

تعیین مشخصات فنی (قطر و ارتفاع) - اقتصادی (هزینه‌ی تولید برق) سیستم مبدل انرژی بادی به‌عنوان یک منبع تولید پراکنده

حامد شکوری گنجوی

دانشیار گروه مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران
hshakouri@ut.ac.ir

آرش حاتمی*

کارشناس ارشد مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران ahatami@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۱۳

چکیده

تولید پراکنده از جمله روش‌های تولید انرژی برق با سیستم‌های تولیدی کم‌ظرفیت است. در این مقاله بهره‌برداری از توربین‌های بادی به‌عنوان یکی از فناوری‌های تولید پراکنده مد نظر قرار گرفته است. این مقاله با بررسی نقش پارامترهای تأثیرگذار در تعیین مشخصات توربین‌های بادی کوچک و متوسط، یعنی توان نامی، قطر و ارتفاع پایه‌ی آن‌ها، در جهت تأمین تقاضا در بخش خانگی، به تشریح روندی پرداخته است تا مصرف‌کننده بتواند با دانستن نیاز مصرف و ویژگی‌های محل زندگی خود سیستمی را که از نظر اقتصادی مناسب باشد، انتخاب کند. عوامل تأثیرگذار بر سیستم تبدیل انرژی باد به دو دسته عوامل مشخصات خانوار (نیاز مصرف) و شرایط جغرافیایی زندگی (محل نصب توربین) تقسیم‌بندی می‌شوند. از آن‌جا که انتخاب این سیستم برای مصرف‌کننده از نظر هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین اهمیت زیادی دارد، در این مقاله روابط ریاضی بین دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین، که به ترتیب متأثر از توان مصرفی و شرایط جغرافیایی محل هستند، تعیین و از آن‌جا هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین محاسبه شده است. برای بررسی تأثیر هر کدام از عوامل فوق و همچنین افزایش دقت محاسبات انجام گرفته، از توربین‌های با توان‌های مختلف و نیز ارتفاع‌های مختلف پایه برای هر توربین در چهار منطقه با شرایط جغرافیایی متفاوت، از بین مناطقی که سهم بیش‌تری از پتانسیل انرژی باد کشور را در مناطق سردسیر و گرمسیر پوشش می‌دهند، استفاده شده است. بر مبنای نتایج به‌دست آمده، رابطه‌ی بین هزینه‌ی واحد برق با ارتفاع پایه‌ی توربین و قطر روتور به ترتیب از جنس نمایی کاهنده و چند جمله‌ای از درجه‌ی دو است که دومی از وجود یک نقطه‌ی بهینه برای قطر توربین حکایت دارد. با در دست داشتن میزان نیاز برق و هزینه‌ی پرداختی از سوی خانوار به ازای هر کیلو وات ساعت مصرف، می‌توان با استفاده از این روابط به راحتی مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد را تعیین کرد. براساس بررسی این مقاله حداقل هزینه‌ی تولید برق با توربین بادی کوچک (با قطری در حدود ۳/۵ متر) برای تأمین برق خانگی در شهرهای کشور بین ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ ریال برای هر کیلووات ساعت می‌باشد که با قیمت‌های پس از حذف پارانها قابل رقابت است، با این حال سودآوری لازم برای ترغیب بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در این زمینه را ندارد و باید سیاست‌های متنوعی در راستای توسعه‌ی این انرژی انجام گیرد.

طبقه‌بندی JEL: H31, Q42, R21

کلید واژه‌ها: سیستم تبدیل انرژی باد، ارزیابی منابع انرژی بادی، انرژی‌های تجدیدپذیر

۱- مقدمه

افزایش بهره‌برداری از منابع انرژی فسیلی و کاهش ذخایر موجود و همچنین افزایش میزان آلودگی محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای به موازات آن، سبب ایجاد بستر مناسب برای بهره‌برداری از انرژی‌های جدید شده است. از جمله این منابع، انرژی باد است که برای تولید انرژی الکتریکی به کار می‌رود. استفاده از انرژی‌های جدید به دلیل پایان‌ناپذیر بودن و همچنین داشتن آلودگی زیست محیطی در حد صفر، جایگزین مناسبی برای منابع فسیلی خواهد بود (رای^۱، ۲۰۰۰). پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ دست کم ۱۲٪ از انرژی الکتریکی در جهان از باد گرفته شود^۲. بر اساس گزارش سازمان جهانی انرژی باد، از کل ظرفیت نصب شده در جهان در راستای تولید انرژی برق بادی، تا سال ۲۰۱۵ میلادی حدود ۲۵٪ آن در آسیا خواهد بود و این در حالی است که در بین قاره‌های مختلف، تا سال ۲۰۱۰، اروپا دارای بیش‌ترین ظرفیت (حدود ۴۸٪) می‌باشد^۳.

تولید انرژی الکتریکی بسته به اندازه‌ی سیستم تبدیل انرژی باد، در سه سطح کوچک (تا ۲kw)، متوسط (بین ۲ kw تا ۱۰۰ kw) و بزرگ (بیش از ۱۰۰ kw) قابل تقسیم‌بندی است (باگیورگاس و همکاران^۴، ۲۰۰۷). تاکنون در بیش‌تر کشورهای توسعه یافته هم‌چون آلمان، دانمارک، آمریکا، اسپانیا، استرالیا و چین و هند اقدامات زیادی در جهت بهره‌برداری از توربین‌های بادی و تولید برق مورد نیاز به کمک آن‌ها انجام گرفته است^۵؛ ولی بیش‌تر فعالیت‌های انجام شده در این زمینه با هدف استفاده از توربین‌های بادی بزرگ برای تولید مقدار انرژی الکتریکی زیاد برنامه‌ریزی شده است (عامری و همکاران^۶، ۲۰۰۶ و نوروزی و صادقیان^۷، ۲۰۰۵). کشور ایران نیز تاکنون (۱۳۹۰) تنها به طور متمرکز و با تلاش‌های دولتی در سال‌های دور گذشته توانسته است ۱۰۰ مگاوات ظرفیت انرژی بادی ایجاد کند، با این حال کل پتانسیل موجود در کشور برای نصب و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی، بیش از ۱۵ گیگاوات برآورد شده است (ترازنامه‌ی انرژی، وزارت نیرو، ۱۳۸۸). سازمان انرژی‌های نو طرح تهیه‌ی اطلس باد

1- Rai.

2- IEA, 2009.

3- World Wind Energy Association (WWEA), 2010.

4- Bagiorgas et al.

5- Renewable Energy, 2011.

6- Ameri et al.

7- Nowrouzi and Sadeghian.

ایران را از سال ۱۳۸۱ آغاز کرده است. طبق مطالعات این سازمان، با توجه به سرعت متوسط ۵ تا ۶ متر بر ثانیه‌ی باد در ایران، پتانسیل انرژی بادی کشور در حدود ۳۴ هزار گیگاوات ساعت در سال برآورد می‌شود (همان).

با وجود تمایل نهادهای دولتی به سرمایه‌گذاری در این زمینه تا کنون بخش خصوصی چندان فعال نشده است. به نظر می‌رسد یکی از راه‌های توسعه‌ی استفاده از انرژی باد، گسترش توربین‌های کوچک و متوسط در بخش خانگی (و شاید کشاورزی) است. این مقاله با رویکرد بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک برای تأمین برق مورد نیاز در بخش خانگی توجه ویژه‌ای به زمینه‌های توسعه‌ی تولید پراکنده دارد و می‌تواند در راستای امکان‌سنجی استفاده از این توربین‌ها در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

در برخی از مقالات و نشریات مختلف مدل‌های متنوعی در این زمینه ارائه شده، که در هر کدام تأثیر پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال رحمان^۱ (۲۰۰۴)، مدل‌هایی را ارائه داده که میزان انرژی خروجی و همچنین تحلیل اقتصادی سیستم مبدل انرژی بادی را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. همچنین ناسی سلیک^۲ (۲۰۰۳) و رحمان و همکاران (۲۰۰۳)، نقش اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم بر میزان بهره‌برداری از سرعت باد و به دنبال آن میزان انرژی خروجی از سیستم را بررسی کرده‌اند. در حقیقت آنچه در این مقالات ارائه شده، بررسی و تعیین رابطه‌ی بین اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم بر هزینه‌ی واحد انرژی خروجی و تصمیم‌گیری درباره‌ی اندازه و ارتفاع نصب توربین بر این اساس است.

به طور معمول میزان برق تولید شده به‌وسیله‌ی یک سیستم تبدیل انرژی باد و به‌دنبال آن هزینه‌ی واحد برق تولید شده، به دو عامل مشخصات توربین و شرایط جغرافیایی منطقه‌ی مورد نظر بستگی دارد (باگیورگاس و همکاران، ۲۰۰۷). دسته‌ی اول شامل توان توربین، قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین می‌باشد و منظور از شرایط جغرافیایی منطقه نیز، شرایط آب و هوایی و مکانی منطقه است که متأثر از میزان تابش خورشید و درجه‌ی حرارت در منطقه، ارتفاع از سطح دریا، میزان پستی و بلندی‌های اطراف آن و به‌طور کلی تمامی عواملی که در میزان سرعت باد در آن منطقه مؤثرند، می‌باشد (کلارک^۳، ۲۰۰۳). تأثیر عامل دوم در مقایسه با عامل اول در تعیین میزان

1- Rehman.

