

# فرآیند تصمیم‌گیری برای تعیین اقتصادی مشخصات سیستم مبدل انرژی بادی در چهار منطقه متمایز ایران

آرش حاتمی<sup>۱</sup>، حامد شکوری گنجوی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۸۸/۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۸۸/۱۱/۵

## چکیده:

در این مقاله به بررسی نقش پارامترهای تأثیرگذار در تعیین خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد برای بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک در جهت برآورده‌سازی تقاضا در بخش خانگی، پرداخته شده است. بطور کلی تمامی عوامل تأثیرگذار بر سیستم تبدیل انرژی باد به دو دسته عوامل تعیین‌کننده خصوصیات توربین و همچنین شرایط جغرافیایی محل نصب توربین تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجا که انتخاب این سیستم برای مصرف‌کننده از نظر هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین اهمیت زیادی دارد، در این مقاله روابط ریاضی بین دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه توربین و هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین تعیین شده است. این دو فاکتور بعنوان دو فاکتور اصلی متأثر از فاکتورهای متعدد دیگر، به ترتیب مرتبط با خصوصیات توربین و شرایط جغرافیایی محل هستند. برای بررسی تأثیر هر کدام از دو فاکتور فوق و همچنین افزایش دقت محاسبات انجام گرفته، از توربین‌های با توان‌های مختلف و همچنین 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 پوشش می‌دهند، استفاده شده است. با در دست داشتن میزان درآمد خانوار و به دنبال آن مقدار هزینه پرداختی از سوی خانوار به ازای هر کیلوواتساعت مصرف برق، می‌توان با استفاده از این روابط به راحتی مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد را تعیین نمود. لذا به دلیل نقش مهمی که این روابط می‌توانند در تعیین خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد ایفا کنند، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی در این راستا، از آنها استفاده گردد.

## کلمات کلیدی:

سیستم تبدیل انرژی باد،  
ارزیابی پتانسیل انرژی باد،  
انرژی‌های تجدیدپذیر

## 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. استفاده از انرژی‌های جدید بدلیل پایان‌ناپذیر بودن و همچنین داشتن آلودگی زیست محیطی در حد صفر جایگزین مناسبی برای منابع فسیلی خواهد بود. همان‌طور که امروزه کشورهایی از جمله آلمان در این زمینه رتبه‌های نخست در زمینه بهره‌برداری از این نوع انرژی را دارند. از جمله این منابع، انرژی باد است که از آن برای تولید انرژی الکتریسیته استفاده می‌شود. تولید انرژی الکتریسیته بسته به اندازه سیستم تبدیل انرژی باد، در سه سطح کوچک، تمرکز این مقاله، بر بهره‌برداری از سیستم تبدیل انرژی باد در اندازه کوچک برای تأمین تقاضای برق در بخش خانگی است. عموماً میزان برق تولید شده بوسیله یک سیستم تبدیل انرژی باد و به دنبال آن هزینه واحد برق تولید شده، به دو عامل مشخصات توربین و شرایط جغرافیایی منطقه مورد نظر بستگی دارد [۲]. دسته اول شامل توربین، قطر روتور و ارتفاع پایه توربین است و منظور از شرایط جغرافیایی منطقه نیز، شرایط آب و هوایی و مکانی منطقه است که متأثر از میزان تابش خورشید و درجه حرارت در منطقه، ارتفاع از سطح دریا، میزان پستی و بلندی‌های اطراف آن و بطور کلی تمامی عواملی که در میزان سرعت باد در آن منطقه مؤثرند، می‌باشد [۳]. عموماً تأثیر عامل دوم در مقایسه با عامل اول در تعیین میزان انرژی برق تولید شده بیشتر است. زیرا تعیین کننده سرعت باد و به دنبال آن پتانسیل انرژی باد برای تولید برق در آن منطقه است [۴]. در این مقاله برای منعکس کردن تأثیر این عامل در جهت تعیین خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد، از ارتفاع پایه توربین به عنوان فاکتور تأثیرگذار بر سرعت وزش باد استفاده شده است. در واقع با تغییر ارتفاع پایه توربین، تأثیر پتانسیل انرژی باد بر مقدار و هزینه 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 ارتقای سطح مقدار برق تولید شده توسط سیستم تبدیل انرژی باد شده و کارایی سیستم را افزایش می‌دهد [۵]. 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 [۶]. برای تخمین پتانسیل انرژی باد بر اساس سرعت وزش باد از تابع توزیع احتمالی باد که از نوع توزیع وایبول است، استفاده می‌شود [۷، ۸]. تعیین مقدار دقیق پارامترهای توزیع وایبول سرعت باد، که شامل پارامتر شکل و پارامتر مقیاس است، کار دشوار و پیچیده‌ای است [۹]. بعلاوه مقدار این پارامترها از یک منطقه به منطقه دیگر متغیر است. لذا در این مقاله قبل از تعیین مقدار این پارامترها، ابتدا براساس اطلس باد ایران که در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۰]، 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 بصورت سالیانه در ارتفاع ۸۰ متر،



