شامل هزینه الکتریسیته حاصل از توربین (Energy production cost (\$))، مقدار کاهش سالانه CO<sub>2</sub> (Annual CO<sub>2</sub> reduction (tone))، مقدار ضریب ظرفیتی محاسبه شده برای هر توربین

1) discount rate

2) fuel cost escalation rate

(Capacity factor)، ارزش خالص فعلی (Net present value)، زمان بازگشت سرمایه (Payback period)، مقدار الکتریسیته تولیدی (Exported electricity) و نسبت فایده به هزینه (Benefit-cost ratio) می باشند.

جدول ۳) نتایج استخراج شده از نرم افزار RETScreen

Turbine	Energy production cost (\$/kWh)	Annual CO <sub>2</sub> reduction (tone)	Capacity factor (%)	Net present value (\$)	Payback period (years)	Exported electricity (MWh)	Benefit-Cost (B-C) ratio
S-۳۴۳	۱/۴۲۵	۲/۴	۸/۶	- ۵۷,۱۴۶	> project life	۴	-۰/۳۶
Bergey BWC Excel	۱/۸۷۸	۳	۵/۴	- ۹۵,۲۱۵	> project life	۵	-۰/۳۶
AOC 15/50	۱/۶۰۶	۱۷/۱	۶/۳	- ۴۶۸,۸۶۷	> project life	۲۷	-۰/۳۴

#### الکتریسیته تولیدی (Exported Electricity)

مقدار الکتریسیته تولیدی که به واقع همان مقدار انرژی بادی می باشد که به الکتریسیته تبدیل شده، برای ۳ توربین بادی بر حسب مگاوات در جدول فوق محاسبه شده است. همانطور که مشخص است، توربین AOC ۱۵/۵۰ با ظرفیت ۵۰ کیلووات دارای بیشترین مقدار انرژی خروجی می باشد (۲۷ مگاوات ساعت در سال).

#### ضریب ظرفیتی (Capacity factor)

ضریب ظرفیتی یک توربین برابر است با نسبت انرژی خروجی توربین به مقدار ظرفیت همان توربین. در واقع، ضریب ظرفیتی بیانی دیگر از انرژی خروجی توربین و نشان دهنده این است که آیا توربین بادی مورد نظر دارای انرژی خروجی مطلوب است یا خیر. به عنوان مثال، مقدار ضریب ظرفیتی برای توربین هایی که بالای ۲۰٪ هستند، بدون آنکه مقدار انرژی خروجی توربین را بدانیم، می توانیم مطمئن شویم که توربین مورد نظر، خروجی بهینه ای دارد. همچنین با ضریب ظرفیتی بالاتر، مقدار هزینه نهایی الکتریسیته بادی نیز کاهش خواهد یافت. تحقیقات نشان داده که ضریب ظرفیتی مناسب برای نیروگاه های بادی بین ۲۰ الی ۴۰ درصد می باشد [۱۸]. از جدول (۳) مشخص می شود که ضرایب ظرفیتی محاسبه شده برای ۳ توربین بادی مورد نظر بین ۵,۴٪ الی ۸,۶٪ است. این مقادیر بسیار پایین می باشد و نشان دهنده این است که توربین های بادی مورد نظر در شهر شوشتر دارای مقدار انرژی تولیدی پایینی بوده و ضمناً از لحاظ اقتصادی نیز نصب آنها به صرفه نیست. البته این نکته حائز اهمیت است که در یک مطالعه امکان سنجی، علاوه بر ضریب ظرفیتی توربین ها، سایر پارامتر های اقتصادی نیز باید مورد بررسی قرار گیرند تا بتوان به یک نتیجه گیری کامل رسید.

### هزینه الکتریسیته حاصل از توربین (Energy production cost)

هزینه نهایی الکتریسیته حاصل از توربین های بادی در نظر گرفته شده در جدول ۳ قابل مشاهده می باشد. محدوده قیمت تمام شده حاصل از برق تولیدی این توربین ها بین ۱/۴۲۵ الی ۱/۶۰۶ دلار بر کیلووات ساعت متغیر می باشد. در حال حاضر، صاحبان توربین ها و پارک های بادی در مناطق منجیل و بینالود در شمال ایران در حال فروش برق بادی با نرخ حدود ۰٫۱۳ دلار بر کیلووات ساعت می باشند [۱۷]. بنابراین، نتایج نشان می دهد که هزینه های بدست آمده برای منطقه شوشتر بالاتر از هزینه فروش برق بادی می باشد.