2- Naci Celik.

3- Clarke.

انرژی برق تولید شده بیش‌تر است، زیرا تعیین‌کننده‌ی سرعت باد و به دنبال آن پتانسیل انرژی باد برای تولید برق در آن منطقه می‌باشد. لو و همکاران^۱ (۲۰۰۲)، نشان دادند برای منعکس کردن تأثیر این عامل جهت تعیین خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد، از ارتفاع پایه‌ی توربین به عنوان فاکتور تأثیرگذار بر سرعت وزش باد استفاده شده است. در حقیقت با تغییر ارتفاع پایه‌ی توربین، تأثیر پتانسیل انرژی باد بر مقدار هزینه‌ی واحد برق تولید شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. منظور از پتانسیل انرژی باد، میزان توانایی باد در تولید انرژی الکتریکی است. افزایش پتانسیل انرژی باد نیز سبب افزایش میزان برق تولید شده توسط سیستم تبدیل انرژی باد می‌شود و کارایی سیستم را افزایش می‌دهد (احمد و همکاران^۲، ۲۰۰۶). طبق گزارشات سازمان انرژی آمریکا، تغییر ۱۰ درصدی در میزان سرعت باد، تغییر توان تولید شده از توربین تا سطح بالاتر از ۲۵٪ را در بر خواهد داشت^۳. برای تخمین پتانسیل انرژی باد بر اساس سرعت وزش باد از تابع توزیع احتمالی باد که از نوع توزیع وایبول است استفاده می‌شود (لان و همکاران^۴، ۲۰۰۰ و گوپتا^۵، ۱۹۸۶). ساهین و آکساکال^۶ (۱۹۹۸)، نشان دادند تعیین مقدار دقیق پارامترهای توزیع وایبول سرعت باد، که شامل پارامتر شکل و پارامتر مقیاس است، کار دشوار و پیچیده‌ای است. به‌علاوه مقدار این پارامترها از یک منطقه به منطقه دیگر متغیر است. لذا در این مقاله قبل از تعیین مقدار این پارامترها، ابتدا بر اساس اطلس باد ایران (سازمان انرژی‌های نو ایران)، چهار منطقه از بین مناطقی که سهم بیش‌تری از پتانسیل انرژی باد کشور را پوشش می‌دهند، انتخاب شده است. این مناطق شامل شهرهای اصفهان، شهر بابک، مراغه و قسمت‌های شمالی شهر تهران هستند. طبق اطلس باد ایران، متوسط سرعت وزش باد به‌صورت سالانه در ارتفاع ۸۰ متر، بین ۳m/s تا بیش‌تر از ۱۵m/s متغیر است. البته در بیش‌تر مناطق کشور متوسط سرعت باد در محدوده ۱۱m/s-۶ قرار می‌گیرد. از این رو، برای افزایش تطابق بیش‌تر نتایج به‌دست آمده با شرایط جوی کشور ایران از نظر پتانسیل انرژی باد، این چهار منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

1- Lu.

2- Ahmed et al.

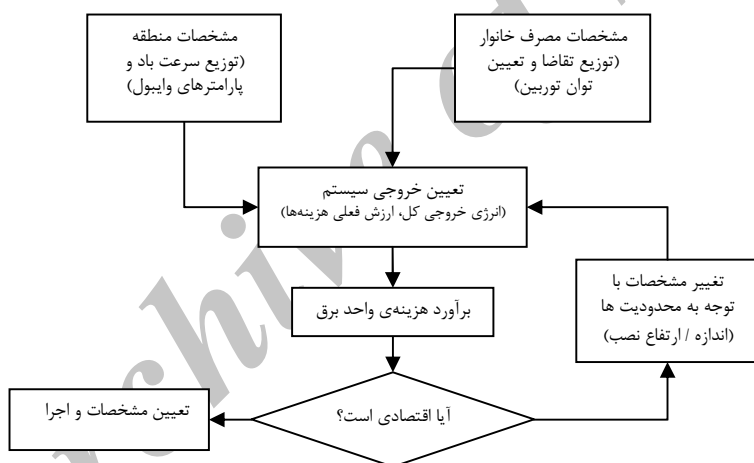
3- U.S. Department of Energy.

4- Lun et al.

5- Gupta.

6- Sahin and Aksakal.

در این مقاله بعد از تعیین منطقه‌ی سکونت و مقادیر پارامترهای توزیع و ایبول بر اساس مشاهدات سرعت باد، و نیز میزان تقاضای برق برای واحد مسکونی، روند برآورد هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین بیان شده است. سپس به دلیل همبستگی زیاد مشاهده شده بین هزینه‌ی واحد برق و هر یک از دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین و همچنین تأثیر این دو فاکتور در تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد، معادله‌ی ریاضی بین آن‌ها برآورد شده است. به کمک این معادله می‌توان تمامی جزئیات سیستم تبدیل انرژی باد را بر اساس مقدار هزینه‌ی واحد برقی که خانوار به‌ازای میزان مصرف برق خود پرداخت می‌کند، تعیین نمود. در شکل زیر فرآیند تصمیم‌گیری برای تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد آمده است.



شکل ۱- فرآیند تصمیم‌گیری برای تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد

با مشخص بودن حداکثر بار مورد نیاز خانوار، ارتفاع نصب توربین و سرعت متوسط باد در آن محل، محاسبات تعیین مشخصات توربین به نحوی که در ادامه می‌آید به انجام رسیده و هزینه‌ی متوسط انرژی تولیدی تخمین زده شده است. چنانچه برق تولیدی نسبت به برق قابل خریداری اقتصادی نباشد، توان مصرفی از طریق مشترک‌سازی مصرف‌کنندگان مجاور تغییر و یا ارتفاع نصب افزایش می‌یابد تا شرایط

اقتصادی برای مشخصات توربین حاصل شود. در ادامه، علاوه بر تشریح این مراحل، یافته‌های تحقیق و در نهایت نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- بررسی خصوصیات باد و توربین بادی

قبل از تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد، ابتدا می‌بایست پتانسیل انرژی باد در هر یک از چهار منطقه مورد نظر برآورد شود. از آن‌جا که سرعت وزش باد متغیر است، برای تخمین پارامترهای توزیع وایبول از میانگین سرعت باد طی یک‌سال استفاده می‌شود، بنابراین با تعیین میانگین و انحراف استاندارد سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر برای هر یک از چهار منطقه‌ی مورد نظر، پارامترهای شکل و مقیاس توزیع وایبول طبق روابط زیر محاسبه می‌شود (استیونز و اسمولدرز، ۱۹۷۹):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad (1)$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+k)} \quad (2)$$

در معادله‌های فوق، σ انحراف معیار توزیع سرعت باد، Γ تابع گاما و \bar{V} میانگین سرعت وزش باد است. هم‌چنین k و c نیز به ترتیب پارامتر شکل و پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد هستند. با فرض k ثابت (که معمولاً بین ۱ تا ۲ است) افزایش پارامتر c به معنی بیش‌تر شدن سرعت متوسط باد و در نتیجه توان خروجی بزرگ‌تر برای توربین است. نتایج محاسبات انجام شده به منظور تعیین مقدار هر یک از این دو عامل، با در نظر گرفتن انحراف استاندارد ۴.۴۵ برای مناطق مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

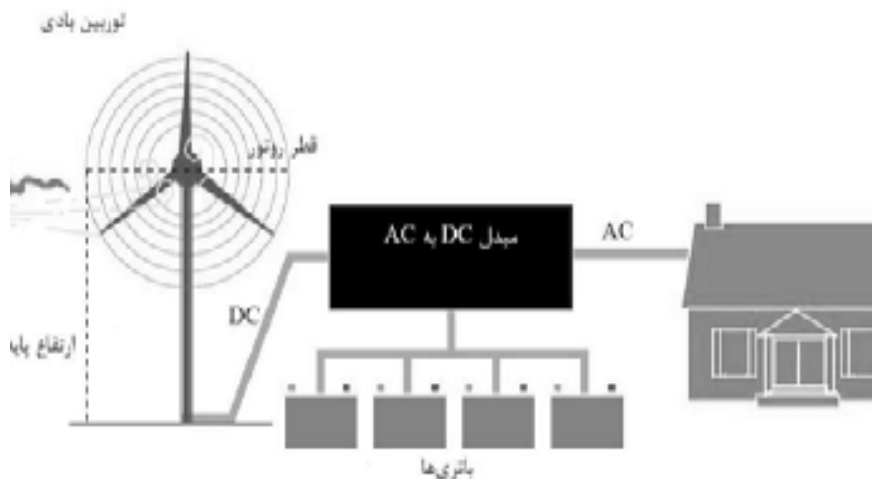
جدول ۱- ویژگی‌های باد در مناطق مورد نظر

k	c (m/s)	متوسط سرعت (m/s) در ارتفاع $h=10\text{ m}$	متوسط سرعت (m/s) در ارتفاع $h=80\text{ m}$	مناطق مورد نظر
۰.۹۴	۴.۲۹	۴.۲	۷	شمال تهران
۱.۲۱	۴.۷۷	۵.۳	۹	مراغه
۱.۳۵	۴.۹	۵.۸۸	۱۰	شهر بابک
۱.۴۶	۴.۸۸	۶.۳	۱۱	اصفهان

مرجع: یافته‌های تحقیق

به‌طور کلی توربین‌های بادی که برای تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرند، براساس میزان توان تولیدی به سه دسته توربین‌های بادی کوچک (تا حداکثر توان ۲kw)، توربین‌های متوسط (بین ۱۰۰kw-۲) و توربین‌های بزرگ (بیش از ۱۰۰kw) قابل تقسیم‌بندی هستند. شایان ذکر است که این تقسیم‌بندی تقریبی است. در این مقاله با بررسی میزان مصرف برق خانوارهای با دهک‌های درآمدی متفاوت، اندازه‌ی توربین‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که کل مصرف روزانه خانوار را تعیین کند. به‌طور معمول برای تأمین تقاضای برق در بخش خانگی از توربین‌های با حداکثر توان ۱۰kw استفاده می‌شود که در این مقاله این توربین‌ها نیز جزء دسته‌ی توربین‌های بادی کوچک قرار می‌گیرند.