بین ۳m/s تا بیشتر از ۱۵m/s متغیر است. البته در بیشتر مناطق کشور متوسط سرعت باد در محدوده ۶-۱۱m/s قرار می‌گیرد. لذا برای افزایش تطابق بیشتر نتایج بدست آمده با شرایط جوی کشور ایران از نظر پتانسیل انرژی باد، این چهار منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. در کشور ایران نیز تا کنون اقدامات زیادی در جهت بهره‌برداری از توربین‌های بادی و تولید برق مورد نیاز به کمک آنها صورت گرفته است [۱۱] ولی اکثر فعالیت‌های انجام شده در این زمینه با هدف استفاده از توربین‌های بادی بزرگ برای تولید مقدار انرژی الکتریکی زیاد برنامه‌ریزی شده‌اند [۱۲، ۱۳]. این مقاله با رویکرد بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک برای تأمین برق مورد نیاز در بخش خانگی توجه ویژه‌ای به زمینه‌های توسعه تولید پراکنده دارد و می‌تواند در راستای امکان‌سنجی استفاده از این توربین‌ها در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

در این مقاله بعد از تعیین مقادیر پارامترهای توزیع وایبول بر اساس مشاهدات سرعت باد، روند برآورد هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین بیان شده است. سپس به دلیل همبستگی زیاد مشاهده شده بین هزینه واحد برق و هر یک از دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه توربین و همچنین تأثیر این دو فاکتور در تعیین مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد، معادله ریاضی بین آنها برآورد شده است. به کمک این معادله می‌توان تمامی جزئیات سیستم تبدیل انرژی باد را بر اساس مقدار هزینه واحد برقی که خانوار به ازای میزان مصرف برق خود پرداخت می‌کند، تعیین نمود. در ادامه کلیه این مراحل توضیح داده شده است.

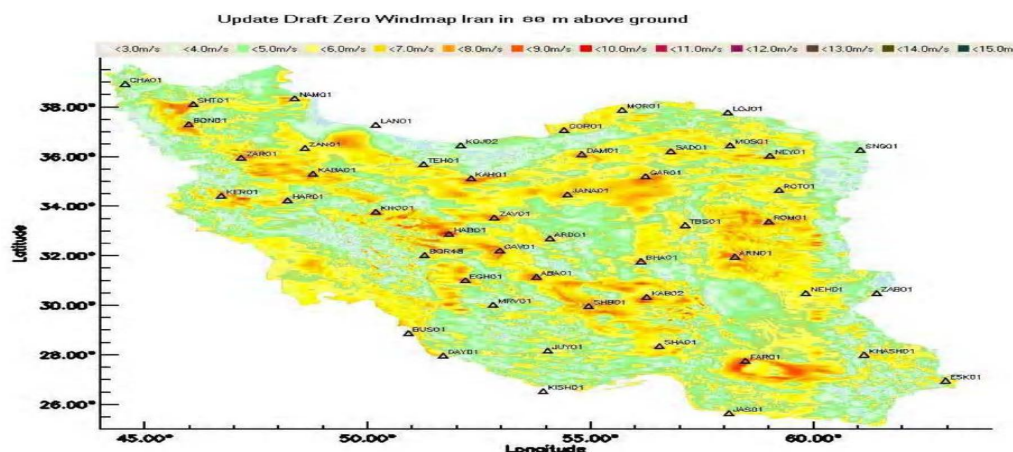
### بررسی خصوصیات باد و توربین بادی

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 منطقه مورد نظر، پارامترهای شکل و مقیاس توزیع وایبول طبق روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$K = \left( \frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{-1.086} \quad (۱)$$

$$C = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+k)} \quad (۲)$$

در معادله‌های فوق،  $\Gamma$  تابع گاما،  $\sigma$  انحراف معیار و  $\bar{V}$  میانگین سرعت وزش باد می‌باشد.  $k$  و  $C$  نیز بترتیب پارامتر شکل و پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد هستند. نتایج بدست آمده برای تعیین مقدار هر یک از این دو فاکتور، با در نظر گرفتن انحراف استاندارد ۴/۴۵ برای مناطق مختلف در جدول (۱) آورده شده است.



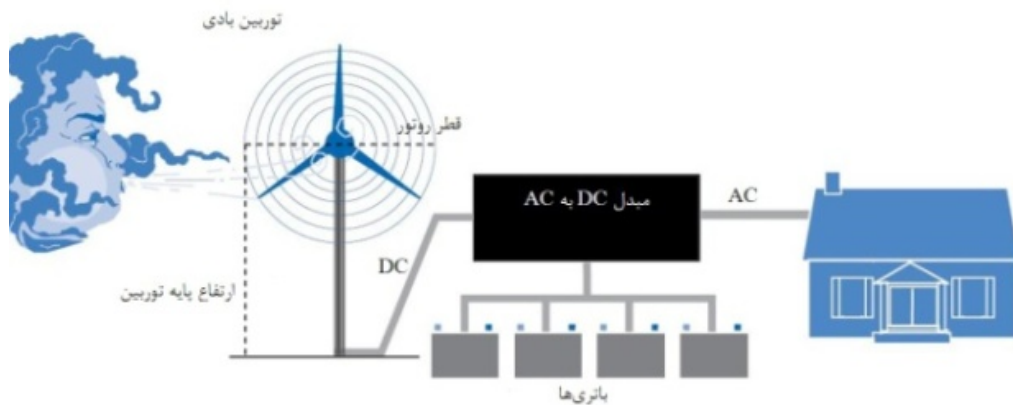
شکل ۱: اطلس باد ایران [۱۰]