ضمناً همانطور که قبلاً ذکر شده بود، مقدار ضریب ظرفیتی توربین ها بر روی هزینه نهایی الکتریسیته حاصل از توربین های بادی تاثیر قابل توجهی دارد. در واقع، توربینی که دارای ضریب ظرفیتی پایینی است، دارای هزینه الکتریسیته بالایی می باشد. نتایج بدست آمده از جدول (۳) به وضوح صحت این موضوع را مشخص می کند. همچنین همانطور که مشخص است، توربین بادی S-343 دارای بیشترین ضریب ظرفیتی بوده (۸/۶٪) و در عین حال، کمترین مقدار هزینه الکتریسیته را دارد (۱/۴۲۵ دلار).

### مقدار کاهش سالانه CO<sub>2</sub> (Annual CO<sub>2</sub> reduction)

یکی از امکانات خوب نرم افزار RETScreen، محاسبه مقدار کاهش سالانه CO<sub>2</sub> برای یک پروژه امکان سنجی سیستم های انرژی های تجدید پذیر می باشد. این نرم افزار برای محاسبه مقدار کاهش سالانه ی CO<sub>2</sub>، مقدار انرژی حاصل از توربین بادی مورد نظر را معادل انرژی حاصل از سیستم هایی قرار داده که آلاینده محیط زیست و تولید کننده CO<sub>2</sub> می باشند و در نتیجه، می توان تخمین زد که در صورت جایگزین کردن توربین بادی به جای سیستم قبلی (که آلاینده محیط زیست است) چه مقدار CO<sub>2</sub> کاهش خواهد یافت. همانطور که از جدول ۳ مشخص است، بیشترین کاهش CO<sub>2</sub> مربوط به توربین ۱۵/۵۰ AOC است که معادل ۱۷٫۱ تن CO<sub>2</sub> می باشد.

### نسبت فایده به هزینه (Benefit-cost ratio)

نسبت فایده به هزینه معادل نسبت ارزش فعلی سالانه تمام درآمد ها و منافع حاصل از پروژه به کل هزینه پروژه انرژی بادی است. مقادیر بالاتر از عدد ۱ نشان دهنده این است که پروژه مورد نظر به لحاظ اقتصادی سود آور است [۱۰]. بنا به جدول (۳)، نسبت مذکور برای ۳ توربین مورد نظر، منفی محاسبه شده که این امر نشان دهنده آن است که پروژه از لحاظ اقتصادی می تواند زیان آور باشد.

### ارزش خالص فعلی (Net present value)

ارزش خالص فعلی (NPV) در علم اقتصاد مهندسی، یکی از روش های استاندارد ارزیابی طرح های اقتصادی است. این

شاخص نمایانگر وجوه نقد ورودی تنزیل شده منهای وجوه خروجی نقد تنزیل شده مربوط به طرح می باشد. در این روش، جریان‌های نقدی ورودی و خروجی، با استفاده از نرخ مشخصی تنزیل می شود و به عبارتی، ارزش فعلی وجوه حاصل از سرمایه‌گذاری محاسبه شده و پس از کسر مبلغ سرمایه‌گذاری اولیه، به عنوان ارزش فعلی خالص شناسایی می شود. ارزش خالص فعلی در محاسبات اقتصادی، اقتصاد مهندسی، بودجه کشورها و مباحث اقتصاد خرد و اقتصاد کلان، تجارت و صنعت به طور گسترده‌ای به کار می‌رود. از آنجا که جهت محاسبه NPV بایستی جریان‌های نقدی ورودی و خروجی طرح بدقت مورد تنزیل قرار گرفته (با توجه به نرخ تنزیل تعیین شده) و این امر بعضاً به دلیل پیچیده بودن جریان‌های نقدی، بسیار پیچیده و زمان بر می‌شود، ابزارهای جدیدی برآحتی و ظرف چند ثانیه این محاسبات را بدقت انجام داده و نتایج را در قالب خالص جریان‌های نقدی تنزیل شده ارائه می دهد. در صورتی یک طرح قابل پذیرش است که NPV آن مثبت باشد [۱۰]. همانطور که مشاهده می شود، NPV برای ۳ توربین بادی کوچک محاسبه شده است و هر ۳ دارای یک مقدار منفی هستند که این نشان دهنده توجیه ناپذیری نصب این توربین‌ها در شوشتر می باشد.