استفاده از توربین‌های بادی بزرگ در بخش خانگی به‌دلیل بالا بودن هزینه‌ی توربین و هزینه‌های نصب و راه‌اندازی آن از نظر اقتصادی و همچنین پایین بودن مصرف برق در هر خانوار قابل توجیه نیست، از این رو نوع توربینی که برای یک خانوار انتخاب می‌باشد باید با درآمد خانوار و توان الکتریکی مورد انتظار تناسب داشته باشد تا هم از نظر اقتصادی توجیه شود و هم میزان برق مورد نیاز برای مصرف خانوار را تأمین کند. گفتنی است در برخی موارد مولدهای برق تا توان ۲۵ kw (اندازه متوسط) نیز که در زمره‌ی تولید پراکنده قرار می‌گیرند، برای مجموعه واحدهای مسکونی قابل استفاده‌اند. عموماً برای تبدیل برق تولید شده به وسیله‌ی توربین از جریان مستقیم (DC) به جریان متناوب (AC) از یک مبدل استفاده می‌شود. هم‌چنین برای ذخیره‌ی برق تولید شده و استفاده از آن در مواقع لازم، به‌ویژه در مواقعی که وزش باد برای تأمین برق مورد نیاز وجود ندارد، یک باتری (که در این مطالعه در نظر گرفته نشده است) به توربین متصل می‌شود. تمامی این موارد در کنار یکدیگر سیستم تبدیل انرژی باد را تشکیل می‌دهند که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- سیستم تبدیل انرژی باد (همراه با باتری)

۳- تعیین توان توربین

منظور از توان توربین مقدار انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین در یک بازه‌ی زمانی مشخص است. از جمله عوامل تأثیرگذار بر توان توربین، سرعت باد است که با توان رابطه‌ی مستقیم دارد. هرچه سرعت وزش باد بیش‌تر باشد، پتانسیل انرژی باد برای تولید الکتریسیته بیش‌تر خواهد بود و می‌توان از آن برق بیش‌تری تولید کرد. افزون بر این اندازه‌ی توربین استفاده شده نیز از جمله دیگر عواملی است که بر توان خروجی توربین تأثیرگذار است؛ زیرا با افزایش اندازه‌ی توربین و به دنبال آن ازدیاد طول پره‌ها، سطح تماس باد با توربین زیاد شده و این سبب افزایش سرعت چرخش پره‌های توربین می‌شود، بنابراین توان توربین با در نظر گرفتن تأثیر دو عامل سرعت و سطح تماس باد با توربین طبق معادله‌ی زیر قابل محاسبه است (سahین و همکاران، ۱۹۹۸):

$$AV^3\rho P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho AV^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (3)$$

در معادله‌ی فوق، P توان برق تولید شده است که بر حسب وات (W) محاسبه می‌شود، به علاوه V سرعت وزش باد و A سطح مقطعی است که تحت تأثیر وزش باد قرار می‌گیرد. طبق آن‌چه در شکل (۲) نشان داده شده است، این سطح از چرخش پره‌های توربین و به‌صورت دایره شکل می‌گیرد. سرانجام پارامتر ρ در معادله‌ی (۳)،

نشانگر چگالی هواست که در این مقاله مقدار آن در ارتفاعات مختلف ثابت و برابر با ۱ فرض شده است. ثابت گرفتن میزان چگالی هوا سبب بروز کم‌تر از ۵٪ خطا در تخمین سرعت وزش باد می‌شود (هنسی^۱، ۱۹۷۷ و باربر و همکاران^۲، ۱۹۷۷). بنابراین معادله‌ی (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$P = 0.3925 D^2 V^3 \quad (۴)$$

در معادله‌ی فوق، D قطر روتور یا همان قطر سطحی از توربین است که تحت تأثیر وزش باد قرار می‌گیرد.

از جمله دیگر مشخصه‌های هر توربین، توان نامی (P_r)، کمینه‌ی سرعت باد (V_i)، بیشینه‌ی سرعت باد (V_o) و سرعت نامی (V_r) است. توان نامی بر اساس سرعت نامی طبق معادله‌ی (۴) محاسبه می‌شود. منظور از V_i ، کم‌ترین مقدار سرعت باد است که برای سرعت‌های کم‌تر از آن توربین دیگر قادر به تولید برق نیست و V_o بیش‌ترین مقدار سرعت باد است که توربین برای سرعت‌های بیش‌تر از آن مقدار توان تقریباً یکسانی را در سطح پایین‌تر از توان ماکزیمم تولید می‌کند. علت کاهش میزان برق تولید شده توسط توربین در سرعت‌های بالای باد، اعمال نیرو از سوی باد بر پره‌های توربین و جلوگیری از چرخش مناسب پره‌هاست. چرخش نامناسب پره‌ها سبب کاهش بازدهی توربین و به دنبال آن کاهش توان تولید شده می‌شود. پس در معادله‌ی (۴)، V باید در محدوده V_i و V_o انتخاب شود تا مقدار توان برق تولید شده به درستی محاسبه شود. طبق این معادله، بر اساس سرعت‌های مختلف در محدوده‌ی فوق، می‌توان توان‌های تولید شده‌ی متفاوتی را محاسبه کرد.

در بیش‌تر مقالات و نشریاتی که در زمینه‌ی تولید انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی مطرح شده‌اند، برای محاسبه‌ی میزان برق تولید شده و به دنبال آن برآورد هزینه‌ی واحد برق تولید شده از توان نامی (P_r) استفاده شده است (احمد شتا و هانیش^۳، ۲۰۰۶؛ سارکار و حسین^۴، ۱۹۹۱؛ اوکار و بالو^۵، ۲۰۰۸). ولی از آن‌جاکه محاسبه‌ی توان خروجی از توربین بر اساس سرعت باد انجام می‌گیرد و چون سرعت یک عامل متغیر است، بهتر است از مقدار متوسط توان \bar{P} ، به عنوان معیاری مناسب در این زمینه استفاده شود. در

1- Hennessey.

2- Barber et al.

3- Ahmed Shata and Hanitsch.

4- Sarkar and Hussain.

5- Ucar and Balo.

حقیقت سرعت باد بر اساس شرایط جغرافیایی منطقه طی ساعات شبانه‌روز و هم‌چنین ارتفاع توربین از سطح زمین متغیر است. متغیر بودن سرعت باد منجر به متغیر بودن توان تولید شده توسط توربین طبق معادله‌ی (۴) می‌شود. پس استفاده از توان نامی برای برآورد هزینه‌ی واحد برق، که تحت تأثیر تغییر شرایط حاکم بر سیستم تبدیل انرژی باد قرار نمی‌گیرد، توجیه منطقی ندارد. برای تعیین \bar{V}^3 طبق معادله‌ی (۴) می‌بایست ابتدا \bar{V}^3 محاسبه شود که این کار طبق معادله‌ی زیر انجام می‌گیرد (گوپتا، ۱۹۸۶):

$$\bar{V}^3 = \left[\frac{\Gamma(1-\frac{3}{k})}{\Gamma^3(1+\frac{1}{k})} \right] \bar{V}^3 \quad (5)$$

در معادله‌ی (۵)، Γ تابع گاما و \bar{V}^3 توان سوم متوسط سرعت باد است. طبق آنچه در معادله‌ی (۲) بیان شده است، سرعت متوسط، تابعی از پارامترهای وایبول سرعت باد می‌باشد، بنابراین معادله‌ی (۵) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\bar{V}^3 = c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \quad (6)$$

طبق معادله‌ی فوق، به دلیل در نظر گرفتن مناطق مختلف و به دنبال آن متغیر بودن مقادیر k و c ، برای هر منطقه‌ی \bar{P} های متفاوتی تولید می‌شود، بنابراین \bar{P} را می‌توان طبق رابطه‌ی کلی زیر که براساس روابط فوق بازنویسی شده است، محاسبه کرد:

$$\bar{P} = 0.3925 D^2 c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \quad (7)$$

طبق معادله‌ی فوق، توان متوسط، تابعی از پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد و قطر روتور توربین استفاده شده برای تولید برق می‌باشد.