جدول ۱: ویژگی‌های باد در مناطق مورد نظر

$k$	$c$	متوسط سرعت ( $h=10$ )	متوسط سرعت ( $h=80$ )	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

بطور کلی توربین‌های بادی که برای تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر اساس میزان توان تولیدی به سه دسته توربین‌های بادی کوچک (تا حداکثر توان ۲kW)، توربین‌های متوسط (بین ۱۰-۲۰kW) و توربین‌های بزرگ (بیش از ۱۰۰kW) قابل تقسیم‌بندی هستند [۱۵ و ۱]. در این مقاله با بررسی میزان مصرف برق خانوارهای با دهک‌های درآمدی متفاوت، اندازه توربین‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که کل مصرف روزانه خانوار را تعیین کند. عموماً برای تأمین تقاضای برق در بخش خانگی از توربین‌های با حداکثر توان ۱۰ kW استفاده می‌شود که در این مقاله این توربین‌ها نیز جزء دسته توربین‌های بادی کوچک محسوب می‌شوند. استفاده از توربین‌های بادی بزرگ در بخش خانگی بدلیل بالا بودن هزینه توربین و هزینه‌های نصب و راه‌اندازی آن از نظر اقتصادی و همچنین پایین بودن مصرف برق در هر خانوار قابل توجیه نمی‌باشد. لذا می‌بایست نوع توربینی که برای یک خانوار انتخاب می‌گردد با درآمد خانوار و توان توربین استفاده شده تناسب داشته باشد تا هم از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد و هم میزان برق مورد نیاز برای مصرف خانوار را تأمین کند. عموماً برای تبدیل برق تولید شده بوسیله توربین از جریان مستقیم ( $DC$ ) به جریان متناوب ( $AC$ ) از یک مبدل استفاده

می‌شود. بعلاوه برای ذخیره برق تولید شده و استفاده از آن در مواقع لازم بویژه در مواقعی که وزش باد برای تأمین برق مورد نیاز وجود ندارد، یک باتری به توربین متصل می‌شود. کلیه 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 [۱۶]

### تعیین توان توربین

منظور از توان توربین مقدار انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین در یک بازه زمانی مشخص است. از جمله عوامل تأثیرگذار بر توان توربین سرعت باد است که با توان رابطه 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. بعلاوه اندازه توربین استفاده شده نیز از جمله دیگر عواملی است که بر توان خروجی توربین تأثیرگذار است زیرا با افزایش اندازه 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 معادله زیر قابل محاسبه است [۹].

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

در معادله 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 بصورت دایره شکل می‌گیرد. منظور از  $\rho$  در معادله (۳)، چگالی هواست که در این مقاله فرض

شده است مقدار آن در ارتفاعات مختلف ثابت و برابر با ۱ می‌باشد. ثابت گرفتن میزان چگالی هوا سبب بروز کمتر از ۵٪ خطا در تخمین سرعت وزش باد می‌شود [۱۷, ۱۸]. بنابراین معادله (۳) بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$P = 0.3925 D^2 V^3 \quad (4)$$

در معادله 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 ( $P_T$ )، کمینه سرعت باد ( $V_i$ )، بیشینه سرعت باد ( $V_0$ ) و سرعت نامی ( $V_T$ ) می‌باشد. توان نامی بر اساس سرعت نامی طبق معادله (۴) محاسبه می‌شود. منظور از  $V_i$ ، کمترین مقدار سرعت باد است که برای سرعت‌های کمتر از آن توربین دیگر قادر به تولید برق نمی‌باشد و  $V_0$  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 بالا باد، اعمال نیرو از سوی باد بر پره‌های توربین و جلوگیری از چرخش مناسب پره‌هاست. چرخش نامناسب پره‌ها سبب کاهش بازده توربین و به دنبال آن کاهش توان تولید شده می‌شود. پس در معادله (۴)،  $V$  باید در محدوده  $V_i$  و  $V_0$  انتخاب گردد تا مقدار توان برق تولید شده به درستی محاسبه شود. طبق این معادله، بر اساس سرعت‌های مختلف در محدوده فوق، می‌توان توان‌های تولید شده متفاوتی را محاسبه نمود.