### زمان بازگشت سرمایه (Payback period)

زمان برگشت سرمایه، طول مدتی است که منافع پیش بینی شده یک طرح، هزینه‌های آن را بر می گرداند. به عبارت دیگر، دوره بازگشت سرمایه عبارت است از زمانی که عایدات تجمعی پروژه برابر با مبلغ سرمایه‌گذاری طرح شود [۱۰]. در این روش، معیار ارزیابی طرح، کوتاهی و بلندی زمان بازگشت سرمایه است. طرح‌های با دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر جذابیت بیشتری نسبت به طرح‌هایی با دوره بازگشت بلندتر دارند. این روش بخصوص در هنگام مقایسه دو یا چند طرح با یکدیگر کاربرد دارد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود، مقدار بازگشت سرمایه برای ۳ توربین مورد نظر بزرگتر از عمر پروژه محاسبه شده است که این نشان دهنده مقدار بالای زمان بازگشت سرمایه و مناسب نبودن پروژه از لحاظ اقتصادی است.

### تجزیه و تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، مرحله‌ای از ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بادی می باشد که به بررسی تاثیر بر نوسانات اقتصادی و مالی حاصل از تغییر در پارامترهای اقتصادی ورودی می پردازد. لذا این تجزیه و تحلیل باعث شناسایی و برآورد شاخص‌های حساس و تاثیرگذار مربوط به پروژه می شود. برای ارزیابی بهتر اقتصادی، به جز سناریوی کنونی: (inflation rate = ۱۵٪, feed-in-tariff rate = ۴/۹ cent/kWh)، سه نوع سناریوی جدید به منظور تحلیل اقتصادی استفاده از ۳ توربین ذکر شده در جدول (۳) در نظر گرفته شده است. در جدول (۴) پارامترهای مربوط به هر کدام از سناریو‌ها به همراه مقادیر آنها آورده شده و سپس نتایج تغییرات اعمال شده برای ۳ توربین مورد مطالعه در جدول (۵) درج شده است.

جدول ۴) مقادیر مربوط به پارامترهای ورودی در ۳ نوع سناریوی مختلف

Parameters	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Inflation rate (%)	%۱۲	%۸	%۵
Feed-in-tariff rate (cent/kWh)	۱۰	۱۵	۲۰
CO <sub>2</sub> reduction credit(\$/tonCO <sub>2</sub> )	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
Reduction in Initial costs(%)	۵	۱۰	۱۵

در جدول (۴)، inflation rate، همان نرخ تورم است. feed-in-tariff rate، نرخ تغذیه در تعرفه می باشد که قبل از طراحی ۳ سناریو، معادل نرخ حاضر مطابق با منبع [۱] ( سازمان انرژی های نو ایران)، ۴/۳ cent/kWh در نظر گرفته شده است. در ستون چهارم جدول، CO<sub>2</sub> reduction credit، مقدار تشویقی می باشد که به ازای یک تن کاهش سالانه کربن دی اکسید بخاطر تولید برق تجدیدپذیر، به تولید کنندگان برق تجدیدپذیر اعطا می شود. Reduction in initial costs همان مقدار درصد کاهش در هزینه های سرمایه گذاری است.