۴- محاسبه‌ی هزینه‌ی واحد برق تولید شده

هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین‌های بادی عاملی است که تأثیر به‌سزایی در انتخاب و پیاده‌سازی یک سیستم تبدیل انرژی باد دارد. به دنبال آن در این مقاله که موضوع آن بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک در بخش خانگی است، اهمیت موضوع بیش‌تر می‌شود، زیرا هزینه‌ی واحد برق ارتباط مستقیم با سطح درآمد خانوار و هزینه‌ی قابل قبول پرداختی از سوی خانوار به ازای هر کیلووات ساعت مصرف برق دارد. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی واحد برق ابتدا می‌بایست ارزش فعلی هزینه‌های سیستم

تبدیل انرژی باد و همچنین مقدار انرژی الکتریکی خروجی کل مشخص باشد. با مشخص بودن این دو مورد، هزینه‌ی واحد برق طبق معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$CPU = \frac{PVC}{E_{out}} \quad (۸)$$

در معادله‌ی (۸)، PVC ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد و E_{out} میزان انرژی الکتریکی خروجی کل از توربین بادی است. در ادامه نحوه‌ی محاسبه‌ی هر یک ارائه شده است.

انرژی الکتریکی خروجی کل

این انرژی بر اساس عامل ظرفیت توربین و میزان انرژی‌ای که توسط توربین قابل تولید است، محاسبه می‌شود. نحوه‌ی تعیین مقدار آن طبق معادله‌ی زیر انجام می‌گیرد (احمد شتا و هانیش، ۲۰۰۸):

$$E_{out} = E \times C_f \quad (۹)$$

در معادله‌ی فوق، E میزان انرژی قابل تولید و C_f عامل ظرفیت توربین است. چون ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد برای طول عمر سیستم، که در این مقاله ۲۰ سال فرض شده است، محاسبه می‌شود، مقدار انرژی قابل تولید و انرژی الکتریکی خروجی کل نیز می‌بایست برای کل طول عمر سیستم تعیین شود. تعیین مقدار انرژی قابل تولید طبق معادله‌ی زیر انجام می‌گیرد:

$$\bar{E} = 20 \times 365 \times 24 \times \bar{P} \quad (۱۰)$$

در معادله‌ی (۱۰)، میزان انرژی متوسط تولید شده (\bar{E}) بر حسب توان متوسط تولید شده (\bar{P}) برای کل طول عمر سیستم تبدیل انرژی باد محاسبه می‌شود. طبق معادله‌ی (۹)، عامل ظرفیت به صورت میزان انرژی تولید شده خروجی نسبت به انرژی قابل تولید توسط توربین در حالتی که راندمان توربین صددرصد باشد، تعریف می‌شود. عامل ظرفیت، عاملی است که به مشخصات توربین و شرایط جغرافیایی منطقه از نظر آب و هوایی و در حقیقت میزان وزش باد بستگی دارد. اندازه‌ی این عامل با استفاده از مشخصات تابع توزیع باد طبق رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید (تورس و همکاران، ۲۰۰۳).

$$C_f = \frac{\exp(-(\frac{V_i}{c})k) - \exp(-(\frac{V_r}{c})k)}{(\frac{V_r}{c})k - (\frac{V_i}{c})k} - \exp(-(\frac{V_0}{c})k) \quad (11)$$

در این رابطه، k و c پارامترهای توزیع وایبول سرعت باد و V_i ، V_r و V_0 به ترتیب به کمینه‌ی سرعت باد، سرعت نامی و بیشینه‌ی سرعت باد اشاره دارند. بعد از تعیین میزان انرژی الکتریکی خروجی کل از توربین، برای تعیین مقدار هزینه‌ی واحد برق تولید شده لازم است ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد محاسبه شود که در ادامه نحوه‌ی تعیین مقدار آن توضیح داده شده است. شایان ذکر است که روش نرخ بازگشت سرمایه نیز می‌تواند یک روش مناسب باشد، اما درجایی ترجیح دارد که محاسبه‌ی درآمد یک فعالیت اقتصادی نیز مدنظر قرار گیرد. از آن‌جا که در این مقاله فروش برق به شبکه مطرح نیست، از روش نرخ بازگشت سرمایه استفاده نشده است.

ارزش فعلی هزینه‌ها

در روش‌های اقتصاد مهندسی تصمیم‌گیری بر اساس معیارهای ارزیابی شناخته شده‌ای انجام می‌گیرد که طبق طبقه‌بندی UNIDO به سه گروه اصلی: (الف) مقادیر مطلق: ارزش فعلی^۱ و ارزش معادل سالانه (یا همان روش مقادیر هم‌تراز شده)

(ب) معیارهای نسبی: نرخ بازگشت^۲ و نسبت هزینه فایده

(ج) معیارهای زمانی: زمان بازگشت سرمایه و دوره‌ی عمر خدمت^۳

تقسیم می‌شوند. بسیاری از این روش‌ها با یکدیگر معادل هستند و از این رو، هر یک از این روش‌ها می‌توانند به طور مستقل برای تصمیم‌گیری به کار روند و ضرورتی برای استفاده از همه‌ی آن‌ها وجود ندارد.

در میان روش‌های مختلف ارزیابی اقتصادی، روش ارزش فعلی یکی از اساسی‌ترین روش‌های ارزیابی اقتصادی پروژه‌هاست. از آن‌جا که در این مقاله هدف، تعیین پارامترهای فنی توربین‌های کوچک با کم‌ترین هزینه‌ی تأمین برق مورد نیاز است و نه سرمایه‌گذاری برای سودآوری، کافی است بررسی با ملاک کم‌ترین ارزش معادل

1- Present Value.

2- Internal Rate of Return.

3- Service Life Method.

یکنواخت هزینه‌ها انجام گیرد. برای تعیین مقدار ارزش فعلی هزینه‌ها، ابتدا می‌بایست تمامی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد دسته‌بندی شده و مقدار هر یک تعیین شود. به‌طور کلی، برخلاف دیگر روش‌های تولید انرژی الکتریکی، تمامی هزینه‌های یک سیستم تبدیل انرژی باد شامل هزینه‌های خرید تجهیزات و لوازم مورد نیاز به‌علاوه‌ی هزینه‌های نصب و راه‌اندازی سیستم می‌شود. در زمان بهره‌برداری از سیستم نیز تنها هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات توربین وجود دارد. به این ترتیب، ارزش فعلی هزینه‌های یک سیستم تبدیل انرژی باد طبق معادله‌ی زیر تعیین می‌شود (باگیورگاس و همکاران، ۲۰۰۷). در این معادله n طول عمر سیستم (۲۰ سال) و i نرخ بهره می‌باشد که برابر با ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. بدیهی است با تغییر این نرخ، در ارقام به دست آمده تغییر مشاهده خواهد شد، اما این ارقام در نتیجه‌گیری کلی که ناظر به کارایی این روش تجزیه و تحلیل و انتخاب قطر و ارتفاع مناسب توربین است، تأثیری نخواهد داشت.

$$PVC = I + C_{omr} \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] - S \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (12)$$

هر یک از انواع هزینه‌ها در معادله‌ی فوق، در زیر توضیح داده شده‌اند:

I : هزینه‌ی سرمایه‌گذاریست که شامل هزینه‌ی دستگاه‌ها و تجهیزات (توربین، مبدل و باتری) به اضافه‌ی هزینه‌ی عملیات‌های عمرانی برای نصب و برپایی توربین و هزینه‌ی کابل و سیم‌های ارتباطی می‌شود. در این‌جا فرض شده است هزینه‌های عمرانی و اتصالات به‌طور ثابت و به‌صورت درصدی از هزینه‌ی توربین (۳۰٪) محاسبه شوند. هزینه‌های مربوط به دستگاه‌ها و تجهیزات سیستم، از پایگاه اطلاعاتی برخی شرکت‌های معتبر که در این زمینه فعالیت دارند، استخراج شده است.^۱ شایان یادآوری است که چون سیستم، غیرمتصل به شبکه‌ی (Off-Grid) است، هزینه‌ی باتری برای ذخیره سازی انرژی باید جزء هزینه‌ی اولیه در نظر گرفته شود.

C_{omr} : هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات توربین در طول دوره‌ی بهره‌برداری از سیستم تبدیل انرژی باد می‌باشد. این هزینه به‌صورت سالیانه تعیین شده است که با قرار گرفتن در معادله‌ی (۱۲) ارزش فعلی آن به‌دست می‌آید. در این مقاله فرض شده است که مقدار این هزینه به‌صورت درصدی از هزینه‌ی سالیانه‌ی توربین محاسبه

می‌شود. منظور از هزینه‌ی سالیانه‌ی توربین، مقدار هزینه‌ی خرید توربین برای یک‌سال است که از تقسیم هزینه‌ی توربین به طول عمر سیستم به‌دست می‌آید.

S: ارزش اسقاطی است که کل سیستم تبدیل انرژی باد در پایان طول عمر خود یعنی در انتهای سال بیستم دارد. ارزش اسقاط براساس هزینه‌ی توربین و هزینه‌های عمرانی نصب و برپایی آن، به‌صورت ثابت (با فرض ۱۰٪) تعیین می‌شود.