در بیشتر مقالات و نشریاتی که در زمینه تولید انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی مطرح شده‌اند، برای محاسبه میزان برق تولید شده و به تبع آن برآورد هزینه واحد برق تولید شده از توان نامی ( $P_T$ ) استفاده شده است [۲, ۵, ۱۹, ۲۰]. ولی از آنجا که محاسبه توان خروجی از توربین بر اساس سرعت باد انجام می‌گیرد و چون سرعت یک عامل متغیر است، بهتر است از  $\bar{P}$  به عنوان معیاری مناسب در این زمینه استفاده شود. در واقع 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 معادله (۴) می‌شود. لذا استفاده از توان نامی برای برآورد هزینه واحد برق، که تحت تأثیر تغییر شرایط حاکم بر سیستم تبدیل انرژی باد قرار نمی‌گیرد، توجیه منطقی ندارد. برای تعیین  $\bar{P}$  طبق معادله (۴) می‌بایست ابتدا  $\bar{V}^a$  محاسبه گردد که این کار طبق معادله زیر انجام می‌گیرد [۸].

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

در معادله (۵)،  $\Gamma$  تابع گاما و  $\bar{V}^a$  توان سوم متوسط سرعت باد است. طبق آنچه در معادله (۲) بیان شد، سرعت متوسط تابعی از پارامترهای وایبول سرعت باد می‌باشد. بنابراین معادله (۵) بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

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



طبق معادله فوق، بدلیل در نظر گرفتن مناطق مختلف و به دنبال آن متغیر بودن مقادیر  $k$  و  $c$ ، برای هر منطقه  $\bar{P}$  های متفاوتی تولید می‌شود. بنابراین  $\bar{P}$  را می‌توان طبق رابطه کلی زیر که بازنویسی شده بر اساس روابط فوق است، محاسبه کرد.

$$\bar{P} = 0.3925 D^2 C^2 \Gamma \left(1 + \frac{3}{K}\right) \quad (7)$$

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

#### محاسبه هزینه واحد برق تولید شده

هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین‌های بادی عاملی است که تأثیر بسزایی در انتخاب و پیاده‌سازی یک سیستم تبدیل انرژی باد دارد. به تبع آن در این مقاله که موضوع آن بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک در بخش خانگی است، اهمیت موضوع بیشتر می‌شود. زیرا هزینه واحد برق ارتباط مستقیم با سطح درآمد خانوار و هزینه قابل قبول پرداختی از سوی خانوار به ازای هر کیلو وات ساعت مصرف برق دارد. برای محاسبه هزینه 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، هزینه واحد برق طبق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$CPU = \frac{PVC}{E_{out}} \quad (8)$$

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

#### انرژی الکتریسیته خروجی کل

این انرژی بر اساس فاکتور ظرفیت توربین و میزان انرژی که توسط توربین قابل تولید است، محاسبه می‌شود. نحوه تعیین مقدار آن طبق معادله زیر انجام می‌گیرد [۲۱].

$$E_{out} = E \times C_f \quad (9)$$

در معادله فوق،  $E$  میزان انرژی قابل تولید و  $C_f$  فاکتور 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 معادله زیر انجام می‌گیرد.

$$\bar{E} = 20 \times 365 \times 24 \times \bar{P} \quad (10)$$

در معادله (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 معادله (۹)، فاکتور ظرفیت بصورت میزان انرژی تولید شده خروجی نسبت به انرژی قابل تولید توسط توربین درحالتی که راندمان توربین صددرصد باشد، تعریف می‌شود. فاکتور ظرفیت عاملی است که به مشخصات توربین و شرایط جغرافیایی منطقه بستگی دارد. این موضوع از معادله زیر مشخص است [۲۲، ۲۳].

$$C_f = \frac{\exp\left(-\left(\frac{V_i}{C}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_r}{C}\right)^k\right)}{\left(\frac{V_r}{C}\right)^k - \left(\frac{V_i}{C}\right)^k} - \exp\left(-\left(\frac{V_o}{C}\right)^k\right) \quad (11)$$

در معادله (۱۱)،  $k$  و  $C$  پارامترهای توزیع وایبول سرعت باد و  $V_o$ ،  $V_r$ ،  $V_i$  بترتیب به کمینه سرعت باد، سرعت نامی و بیشینه سرعت باد اشاره دارند. بعد از تعیین میزان انرژی الکتریکی خروجی کل از توربین، برای تعیین مقدار هزینه واحد برق تولید شده لازم است ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد محاسبه شود که در ادامه نحوه تعیین مقدار آن توضیح داده شده است.

#### ارزش فعلی هزینه‌ها

تکنیک ارزش فعلی یکی از مهمترین و در عین حال ساده‌ترین تکنیک‌های ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها است. برای تعیین مقدار ارزش فعلی هزینه‌ها، ابتدا می‌بایست کلیه هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد دسته‌بندی شده و مقدار هر یک تعیین گردد. بطورکلی، برخلاف دیگر روش‌های تولید انرژی الکتریکی، تمامی هزینه‌های یک سیستم تبدیل انرژی باد شامل هزینه‌های خرید تجهیزات و لوازم مورد نیاز بعلاوه هزینه‌های نصب و راه‌اندازی سیستم می‌شود. در زمان بهره‌برداری از سیستم نیز تنها، هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات توربین وجود دارد. لذا ارزش فعلی هزینه‌های یک سیستم تبدیل انرژی باد طبق معادله زیر تعیین می‌گردد [۲۴]. در این معادله  $n$  طول عمر سیستم (۲۰ سال) و  $i$  نرخ بهره می‌باشد که برابر با ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.