جدول ۵) نتایج بدست آمده برای ۳ سناریو

Turbine	Net present value (\$)	Benefit-Cost (B-C) ratio	Payback period (years)	Energy production cost (\$/kWh)
<b>S-343</b>				
Scenario 1	-۳۹,۰۲۱	۰/۰۲	> project life	۱/۰۴۰
Scenario 2	-۱۹,۴۲۲	۰/۴۶	18.8	۰/۶۱۷
Scenario 3	۳,۷۱۶	۱/۱۰	7.3	۰/۱۱۰
<b>Bergey BWC Excel</b>				
Scenario 1	-۷۰,۴۰۰	-۰/۰۵	> project life	۱/۴۵۲
Scenario 2	-۴۵,۴۱۰	۰/۲۸	> project life	۱/۰۲۲
Scenario 3	-۱۱,۶۷۰	۰/۸۰	10	۰/۴۲۴
<b>AOC 15/50</b>				
Scenario 1	-۳۳۹,۸۷۹	۰/۰۰	> project life	۱/۲۲۸
Scenario 2	-۲۱۴,۸۳۷	۰/۳۵	> project life	۰/۸۶۳
Scenario 3	-۳۵,۹۹۳	۰/۸۹	9.1	۰/۳۱۹

همانطور که از جدول (۵) مشخص است، فقط توربین S-343 در سناریوی سوم توجیه اقتصادی پیدا می کند. این شرایط مربوط به زمانی است که نرخ تورم ۵٪، نرخ تعرفه برق تجدیدپذیر ۲۰ cent/kWh، به مقدار ۱۵٪ کاهش در هزینه های سرمایه گذاری داشته باشیم و در نهایت، به مقدار ۲۰۰۰ \$/tonCO<sub>2</sub> طرح تشویقی کاهش کربن دی اکسید را در نظر بگیریم. البته رسیدن به چنین شرایطی در حال حاضر کمی دشوار به نظر می رسد. همانطور که از جدول مشخص است، با در نظر گرفتن شرایط فوق الذکر در سناریوی سوم، مقدار زمان بازگشت سرمایه برای توربین S-343، ۷٫۳ سال می شود. ضمناً هزینه تمام شده برق تولیدی معادل ۰/۱۱\$/kWh می شود که بسیار توجیه پذیر است. برای اینکه تحلیل حساسیت به صورت ملموس تر انجام شود، از بخش Sensivity analysis در RETScreen استفاده شده است. در این حالت، متغیر خروجی ارزش خالص فعلی (NPV) در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل نرم افزار برای توربین منتخب (S-343) که بهترین وضعیت اقتصادی را داشته انتخاب و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

در شکل (۱۰)، همانطور که مشخص است، به ازای تغییر در مقادیر "تغذیه در تعرفه" از مقدار ۰ الی ۴۰ cent/kWh مقادیر مختلفی برای NPV به دست آمده است. مقادیری که در ناحیه قرمز رنگ قرار گرفته اند، اشاره بر غیر اقتصادی بودن پروژه دارند. همانطور که مشخص است مقادیر تغذیه در تعرفه ای که بالا تر از ۲۰ cent/kWh می باشد، دارای مقادیر مثبت NPV از ۳۷۱۶ دلار تا ۱۲۰۱۷ دلار است که در این حالت، پروژه از لحاظ اقتصادی برای نصب توربین S-343 مناسب می باشد. همچنین مقدار هزینه های سرمایه گذاری نیز نباید از ۵۴۰۰۰ دلار بالاتر رود زیرا باعث غیراقتصادی شدن پروژه می شود. در عین حال مقدار نرخ تشویقی ارزش کاهش CO<sub>2</sub> یا همان CO<sub>2</sub> reduction credit rate باید بالای ۲۰۰۰ دلار بر تن CO<sub>2</sub> باشد.

Feed-in-tariff rate				\$/MWh
0.00	100.00	200.00	300.00	400.00
-100%	-50%	0%	50%	100%
-4,584	-434	3,716	7,867	12,017
CO <sub>2</sub> reduction credit rate				\$/tCO <sub>2</sub>
0.00	1,000.00	2,000.00	3,000.00	4,000.00
-100%	-50%	0%	50%	100%
-34,388	-15,336	3,716	22,769	41,821
Initial costs				\$
0	18,000	36,000	54,000	72,000
-100%	-50%	0%	50%	100%
39,716	21,716	3,716	-14,284	-32,284

شکل ۱۰) نتایج تحلیل حساسیت NPV برای توربین S-343

## نتیجه گیری

انرژی باد از جمله انرژی های نو و تجدید پذیر است که استفاده از آن به منظور تولید برق بادی سرعت رو به رشد بالایی را نشان می دهد. طی سال های اخیر، استفاده از این انرژی در ایران به ویژه منطقه منجیل شروع شده است، ولی در دیگر نقاط کشور فعالیت چندانی در این زمینه صورت نگرفته است.