با در دست داشتن ارزش فعلی هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات به‌علاوه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و کاهش مقدار فعلی ارزش اسقاط از آن، می‌توان ارزش فعلی هزینه‌ی سیستم تبدیل انرژی باد را طبق (۱۳) محاسبه کرد، بنابراین تا این مرحله، با مشخص بودن ارزش فعلی هزینه‌ها و مقدار انرژی الکتریکی خروجی کل، می‌توان هزینه‌ی واحد برق را به ازای توان متوسط به‌دست آورد. در قسمت بعد چگونگی ارتباط فاکتورهای تأثیرگذار بر هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین، برای تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد و همچنین نحوه‌ی برآورد روابط ریاضی بین آن‌ها ارائه شده است.

۵- تعیین روابط ریاضی

هدف از این بخش تعیین روابطی است که به کمک آن‌ها بتوان بر اساس سطح درآمد خانوار و به دنبال آن مقدار هزینه‌ای که از سوی خانوار به ازای هر کیلو وات ساعت مصرف برق پرداخت می‌شود، تمامی خصوصیات یک سیستم تبدیل انرژی باد را تعیین کرد. طبق آن‌چه در معادله‌ی (۸) بیان شده است، مقدار هزینه‌ی واحد برق تولید شده (CPU)، از یک سو به ارزش فعلی هزینه‌ها (PVC) و از سوی دیگر به انرژی الکتریکی خروجی کل (E_{out}) بستگی دارد.

ارزش فعلی هزینه‌ها نیز از مشخصات فیزیکی سیستم تبدیل انرژی باد، که مهم‌ترین جزء آن توربین بادی است، تأثیر می‌گیرد. طبق توضیحاتی که در قسمت ۴-۱ مقاله ارائه شده است، مقدار انرژی الکتریکی خروجی کل براساس انرژی متوسط تولید شده که به کمک توان متوسط تولید شده توسط توربین به‌دست می‌آید، محاسبه می‌شود. توان متوسط نیز طبق معادله‌ی (۷)، به قطر روتور و پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد بستگی دارد، بنابراین تا این مرحله می‌توان گفت که هزینه‌ی واحد برق به دو عامل قطر روتور توربین، که برای تعیین اندازه‌ی توربین استفاده می‌شود، و همچنین پارامتر

مقیاس توزیع وایبول سرعت باد بستگی دارد. از سویی مقدار پارامتر مقیاس، تابعی از میزان ارتفاع از سطح زمین است و با آن رابطه‌ی مستقیم دارد. پس با تغییر ارتفاع، مقدار پارامتر مقیاس طبق معادله‌ی زیر تغییر خواهد کرد (پترسون و هِنسی، ۱۹۷۷):

$$c_2 = c_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (13)$$

در معادله‌ی (۱۳)، c_1 مقدار پارامتر مقیاس توزیع سرعت باد در ارتفاع $h_1 = 10$ متر و c_2 مقدار این پارامتر در ارتفاع h_2 است که باید محاسبه شود، بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هزینه‌ی واحد برق تابعی از دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین است. در حقیقت تغییر در مقدار این دو عامل از یک سو سبب تغییر در ارزش فعلی هزینه‌ها شده و از سوی دیگر میزان انرژی الکتریکی خروجی کل را تغییر می‌دهد. تحلیل حساسیت و تشخیص نوع روابط بین دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین با هزینه‌ی واحد برق، طی دو مرحله انجام می‌شود. بدین صورت که در مرحله‌ی اول با ثابت در نظر گرفتن اندازه‌ی قطر روتور، تغییرات هزینه‌ی واحد برق در ارتفاعات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده از این مرحله در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول برای هر یک از چهار منطقه‌ی مورد نظر، با فرض ثابت نگه‌داشتن عامل قطر روتور، مقدار هزینه‌ی واحد برق به ازای شش ارتفاع مختلف پایه‌ی توربین محاسبه شده است. با در دست داشتن پارامترهای وایبول، سرعت باد برای هر منطقه و تعیین مقدار توان متوسط تولید شده، هزینه‌ی واحد برق براساس ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد و همچنین مقدار انرژی الکتریکی خروجی کل طبق روابط گفته شده، محاسبه می‌شود. در ستون آخر این جدول هزینه‌ی واحد برق براساس ریال به ازای هر کیلو وات ساعت ($1 = \text{USD} 11000 \text{ Rial}$) برآورد شده است. همچنین نتایج به‌دست آمده از این مرحله در شکل (۳) به‌صورت نمودار نشان داده شده است. طبق این نمودار، رابطه‌ی ریاضی بین هزینه‌ی واحد برق و ارتفاع پایه‌ی توربین با تقریب بالا به‌صورت نمایی قابل بیان است. براساس تخمین‌های انجام گرفته، تقریب نمایی نسبت به دیگر تقریب‌ها ضریب همبستگی بالاتری (حدود $0.99/6$) بین هزینه‌ی واحد برق در ارتفاع پایه‌ی توربین نشان داده است، بنابراین، رابطه‌ی نهایی هزینه‌ی واحد برق تولید شده برحسب دلار بر کیلووات ساعت نسبت به ارتفاع پایه‌ی توربین با کم‌ترین

میزان خطا برای مناطق با سرعت متوسط بین 10 m/s و 9 در ارتفاع 80 متر به صورت زیر برآورد می‌شود:

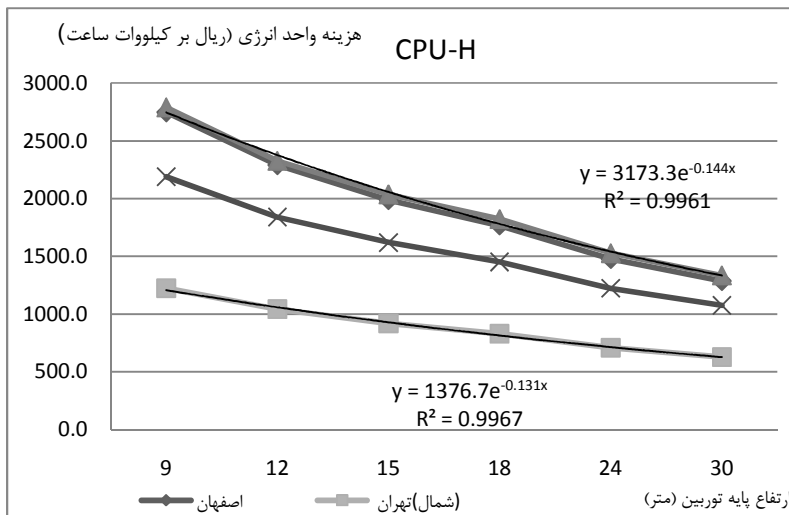
$$\text{CPU} = 0.2e^{-0.15h}$$

(۱۴)

جدول ۲- تحلیل حساسیت هزینه‌ی واحد برق (ریال) نسبت به تغییرات ارتفاع پایه‌ی توربین برای مناطق مورد نظر (قطر توربین = 3 متر)