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





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

$I$ : هزینه سرمایه‌گذاری که شامل هزینه دستگاه‌ها و تجهیزات (توربین، مبدل و باتری) به اضافه هزینه عملیات‌های عمرانی برای نصب و برپایی توربین و هزینه کابل و سیم‌های ارتباطی می‌شود. هزینه‌های عمرانی و اتصالات بطور ثابت و به صورت درصدی از هزینه توربین (۳۰٪) محاسبه می‌شوند. وجود باتری در این سیستم، امکان تأمین نیاز برق خانوار را در مواقع عدم دسترسی به انرژی باد را فراهم می‌کند.

$C_{omr}$ : هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات توربین در طول دوره بهره‌برداری از سیستم تبدیل انرژی باد می‌باشد. این هزینه بصورت سالیانه تعیین شده که با قرار گرفتن در معادله (۱۲) ارزش فعلی آن بدست می‌آید. مقدار این هزینه بصورت درصدی از هزینه سالیانه توربین محاسبه می‌شود. منظور از هزینه سالیانه توربین مقدار هزینه خرید توربین برای یکسال است که از تقسیم هزینه توربین به طول عمر سیستم بدست 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 هزینه توربین و هزینه‌های عمرانی نصب و برپایی آن، بصورت ثابت (۱۰٪) تعیین می‌گردد.

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

### تعیین روابط ریاضی

هدف از این قسمت تعیین روابطی است که به کمک آنها بتوان بر اساس سطح درآمد خانوار و به تبع آن مقدار هزینه‌ای که از سوی خانوار به ازای هر کیلووات ساعت مصرف برق پرداخت می‌شود، کلیه خصوصیات یک سیستم تبدیل انرژی باد را تعیین نمود. طبق آنچه در معادله (۸) بیان شد، مقدار هزینه واحد برق تولید شده (CPU)، از یک طرف به ارزش فعلی هزینه‌ها (PVC) و از طرف دیگر به انرژی الکتریکی خروجی کل ( $E_{out}$ ) بستگی دارد.

ارزش فعلی هزینه‌ها به نوبه خود از مشخصات فیزیکی سیستم تبدیل انرژی باد، که مهمترین جزء آن توربین بادی است، تأثیر می‌گیرد. طبق توضیحاتی که در قسمت قبلی مقاله ارائه شد، مقدار انرژی الکتریکی خروجی کل بر اساس انرژی

متوسط تولید شده که به کمک توان متوسط تولید شده توربین بدست می‌آید، محاسبه می‌شود. توان متوسط نیز طبق معادله (۷)، به قطر روتور و پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد بستگی دارد. بنابراین تا این مرحله می‌توان گفت که هزینه واحد برق به دو عامل قطر روتور توربین، که برای تعیین اندازه توربین استفاده می‌شود، و همچنین پارامتر مقیاس توزیع وایبول سرعت باد بستگی دارد. از طرفی مقدار پارامتر مقیاس تابعی از میزان ارتفاع از سطح زمین است و با آن رابطه مستقیم دارد. لذا با تغییر ارتفاع، مقدار پارامتر مقیاس طبق معادله زیر تغییر خواهد کرد [۲۵].

$$C_v = C_v \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^{\frac{1}{v}} \quad (13)$$