در این مطالعه، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه شوشتر در شمال استان خوزستان در ۲۰ ماه متوالی با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه و با بکارگیری مدل آماری ویبول مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات مربوط به متوسط ماهانه سرعت باد در شوشتر نشان داد که سرعت ماهانه باد برای سه ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر، بین  $1/8 \text{ m/s}$  و  $4/3 \text{ m/s}$  متغیر است. تنها ماهی از سال که دارای سرعت باد بیشتر از  $4 \text{ m/s}$  است، ماه می در ارتفاع ۴۰ متر می باشد. بررسی جهت باد نشان داد که بیشترین فرکانس وزش باد از طرف شمال غرب می باشد. در نمودار شکل (۵) خطای ۴ نوع تابع توزیع احتمال Weibull، Rayleigh، Log-normal و Logistic در ارتفاع ۴۰ متر برای شوشتر نشان داده و مشخص شد که از لحاظ سازگاری داده های باد با مقادیر بدست آمده از تابع توزیع احتمال مورد نظر، مدل ویبول کمترین خطا را نسبت به سه مدل دیگر دارد. در رتبه های بعدی، مدل های Rayleigh، Log-normal و در نهایت، مدل Logistic قرار دارند. بر اساس نتایج اولیه بدست آمده از سرعت باد، مشخص شد که سرعت باد در شهر شوشتر در شمال خوزستان دارای پتانسیل ضعیف می باشد. بنابراین، بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعه شهر آبادان در جنوب خوزستان [۱۹]، مشخص می شود که جنوب استان نسبت به شمال آن دارای پتانسیل بهتری از سرعت باد است. برای ارزیابی نهایی انرژی باد در شوشتر، امکان سنجی اقتصادی نصب ۳ توربین بادی کوچک با استفاده از نرم افزار RETScreen بررسی شد. پارامترهای اقتصادی بدست آمده همچون ارزش خالص فعلی، زمان بازگشت سرمایه، نسبت فایده به هزینه و مقدار ضریب ظرفیتی محاسبه شده برای هر توربین نشان داد که نصب توربین های بادی انتخاب شده از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. ضمناً تجزیه و تحلیل حساسیت نیز برای توربین های انتخاب شده صورت گرفت تا مشخص شود در چه حدود هزینه ی احداث واحدهای بادی توجیه اقتصادی پیدا می کند و مشخص شد که فقط توربین S-۳۴۳ در سناریوی سوم توجیه اقتصادی می یابد. این شرایط مربوط به زمانی است که نرخ تورم ۵٪، نرخ تعرفه برق تجدیدپذیر ۲۰ cent/kWh، به مقدار ۱۵٪ کاهش در هزینه های سرمایه گذاری داشته باشیم و در نهایت به مقدار  $2000 \text{ } \$ / \text{tonCO}_2$  طرح تشویقی کاهش کربن دی اکسید را در نظر بگیریم. البته رسیدن به چنین شرایطی در حال حاضر کمی دشوار به نظر می رسد، اما این به معنای آن نیست که شهر شوشتر از کاربرد انرژی های تجدید پذیر به خصوص انرژی باد بهره مند نباشد، با توجه به اینکه در مناطق با پتانسیل ضعیف باد، اخیراً سیستم های ترکیبی متداول شده اند. به عنوان مثال، مزیت یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک-بادی-دیزل این است که در مواقعی از سال که سرعت باد مناسب است، تولید انرژی توسط توربین بادی انجام شده و در زمانی که انرژی خورشیدی نسبت به پتانسیل باد ارجح باشد،

تولید انرژی توسط سیستم های فوتوولتاییک خورشیدی انجام می شود و زمانی هم که هیچ کدام از انرژی های مورد نظر (بادی و خورشیدی)، دارای پتانسیل خوبی نباشند، می توان از یک سیستم دیزل استفاده کرد. البته استفاده از سیستم های دیزل به تنهایی می تواند شدت آلاینده محیط زیست باشد، اما بکار گیری آنها در یک سیستم ترکیبی آلاینده های کمتری را وارد محیط زیست می کند. بدین منظور در مطالعه بعدی در شهر شوشتر پیشنهاد شده که علاوه بر بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی به منظور کاربرد هایی همچون استفاده از پنل های خورشیدی، آبگرمن های خورشیدی و .... امکان سنجی فنی، زیست محیطی و اقتصادی استفاده از سیستم های ترکیبی (Hybrid) (به عنوان مثال، سیستم ترکیبی فتووولتاییک - بادی به همراه دیزل ژنراتور) مورد بررسی قرار گیرد.