مناطق مورد نظر	h (m)	c (m/s)	k	V_i (m/s)	V_r (m/s)	V_o (m/s)	C_f	(W)	(kW)	(kW)	PVC (S)	(Rial/kWh)
شمال تهران	۹	۴.۴۳						۲۰۴۴.۷۴	۳۵۸۲۳۹.۲	۸۷۷۶۸.۶۱	۹۷۶۱.۸۲	۱۲۲۳.۲
	۱۲	۴.۴۰	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰		۲۳۱۳.۰۵	۴۰۵۲۴۵.۶	۱۰۳۷۴۲.۸۸	۹۸۳۰.۱۵	۱۰۴۲.۸
	۱۵	۴.۵۵						۲۵۴۵.۱۷	۴۴۵۹۱۴.۱	۱۱۸۶۱۳.۱۵	۹۸۹۸.۹۶	۹۱۸.۵
	۱۸	۴.۶۷						۲۷۵۲.۰۲	۴۸۲۱۵۴.۳	۱۳۲۱۱۰.۲۷	۹۹۶۸.۲۶	۸۳۰.۵
	۲۴	۴.۸۶						۳۱۱۳.۱۳	۵۴۵۴۲۰.۲	۱۵۵۹۹۰.۱۷	۱۰۰۳۸.۰۳	۷۰۸.۴
	۳۰	۵.۰۲						۳۴۲۵.۵۵	۶۰۰۱۵۵.۹	۱۷۷۰۴۵.۹۸	۱۰۱۰۸.۳۰	۶۲۸.۱
مراغه	۹	۴.۷۰						۱۱۹۱.۰۰	۲۰۸۶۲.۵	۴۹۰۳۵.۶۹	۹۷۶۱.۸۲	۲۱۹۰.۱
	۱۲	۴.۹۰	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰		۱۳۴۷.۲۷	۲۳۶۰۴۲.۲	۵۸۷۷۴.۵۰	۹۸۳۰.۱۵	۱۸۴۰.۳
	۱۵	۵.۰۵						۱۴۸۲.۴۸	۲۵۹۷۳۰.۲	۶۷۲۷۰.۱۲	۹۸۹۸.۹۶	۱۶۱۹.۲
	۱۸	۵.۱۹						۱۶۰۲.۹۶	۲۸۰۸۳۸.۹	۷۵۵۴۵.۶۷	۹۹۶۸.۲۶	۱۴۵۲
	۲۴	۵.۴۱						۱۸۱۳.۲۹	۳۱۷۶۸۹.۲	۹۰۲۳۲.۷۳	۱۰۰۳۸.۰۳	۱۲۲۴.۳
	۳۰	۵.۵۸						۱۹۹۵.۲۷	۳۴۹۵۷۰.۹	۱۰۳۴۷۲.۹۹	۱۰۱۰۸.۳۰	۱۰۷۴.۷
شهر بابک	۹	۴.۸۳	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰		۹۸۵.۱۷	۱۷۲۶۰.۲	۳۸۴۹۰.۲۵	۹۷۶۱.۸۲	۲۷۸۹.۶
	۱۲	۵.۰۳						۱۱۱۴.۴۴	۱۹۵۲۵۰	۴۶۴۶۹.۵۰	۹۸۳۰.۱۵	۲۳۲۶.۵
	۱۵	۵.۱۹						۱۲۲۶.۲۸	۲۱۴۸۴۴.۳	۵۳۴۹۶.۲۴	۹۸۹۸.۹۶	۲۰۳۵
	۱۸	۵.۳۳						۱۳۲۵.۹۴	۲۳۲۳۰.۵۱	۶۰۱۶۷.۰۱	۹۹۶۸.۲۶	۱۸۲۲.۷
	۲۴	۵.۵۵						۱۴۹۹.۹۳	۲۶۲۷۸۷	۷۲۲۶۶.۴۲	۱۰۰۳۸.۰۳	۱۵۲۷.۹
	۳۰	۵.۷۳						۱۶۵۰.۴۵	۲۸۹۱۵۹	۸۳۲۷۷.۸۰	۱۰۱۰۸.۳۰	۱۳۳۵.۴
اصفهان	۹	۴.۸۱	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰		۸۲۷.۹۷	۱۴۵۰۶۰.۱	۲۹۸۸۲.۳۷	۹۷۶۱.۸۲	۳۵۹۳.۷
	۱۲	۵.۰۱						۹۳۶.۶۱	۱۶۴۰۹۴.۱	۳۶۱۰۰.۷۱	۹۸۳۰.۱۵	۲۹۹۵.۳
	۱۵	۵.۱۷						۱۰۳۰.۶۰	۱۸۰۵۶۱.۸	۴۱۸۹۰.۳۴	۹۸۹۸.۹۶	۲۵۹۹.۳
	۱۸	۵.۳۱						۱۱۱۴.۳۶	۱۹۵۲۳۶.۴	۴۷۴۴۲.۴۳	۹۹۶۸.۲۶	۲۳۱۱.۱
	۲۴	۵.۵۳						۱۲۶۰.۵۸	۲۲۰۸۵۴.۳	۵۷۲۰.۱۲۶	۱۰۰۳۸.۰۳	۱۹۳۰.۵
	۳۰	۵.۷۱						۱۳۸۷.۰۹	۲۴۳۰۱۸.۲	۶۶۱۰۰.۹۴	۱۰۱۰۸.۳۰	۱۶۸۱.۹

مرجع: یافته‌های تحقیق



نمودار ۳ - نمودار رابطه‌ی هزینه‌ی واحد برق با قطر ۳ متر (توان نامی ۵ کیلووات) نسبت به ارتفاع پایه‌ی توربین برای مناطق مورد نظر

مرحله‌ی دوم مربوط به برآورد رابطه‌ی ریاضی بین هزینه‌ی واحد برق نسبت به قطر روتور، با فرض ثابت نگه‌داشتن ارتفاع پایه‌ی توربین، برای هر یک از مناطق مورد بررسی می‌باشد. در جدول (۳)، هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین برای هر یک از مناطق به ازای توربین‌های با اندازه‌های متفاوت، با مشخصاتی که در جدول (۴) آمده، ارائه شده است، بنابراین در این حالت، طبق معادله‌ی (۷) در هر منطقه عامل متغیر در تعیین مقادیر متفاوت \bar{P} ، قطر روتور است. طبق این جدول، حساسیت انرژی خروجی کل نسبت به تغییرات این دو عامل بیش‌تر از ارزش فعلی هزینه‌هاست، بدین معنی که با افزایش این دو عامل مقدار انرژی خروجی کل در مقایسه با ارزش فعلی هزینه‌ها افزایش بیش‌تری از خود نشان می‌دهد و طبق معادله‌ی (۸) مقدار هزینه‌ی واحد برق کاهش می‌یابد.

جدول ۴- مشخصات پنج توربین بادی کوچک

P_r (kW)	D (m)	V_i (m/s)	V_r (m/s)	V_o (m/s)
۴	۲.۷	۲.۱	۱۲	۴۰
۵	۳	۲.۱	۱۲	۴۰
۶	۳.۲	۲.۱	۱۲	۶۰
۷	۳.۵	۲.۱	۱۲	۶۵
۱۰	۴	۲.۱	۱۲	۶۵

مراجع : Wind Turbine Prices of Proven, Turbex and Fortis, 2010

نتایج به‌دست آمده از این مرحله در شکل (۴) نشان داده شده است. برای بیان نوع رابطه‌ی بین هزینه‌ی واحد برق و قطر روتور روابط چندجمله‌ای از درجه‌ی دو با ضریب همبستگی ۹۷٪ تقریب بهتری نسبت به دیگر روابط ریاضی از خود نشان داده است. این به آن جهت است که با افزایش بیش از حد قطر روتور، هزینه‌ی تولید افزایش می‌یابد و می‌توان یک قطر بهینه برای این منظور به دست آورد (زمان و شکوری، ۲۰۱۰). رابطه‌ی تقریبی هزینه‌ی واحد برق تولید شده به دلار بر کیلووات ساعت نسبت به قطر روتور توربین برای مناطق با سرعت متوسط بین ۱۰ و ۹ m/s در ارتفاع ۸۰ متر به صورت زیر برآورد می‌شود. نتیجه‌ی به‌دست آمده از این مرحله یک رابطه‌ی چندجمله‌ای از درجه‌ی دو به صورت زیر است:

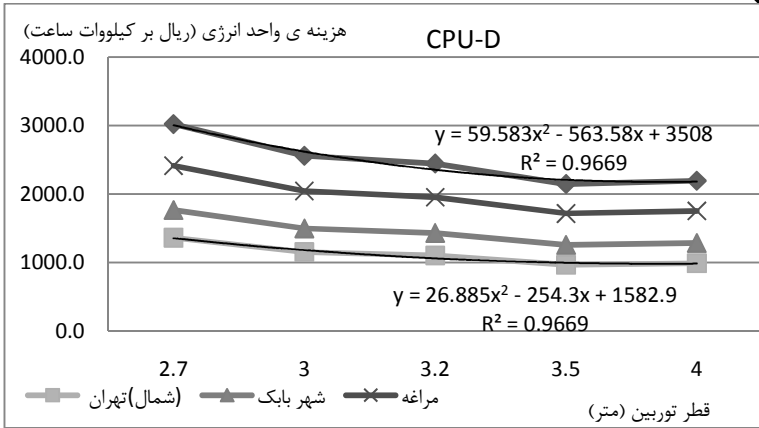
$$CPU = 0.004D^2 - 0.0355D + 0.2208 \quad (15)$$

جدول ۳- تحلیل حساسیت هزینه‌ی واحد برق (ریال) نسبت به تغییرات قطر روتور توربین برای

مناطق مورد نظر (ارتفاع پایه = ۱۰ متر)