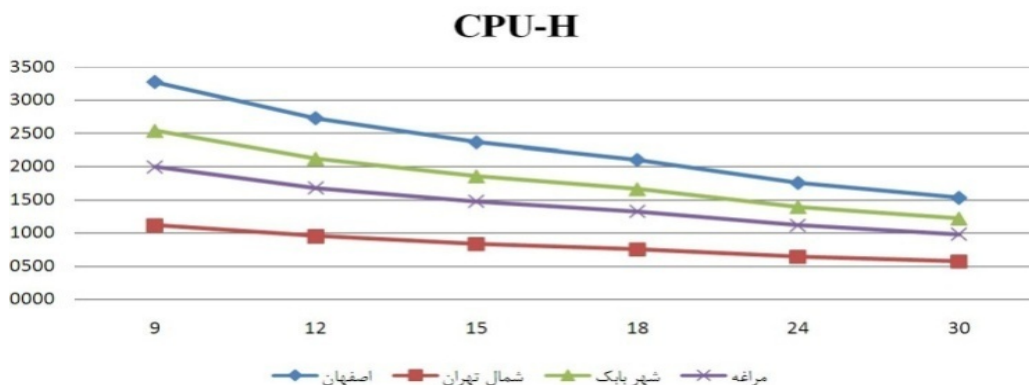
در معادله (۱۳)،  $C_1$  مقدار پارامتر مقیاس توزیع سرعت باد در ارتفاع  $h_1=10$  متر است و  $C_2$  مقدار این پارامتر در ارتفاع  $h_2$  است که باید محاسبه شود. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هزینه واحد برق تابعی از دو عامل قطر روتور و ارتفاع پایه توربین است. در واقع تغییر در مقدار این دو عامل از یک طرف سبب تغییر در ارزش فعلی هزینه‌ها شده و از طرف دیگر میزان انرژی الکتریکی خروجی کل را تغییر می‌دهد. تحلیل حساسیت و تشخیص نوع روابط بین دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه توربین با هزینه واحد برق، طی دو مرحله انجام می‌شود. بدین صورت که در مرحله اول با ثابت در نظر گرفتن اندازه قطر روتور، تغییرات هزینه واحد برق در ارتفاعات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده از این مرحله در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول برای هر یک از چهار منطقه مورد نظر، با فرض ثابت نگه‌داشتن عامل قطر روتور، مقدار هزینه واحد برق به ازای شش ارتفاع مختلف پایه توربین محاسبه شده است. بدین صورت که با در دست داشتن پارامترهای وایبول سرعت باد برای هر منطقه و تعیین مقدار توان متوسط تولید شده، هزینه واحد برق را بر اساس ارزش فعلی هزینه‌های سیستم تبدیل انرژی باد و همچنین مقدار انرژی الکتریسیته خروجی کل طبق روابط گفته شده، محاسبه می‌شود. در ستون آخر این جدول هزینه واحد برق بر اساس ریال به ازای هر کیلو واتساعت (Rial)  $1 \text{ USD} = 10000$  محاسبه شده است. همچنین نتایج بدست آمده از این مرحله در شکل (۳) بصورت نمودار نشان داده شده است. طبق این نمودار، رابطه ریاضی بین هزینه واحد برق و ارتفاع پایه توربین با تقریب بالا بصورت نمایی قابل بیان است. براساس تخمین‌های انجام گرفته تقریب نمایی نسبت به دیگر تقریب‌ها ضریب همبستگی بالاتری (حدود ۹۹/۶٪) بین هزینه واحد برق در ارتفاع پایه توربین نشان داده است. لذا رابطه نهایی هزینه واحد برق تولید شده نسبت به ارتفاع پایه توربین با کمترین میزان خطا برای مناطق با سرعت متوسط بین ۱۰ m/s و ۹ در ارتفاع ۸۰ متر بصورت زیر برآورد می‌شود.

$$CPU = 0.2 e^{-0.15h} \quad (14)$$



جدول ۲: تحلیل حساسیت هزینه واحد برق نسبت به تغییرات ارتفاع پایه توربین برای مناطق مورد نظر