#### منابع

- [۱] سازمان انرژی های نو ایران <http://www.sun.org.ir>.
- [۲] کاویانی، محمد رضا. (۱۳۷۴)، توربین های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، فصل نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۶.
- [۳] گندمکار، امیر. (۱۳۸۵)، بررسی سینوپتیک انرژی باد در منطقه ی سیستان، پایان نامه ی دکتری رشته اقلیم شناسی دانشگاه اصفهان.
- [4] Ackermann, T. et al. 2002. "An overview of wind energy-status 2002", Renewable & sustainable energy reviews, Vol. 6, pp. 67-127.
- [5] Badran, O. 2003. "Wind turbine utilization for water pumping in Jordan", Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91, pp. 1203-1214.
- [6] Bergey Wind Power Company. 2013. Accessed January 10, 2013. <http://www.bergey.com>
- [7] Burton, T., sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. 2001. Wind energy handbook, john wiley & sons.
- [8] Dorvlo, A. S. S. 2002. "Estimating wind speed distribution" Energy Convers. Manage., Vol.43, No.23, pp.11-2318.
- [9] Endurance Wind Power Company. 2013. Accessed January 10, 2013. <http://www.endurancewindpower.com>
- [10] Hrayshat, E. S. 2009. "Techno-economic Analysis of Electricity Generation by Means of a Proposed 50 MW Grid-connected Wind Power Plant for Jordan", Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, Vol.4, No.3, pp.247-260.
- [11] Karsli, V. M., and Gecit, C. 2003. "An investigation on wind power potential of Nurdag Gaziantep Turkey". Renew. Energy. Vol.28, pp.823-842.

- [12] Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasi, M., Khanali, M. and Abbaszadeh, R. 2010. "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.
- [13] Mirzahosseini, A. H., and Taheri, T. 2012. "Environmental, technical and financial feasibility study of solar power plants by RETScreen, according to the targeting of energy subsidies in Iran." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, No.5, pp.2806-2811.
- [14] Mostafaeipour, A. 2010. "feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 35, No.1, pp.188-201.
- [15] Mostafaeipour, A. and Abarghoeei, H. 2010. "harnessing wind energy at manjil area located in north of Iran", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 14, pp. 93-111.
- [16] Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A. A., & Kalantar, V. 2011. "Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No.6, pp. 2545-2556.
- [17] Nedaei, M. 2012. "Wind Energy Potential Assessment in Chalus County in Iran", *International journal of renewable energy research*, Vol. 2, No.3. pp. 338-347.
- [18] Nedaei, M. 2013. "Wind resource assessment in Hormozgan province in Iran", *International journal of sustainable energy*, pp. 1-50. <http://dx.doi.org/10.1080/14786451.2013.784319>.
- [19] Nedaei, M. 2012. "Wind resource assessment in Abadan airport in Iran", *International journal of renewable energy development*, Vol 1, No.3. pp. 87-97.
- [20] National Renewable Energy Laboratory. 2013. Accessed January 10, 2013. <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/tables/A-8T.html>.
- [21] Patel, M. R. 1999. *Wind and solar power systems*, CRC press.
- [22] Palese, C., Lassig, J. L., Cogliati, M. G., and Bastansti, M. A. 2000. "Wind regime and wind power in North Patagonia, Argentina" *Wind Engineer.*, Vol.25, pp. 361–377.
- [23] Rehman, S., Halawani, T. O., and Husain, T. 1994. "Weibull parameters for wind speed distribution in Saudi Arabia" *Sol. Energy*, Vol.53, pp.473–479.
- [24] Seaforth Energy, <http://seaforthenergy.com>.
- [25] Windustry company, <http://www.windustry.org/resources/how-much-do-wind-turbines-cost>