مناطق مورد نظر	D (m)	c (m/s)	k	V_i (m/s)	V_r (m/s)	V_o (m/s)	C_f	(W)	(kW)	(kW)	PVC (\$)	(Rial/kWh)
شمال تهران	۲.۷	۴.۲۹	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۹	۱۷۲۷.۵۶	۳۰۲۶۶۷.۸۶	۷۵۳۶۴.۳	۹۳۳۴.۴۲	۱۲۳۹
	۳	۴.۲۹	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۹	۲۱۳۲.۷۹	۳۷۳۶۶۴.۰۲	۹۳۰۴۲.۳۴	۹۷۶۱.۸۲	۱۰۴۹
	۳.۲	۴.۲۹	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۹	۲۴۲۶.۶۴	۴۲۵۱۴۶.۶۲	۱۰۵۸۶۱.۵	۱۰۶۱۶.۶۴	۱۰۰۳
	۳.۵	۴.۲۹	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۹	۲۹۰۲.۹۶	۵۰۸۵۹۸.۲۵	۱۲۶۶۴۱	۱۱۱۵۰.۸۹	۸۸۱
	۴	۴.۲۹	۰.۹۴	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۹	۳۷۹۱.۶۲	۶۶۴۲۹۱.۵۹	۱۴۸۹۰.۷	۱۴۸۹۰.۷	۹۰۰
مراغه	۲.۷	۴.۷۷	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۰	۱۰۱۲.۳۰	۱۷۷۳۴۹.۹۵	۴۲۵۶۵.۱۹	۹۳۳۴.۴۲	۲۱۹۳
	۳	۴.۷۷	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۰	۱۲۴۹.۷۵	۲۱۸۹۵۶.۷۳	۵۲۵۴۹.۶۲	۹۷۶۱.۸۲	۱۸۵۸
	۳.۲	۴.۷۷	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۰	۱۴۲۱.۹۴	۲۴۹۱۲۴.۱۱	۵۹۷۸۹.۷۹	۱۰۶۱۶.۶۴	۱۷۷۶
	۳.۵	۴.۷۷	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۰	۱۷۰۱.۰۵	۲۹۸۰۲۴.۴۴	۷۱۵۲۵.۸۷	۱۱۱۵۰.۸۹	۱۵۵۹
	۴	۴.۷۷	۱.۲۱	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۴۰	۲۲۲۱.۷۸	۳۸۹۲۵۶.۴۲	۹۳۴۲۱.۵۴	۱۴۸۹۰.۷	۱۵۹۴
شهر بابک	۲.۷	۴.۹۰	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۳۹۷	۸۳۴.۸۵	۱۰۳۰.۶۸	۱۴۶۲۶۵.۲۷	۹۳۳۴.۴۲	۱۶۰۸
	۳	۴.۹۰	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۳۹۷	۱۱۷۲.۶۸	۱۸۰۵۷۴.۴۱	۱۸۰۵۷۴.۴۱	۹۷۶۱.۸۲	۱۳۶۲
	۳.۲	۴.۹۰	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۳۹۷	۱۱۷۲.۶۸	۲۰۵۴۵۳.۵۵	۸۱۵۶۵.۰۶	۱۰۶۱۶.۶۴	۱۳۰۲
	۳.۵	۴.۹۰	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۳۹۷	۱۴۰۲.۸۶	۲۴۵۷۸۱.۸۳	۹۷۵۷۵.۳۹	۱۱۱۵۰.۸۹	۱۱۴۳
	۴	۴.۹۰	۱.۳۵	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۳۹۷	۱۸۳۲.۳۱	۳۲۱۰۲۱.۱۶	۱۲۷۴۴۵.۴	۱۴۸۹۰.۷	۱۱۶۸
صفهان	۲.۷	۴.۸۸	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۱۱	۷۰۳.۲۴	۱۲۳۲۰.۷۲۵	۲۵۹۹۶.۷۳	۹۳۳۴.۴۲	۳۵۹۱
	۳	۴.۸۸	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۱۱	۸۶۸.۱۹	۱۵۲۱۰.۷۷۲	۳۲۰۹۴.۷۳	۹۷۶۱.۸۲	۳۰۴۲
	۳.۲	۴.۸۸	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۱۱	۹۸۷.۸۱	۱۷۳۰۶۴.۷۸	۳۶۵۱۶.۶۷	۱۰۶۱۶.۶۴	۲۹۰۷
	۳.۵	۴.۸۸	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۱۱	۱۱۸۱.۷۱	۲۰۷۰۳۵.۵	۴۳۶۸۴.۴۹	۱۱۱۵۰.۸۹	۲۵۵۳
	۴	۴.۸۸	۱.۴۶	۲.۱	۱۲	۴۰	۰.۲۱۱	۱۵۴۳.۴۶	۲۷۰۴۱۳.۷۲	۵۷۰۵۷.۲۹	۱۴۸۹۰.۷	۲۶۱۰

مرجع : یافته های تحقیق



مرجع: یافته‌های تحقیق

شکل ۴- نمودار رابطه‌ی هزینه‌ی واحد برق در ارتفاع ۱۰ متر نسبت به قطر روتور توربین برای مناطق مورد نظر

بنابراین با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵)، تمامی جزئیات سیستم تبدیل انرژی باد با دست داشتن مقدار هزینه‌ی واحد برق قابل محاسبه است. فقط کفایت هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین، با هزینه‌ی واحد برق مصرف شده به ازای هر کیلو وات ساعت برای خانوار جایگزین شود. هزینه‌ی واحد برق مصرف شده بر اساس میزان درآمد خانوار و مقدار هزینه‌ای که به ازای هر کیلو وات ساعت مصرف از سوی خانوار پرداخت شده، تعیین می‌شود.

برای این منظور، ابتدا بر اساس صورت حساب مصرف برق یک خانوار، میانگین هزینه‌ی واحد برق مصرف شده از تقسیم کل مبلغ پرداختی بر میزان کل مصرف برق محاسبه می‌شود. سپس با قرار دادن این هزینه به جای هزینه‌ی واحد برق در معادله‌های (۱۴) و (۱۵)، به ترتیب ارتفاع پایه‌ی توربین و قطر روتور حاصل می‌شود. حال با دست داشتن مقدار این دو عامل و جایگزین کردن آن‌ها در هر یک از معادله‌های بیان شده، می‌توان همه‌ی جزئیات سیستم تبدیل انرژی باد را به دست آورد. این روابط از این نظر که می‌تواند اطلاعات مورد نیاز برای نصب و راه‌اندازی یک سیستم تبدیل انرژی باد را برای یک خانوار فراهم کند، بسیار حائز اهمیت هستند. همچنین این روابط قابلیت استفاده در همه‌ی زمینه‌های بهره‌برداری از توربین‌های بادی را دارند و می‌توان از آن‌ها برای به دست آوردن تمامی اطلاعات لازم بر حسب میزان هزینه‌ای که متقاضی به ازای

واحد برق مصرفی حاضر به پرداخت آن است، استفاده کرد. هم‌چنین طبق اطلاعات جدول (۲) و (۳)، تفاوت هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین با هزینه‌ی واحد برق بدون یارانه‌ای که به‌وسیله‌ی نیروگاه‌های آبی فعلی در ایران تولید می‌شود (دست کم ۸۰۰ ریال برای هر کیلو وات ساعت)، ناچیز است. البته این تمایز در قطر روتور ۳/۵ متر و ارتفاع‌های پایه‌ی توربین بالاتر بسیار کم‌تر است.

علاوه بر این، آن‌چه سبب برتری استفاده از سیستم تبدیل انرژی باد در مناطق روستایی می‌شود، هزینه‌های توزیع و انتقال برق برای این مناطق و اختلاف قابل توجه هزینه‌ی نهایی برق برای مصرف‌کننده با این سیستم است. هم‌چنین در مناطق شهری با وجود ساختمان‌های بلند، در صورت نصب توربین‌های بادی بر پشت بام منازل می‌توان با کاهش ارتفاع پایه‌ی توربین و هزینه‌های آن (تا ۵۰٪)، ارزش فعلی هزینه‌ی سیستم تبدیل انرژی باد و به دنبال آن هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین را کاهش داد. با در نظر گرفتن این موارد، تولید برق توسط توربین‌های بادی نسبت به انرژی‌های تجدیدناپذیر دارای برتری است و می‌توان این نوع تولید پراکنده را جایگزین مناسبی برای توسعه‌ی روش‌های معمول و متمرکز تولید برق در ایران دانست.

نرخ بازگشت و زمان بازگشت سرمایه برای یک حالت نمونه

گرچه محاسبات بالا برای انتخاب مشخصات فنی یک توربین کوچک خانگی کافی است، با این وجود در انتهای این بخش به طور نمونه یک مورد توربین انتخابی از نظر اقتصادی بررسی و نرخ بازگشت و زمان بازگشت سرمایه برای آن ارائه می‌شود. فرض می‌شود تأمین برق ۴۵ آمپر (حدود ۱۰ کیلووات) در منطقه‌ای مانند شمال تهران مورد نیاز باشد. فرض می‌شود با توجه به محدودیت‌های موجود، طبق سطر پنجم از جدول ۳ مربوط به شمال تهران، یک توربین با قطر ۴ متر در ارتفاع ۱۰ متر نصب شود. هزینه‌ی اولیه‌ی این توربین برابر با ۱۵۳۰۰ دلار (ارزش و نصب)، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه‌ی آن برابر ۱۶۲ دلار و ارزش اسقاطی آن پس از ۲۰ سال در حدود ۱۴۳۰ دلار برآورد شده است. با ضریب ظرفیت ۲۵٪ در شمال تهران، طبق روابط (۷)، (۹) و (۱۰)، انرژی سالانه‌ی خروجی برابر خواهد بود با:

$$E_{\text{out}} = E \times C_f = 24 \times 365 \times (0.3925 \times 7.67 \times 4^2 \times 4.29^3) \times 0.25 = 8.27 \text{ MWh}$$

چنان‌چه ارزش برق تولیدی ۱۳۰۰ ریال فرض شود، نرخ بازگشت برابر با ۱/۴٪ به‌دست خواهد آمد که تنها به مفهوم امکان تأمین برق با هزینه‌ای در حد معمول (پس از حذف یارانه‌ها) می‌باشد و با زمان بازگشت نزدیک به عمر توربین (۲۰ سال)، سرمایه‌گذاری در این زمینه را بدون جذابیت می‌نمایاند. شایان ذکر است که با افزایش نرخ برابری دلار به ۱۲۶۰۰ ریال و یا کاهش ارزش برق تولیدی به حدود ۱۱۰۰ ریال، نرخ بازگشت و در نتیجه زمان بازگشت نیز صفر خواهد شد. این موضوع دلیل کافی برای عدم تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در این انرژی پاک را فراهم می‌کند.