مناطق مورد نظر	$h$ (m)	$c$ (m/s)	$k$	$V_i$	$V_r$	$V_o$	$C_f$	$\bar{P}$ (w)	$\bar{E}$ (kw)	$\overline{E_{out}}$ (kw)	PVC (\$)	COU (Rial/kwh)
شمال تهران	۹	۴/۲۳	-/۹۴	۲/۱	۱۲	۴۰	-/۲۴۵	۲۰۴۴/۷۴	۳۵۸۲۳۹/۲	۸۷۶۸/۶۱	۹۷۶۱/۸۲	۱۱۱۲
	۱۲	۴/۴۰					-/۲۵۶	۳۳۱۳/۰۵	۴۰۵۲۴۵/۶	۱۰۳۷۴۲/۸۸	۹۸۳۰/۱۵	۹۴۸
	۱۵	۴/۵۵					-/۲۶۶	۲۵۴۵/۱۷	۴۴۵۹۱۴/۱	۱۱۸۶۱۳/۱۵	۹۸۹۸/۹۶	۸۳۵
	۱۸	۴/۶۷					-/۲۷۴	۳۷۵۲/۰۲	۴۸۲۱۵۴/۳	۱۳۳۱۱۰/۲۷	۹۹۶۸/۲۶	۷۵۵
	۲۴	۴/۸۶					-/۲۸۶	۳۱۱۳/۱۳	۵۴۵۴۲/۰۲	۱۵۵۹۹۰/۱۷	۱۰۰۳۸/۰۳	۶۴۴
	۳۰	۵/۰۲					-/۲۹۵	۳۴۲۵/۵۵	۶۰۰۱۵۵/۹	۱۷۷۰۴۵/۹۸	۱۰۰۸/۳۰	۵۷۱
مراغه	۹	۴/۷	۱/۲۱	۲/۱	۱۲	۴۰	-/۲۳۵	۱۱۹۱/۰۰	۲۰۸۶۶۲/۵	۴۹۰۳۵/۶۹	۹۷۶۱/۸۲	۱۹۹۱
	۱۲	۴/۹					-/۲۴۹	۱۳۴۷/۲۷	۲۲۶۰۴۲/۲	۵۸۷۷۴/۵۰	۹۸۳۰/۱۵	۱۶۷۳
	۱۵	۵/۰۵					-/۲۵۹	۱۴۸۲/۴۸	۲۵۹۷۳۰/۲	۶۷۳۷۰/۱۲	۹۸۹۸/۹۶	۱۴۷۲
	۱۸	۵/۱۹					-/۲۶۹	۱۶۰۲/۹۶	۲۸۰۸۳۸/۹	۷۵۵۴۵/۶۷	۹۹۶۸/۲۶	۱۳۲۰
	۲۴	۵/۴۱					-/۲۸۴	۱۸۱۳/۲۹	۳۱۷۶۸۹/۲	۹۰۲۳۳/۷۳	۱۰۰۳۸/۰۳	۱۱۱۳
	۳۰	۵/۵۸					-/۲۹۶	۱۹۹۵/۲۷	۳۴۹۵۷۰/۹	۱۰۳۴۷۲/۹۹	۱۰۱۰۸/۳۰	۹۷۷
شهر بابک	۹	۴/۸۳	۱/۳۵	۲/۱	۱۲	۴۰	-/۲۲۳	۹۸۵/۱۷	۱۷۲۶۰۲	۳۸۴۹۰/۲۵	۹۷۶۱/۸۲	۲۵۳۶
	۱۲	۵/۰۳					-/۲۳۸	۱۱۱۴/۴۴	۱۹۵۲۵۰	۴۶۴۶۹/۵۰	۹۸۳۰/۱۵	۲۱۱۵
	۱۵	۵/۱۹					-/۲۴۹	۲۸/۱۲۲۶	۲۱۴۸۴۴/۳	۵۳۴۹۶/۲۴	۹۸۹۸/۹۶	۱۸۵۰
	۱۸	۵/۳۳					-/۲۵۹	۹۴/۱۳۲۵	۲۳۲۳۰۵/۱	۶۰۱۶۷/۰۱	۹۹۶۸/۲۶	۱۶۵۷
	۲۴	۵/۵۵					-/۲۷۵	۹۳/۱۴۹۹	۲۶۲۷۸۷	۷۳۲۶۶/۴۲	۱۰۰۳۸/۰۳	۱۳۸۹
	۳۰	۵/۷۳					-/۲۸۸	۴۵/۱۶۵۰	۲۸۹۱۵۹	۸۳۲۷۷/۸	۱۰۱۰۸/۳۰	۱۲۱۴
اصفهان	۹	۴/۸۱	۱/۴۶	۲/۱	۱۲	۴۰	-/۲۰۶	۹۷/۸۳۷	۱۴۵۰۶۰/۱	۳۹۸۸۲/۳۷	۹۷۶۱/۸۲	۳۲۶۷
	۱۲	۵/۰۱					-/۲۲	۶۱/۹۳۶	۱۶۴۰۹۴/۱	۳۶۱۰۰/۷۱	۹۸۳۰/۱۵	۲۷۲۳
	۱۵	۵/۱۷					-/۲۳۲	۶۰/۱۰۳۰	۱۸۰۵۶۱/۸	۴۱۸۹۰/۳۴	۹۸۹۸/۹۶	۲۳۶۳
	۱۸	۵/۳۱					-/۲۴۳	۳۶/۱۱۱۴	۱۹۵۲۳۶/۴	۴۷۴۴۲/۴۳	۹۹۶۸/۲۶	۲۱۰۱
	۲۴	۵/۵۳					-/۲۵۹	۵۸/۱۲۶۰	۲۲۰۸۵۴/۳	۵۷۲۰۱/۲۶	۱۰۰۳۸/۰۳	۱۷۵۵
	۳۰	۵/۷۱					-/۲۷۲	۰۹/۱۳۸۷	۲۴۳۰۱۸/۲	۶۶۱۰۰/۹۴	۱۰۱۰۸/۳	۱۵۲۹



شکل ۳: نمودار رابطه هزینه واحد برق نسبت به ارتفاع پایه توربین برای مناطق مورد نظر

مرحله دوم مربوط به برآورد رابطه ریاضی بین هزینه واحد برق نسبت به قطر روتور، با فرض ثابت نگه داشتن ارتفاع پایه توربین، برای هر یک از مناطق مورد بررسی است. در جدول (۳)، هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین برای هر یک از مناطق به ازای توربین‌های با اندازه‌های متفاوت، با مشخصاتی که در جدول (۴) آمده [۲۶ و ۲۷ و ۲۸]، ارائه شده است. بنابراین در این حالت، طبق معادله (۷) در هر منطقه فاکتور متغیر در تعیین مقادیر متفاوت  $\bar{P}$ ، قطر روتور است. طبق این جدول، حساسیت انرژی خروجی کل نسبت به تغییرات این دو فاکتور بیشتر از ارزش فعلی هزینه‌هاست. بدین معنی که با افزایش این دو فاکتور مقدار انرژی خروجی کل در مقایسه با ارزش فعلی هزینه‌ها افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد و طبق معادله (۸) مقدار هزینه 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