در یک تحلیل حساسیت ساده می‌توان دریافت که افزایش عمر توربین به ۲۵ سال، نرخ بازگشت را تا حدود ۲/۲٪ می‌افزاید و با افزایش عمر تا ۳۰ سال، که قطعاً نیازمند تعمیر و نگهداری بسیار خوب و شرایط آب و هوایی مساعد است، به نرخ بازگشت ۳/۲٪ حاصل می‌شود. این نتایج با نتایج به دست آمده از سایر مطالعات و مراجع نیز هم‌خوانی دارد (گوکچک و سردار جنک، ۲۰۰۹؛ باگیورگاس و همکاران، ۲۰۰۷).

۶- نتیجه‌گیری

به‌دلیل افزایش بهره‌برداری از انرژی‌های نو می‌بایست اقدامات اساسی در زمینه‌سازی برای گسترش استفاده از این نوع انرژی‌ها انجام گیرد. از جمله‌ی این انرژی‌ها، انرژی بادی است که می‌تواند به عنوان یک انرژی اولیه برای تأمین برق مورد نیاز استفاده شود. در این مقاله که در زمینه‌ی بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک برای تأمین تقاضای برق در بخش خانگی ارائه شده است، خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد با بررسی عوامل تأثیرگذار بر آن تعیین می‌شود. این عوامل را می‌توان به دو دسته‌ی خصوصیات توربین بادی و شرایط جغرافیایی منطقه تقسیم‌بندی کرد که طبق بررسی‌های انجام گرفته بر روی میزان انرژی الکتریکی خروجی کل و به دنبال آن هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین، قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین به‌ترتیب به عنوان منشاء هر کدام از دو عامل فوق تعیین شده‌اند. از آن‌جا که هزینه‌ی واحد برق تولید شده توسط توربین برای مصرف‌کننده اهمیت بالایی دارد، در این مقاله رابطه‌ی ریاضی بین دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی توربین با هزینه‌ی واحد برق برآورد شده است. بر اساس تحلیل‌های انجام گرفته برای چهار منطقه با شرایط جغرافیایی متفاوت،

رابطه‌ی ریاضی بین هزینه‌ی واحد برق با ارتفاع پایه‌ی توربین به‌صورت نمایی و رابطه‌ی آن با قطر روتور به‌صورت چندجمله‌ای از درجه‌ی دو با ضریب همبستگی بالا به‌دست آمده است. با استفاده از این روابط، با در دست داشتن هزینه‌ی واحد برق مصرف شده توسط خانوار و به دنبال آن تعیین مقادیر دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه‌ی مورد نیاز برای توربین، می‌توان تمامی اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری و انتخاب یک سیستم تبدیل انرژی باد را که بتواند برق مورد نیاز خانوار را تأمین کند، به‌دست آورد. به علاوه به کمک این روابط می‌توان جزئیات مورد نیاز را نیز برای نصب و راه‌اندازی سیستم‌هایی که در آن‌ها از توربین‌های بزرگ استفاده می‌شود، تعیین کرد.

مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که در مناطق روستایی، مزارع و باغات که دسترسی به خطوط انتقال و توزیع وجود ندارد، هم‌چنین برای تأمین برق خانگی برخی شهرها، هزینه‌ی برق تولید شده با هزینه‌ی تمام شده‌ی فعلی در کشور و قیمت‌های واقعی قابل رقابت است، اما توجه کافی برای سرمایه‌گذاری به عنوان یک طرح تجاری را ندارد.

فهرست منابع

وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۸.

Ahmed Shata A.S. and Hanitsch R. (2008), "Electricity Generation and Wind Potential Assessment at Hurghada, Egypt", *Renewable Energy*, 33, 141-8.

Ahmed Shata, A.S. and Hanitsch, R. (2006), "Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation on the Coast of Mediterranean Sea in Egypt", *J. of Renewable Energy*, 31, 1183-1202.

Ameri, M., Ghadiri, M. and Hosseini, M. (2006), "Recent Advances in the Implementation of Wind Energy in Iran", *The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment, Bangkok, Thailand*.

Ameri, M., Lari, H.R. (1997), "The Study of Iran's Wind Energy Potential and Economics", *Proceedings of the JSME ICFE 97*, 629-632.

Bagiorgas H.S., Assimakopoulos M.N., Theoharopoulos D., Matthopoulos D. and Mihalakakou G.K. (2007), "Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece", *Energy Convers Manage*, 48, 1640-55.

Bansal, R.C., Bhatti, T.S. and Kothari, D.P. (2002), "On Some of the Design Aspects of Wind Energy Conversion Systems", *Energy Conversion Management*, 43, 2175–2187.

Barber, D.A, Court, A. and Hewson, E.W. (1977), "Wind Characteristics. Wind Energy Over The United States. Final Report", Wind Energy Mission Analysis, ERDA Contract at (04-3)-1075, Lockheed-California Company; [chapter 3].

Clarke, S. (2003). "Electricity Generation Using Small Wind Turbines at Your Home or Farm", Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm>.

El-Mallah, A. and Soltan, A.M. (1989), "A Nomogram for Estimating Capacity Factors of Wind Turbines Using Site and Machine Characteristics", *Sol Wind Technology*, 6, 633–635.

Gokcek, Murat, Serdar Genc, Mustafa, (2009), "Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECSs) in Central Turkey", *Applied Energy* 86, 2731–2739.

Gupta B.K. (1986). "Weibull Parameters for Annual and Monthly Wind Speed Distributions for Five Locations in India". *J. of Solar Energy*, 37, No. 6, 469–471.

Hennessey, J.P. (1977), "Some Aspects of Wind Power Statistics", *J. of Appl Meteor*, 16, 119–128.

International Energy Agency (IEA), (2009), *Technology Roadmap: Wind Energy*.

Iran's New Energy Department. (2006), http://www.irses.org/pdf/87/87_4.pdf.

Lu, L., Yang, H. and Burnett, J. (2002), "Investigation on Wind Power Potential on Hong Kong Islands – An Analysis of Wind Power and Wind Turbine Characteristics", *J. of Renewable Energy*, 27, 1–12.

Lun, Isaac Y.F. and Joseph C. Lam. (2000), "A Study of Weibull Parameters Using Long-Term Wind Observations", *J. of Renewable Energy*, 20, 145-153.

Naci Celik, Ali, (2003), "Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data", *J Wind Eng Ind Aerodyn*; 91.

Nowrouzi, A. and Sadeghian, A. (2005), "Study of Wind Measurement Stations to Determine Wind Potential in Manjil Area", *Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC 2005)*, 81-86.

- Peterson, E.W. and Hennessey, J.P. (1977), "On the use of power laws for estimates of wind power potential", *J. of Appl Meteor*, 17, 390-394.
- Rai, G.D. (2000). "Non-conventional Energy Sources (4th ed.)", Khanna Publishers, New Delhi, India.
- Rehman S, Halawnai TO, Mohandes M. (2003), "Wind power cost assessment at twenty locations in the Kingdom of Saudi Arabia", *Renew Energy*; 28: 573-83.
- Rehman, S.(2004), "Prospects of wind farm development in Saudi Arabia", *Renew Energy*; 30(3):447-63.
- Renewable Energy- Policy Network for the 21st Century (2011), *Renewable 2011: Global Status Report*.
- Sahin, A.Z. and Aksakal, A., (1998), "Wind Power Energy Potential at the Northeastern Region of Saudi Arabia", *J. of Renewable Energy*, 14, 435-440.
- Sarkar, M. and Hussain, M. (1991), "The Potential of Wind Electricity Generation in Bangladesh", *J. of Renewable Energy*, 1, 855-857.
- Stevens M.J.M. and Smulders, P.T. (1979), "The Estimation of The Parameters of The Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Utilization Purposes". *Wind Engineering*, 3, No. 2, 132-45.
- Tennis MW, Clemmer S, Howland J.,(2006), "Assessing wind resources: a guide for landowners", Project Developers and Power Suppliers, Union of Concerned Scientist.
- Torres, J.L., Prieto, E., Garcia, A., De Blas, M., Ramirez, F. and De Francisco, A. (2003), "Effects of The Model Selected for The Power Curve on The Site Effectiveness and The Capacity Factor of a Pitch Regulated Wind Turbine", *J. of Solar Energy*, 74, 93-102.
- Ucar, A. and Balo, F. (2008), "Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind-Generation Potentiality in Uludag-Bursa, Turkey", *J. of Applied Energy*, 86, 333-339.
- U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, "Small Wind Electric System, An Alaska Customers' Guide.pdf".
- World Wind Energy Association (WWEA), (2010), "World wind energy report 2009", Bonn: World Wind Energy Association; 2010.
- www.provenenergy.com%252F [Wind turbine characteristics and Proven price list (in GBP)].

www.turbex.co.za%252Fgenprices.html [Turbex price list of wind generators, towers and other instruments (in USD)].

www.fortiswindenergy.com%252Feng%252Fprices.asp [Fortis prices of complete systems for utility (in €)].

Zaman, H.; Shakouri G, H. (2010), “A simple nonlinear mathematical model for wind turbine power maximization with cost constraints”, Energy, Power and Control (EPC-IQ), 1st International Conference on, 2010, Page(s): 255 – 258.

Archive of SID