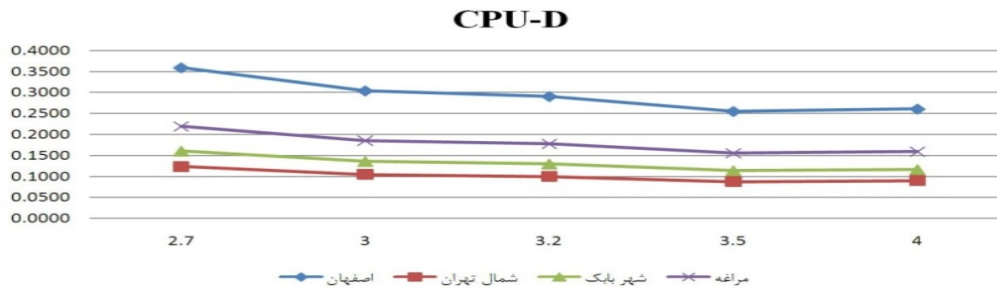
نتایج بدست آمده از این مرحله در شکل (۴) نشان داده شده است. برای بیان نوع رابطه بین هزینه واحد برق و قطر روتور روابط چندجمله‌ای از درجه دو با ضریب همبستگی ۹۷٪ تقریب بهتری نسبت به دیگر روابط ریاضی از خود نشان داده است. لذا رابطه نهایی هزینه واحد برق تولید شده نسبت به قطر روتور توربین برای مناطق با سرعت متوسط بین  $10\text{ m/s}$  و  $9\text{ m/s}$  در ارتفاع ۸۰ متر بصورت زیر برآورد می‌شود. نتیجه بدست آمده از این مرحله یک رابطه چندجمله‌ای از درجه دو بصورت زیر است.

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



جدول ۳. تحلیل حساسیت هزینه واحد برق نسبت به تغییرات قطر روتور توربین برای مناطق مورد نظر

مناطق مورد نظر	D (m)	c (m/s)	k	$V_i$	$V_r$	$V_o$	$C_f$	$\bar{P}$ (w)	$\bar{E}$ (kw)	$\bar{E}_{out}$ (kw)	PVC (\$)	COU (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							۲۱۳۲/۷۹	۳۷۳۶۶۴/۰۲	۹۳۰۴۲/۳۴	۹۷۶۱/۸۲	۱۰۴۹
	۳/۲							۲۴۲۶/۶۴	۴۲۵۱۴۶/۶۲	۱۰۵۸۶۱/۵	۱۰۶۱۶/۶۴	۱۰۰۳
	۳/۵							۲۹۰۲/۹۶	۵۰۸۵۹۸/۲۵	۱۲۶۶۴۱	۱۱۱۵۰/۸۹	۸۸۱
	۴							۳۷۹۱/۶۲	۶۶۴۲۹۱/۵۹	۱۶۵۴۰/۸۶	۱۴۸۹۰/۷	۹۰۰
مراغه	۲/۷	۴/۷۷	۱/۲۱	۲/۱	۱۲	۴۰	۰/۲۴	۱۰۱۲/۳	۱۷۷۳۵۴/۹۵	۴۲۵۶۵/۱۹	۹۳۳۴/۴۲	۲۱۹۳
	۳							۱۲۴۹/۷۵	۲۱۸۹۵۶/۷۳	۵۲۵۴۹/۶۲	۹۷۶۱/۸۲	۱۸۵۸
	۳/۲							۱۴۲۱/۹۴	۲۴۹۱۲۴/۱۱	۵۹۷۸۹/۷۹	۱۰۶۱۶/۶۴	۱۷۷۶
	۳/۵							۱۷۰۱/۰۵	۲۹۸۰۲۴/۴۴	۷۱۵۲۵/۸۷	۱۱۱۵۰/۸۹	۱۵۵۹
	۴							۲۲۲۱/۷۸	۳۸۹۲۵۶/۴۲	۹۳۴۲۱/۵۴	۱۴۸۹۰/۷	۱۵۹۴
شهر بابک	۲/۷	۴/۹	۱/۳۵	۲/۱	۱۲	۴۰	۰/۳۹۷	۸۳۴/۸۵	۱۴۶۲۶۵/۲۷	۵۸۰۶۷/۳۱	۹۳۳۴/۴۲	۱۶۰۸
	۳							۱۰۳۰/۶۸	۱۸۰۵۷۴/۴۱	۷۱۶۸۸/۰۴	۹۷۶۱/۸۲	۱۳۶۲
	۳/۲							۱۱۷۲/۶۸	۲۰۵۴۵۳/۵۵	۸۱۵۶۵/۰۶	۱۰۶۱۶/۶۴	۱۳۰۲
	۳/۵							۱۴۰۲/۸۶	۲۴۵۷۸۱/۸۳	۹۷۵۷۵/۳۹	۱۱۱۵۰/۸۹	۱۱۴۳
	۴							۱۸۳۲/۳۱	۳۲۱۰۲۱/۱۶	۱۲۷۴۴۵/۴	۱۴۸۹۰/۷	۱۱۶۸
اصفهان	۲/۷	۴/۸۸	۱/۴۶	۲/۱	۱۲	۴۰	۰/۲۱۱	۷۰۳/۲۴	۱۲۳۲۰۷/۲۵	۲۵۹۹۶/۷۳	۹۳۳۴/۴۲	۲۵۹۱
	۳							۸۶۸/۱۹	۱۵۲۱۰۷/۷۲	۳۲۰۹۴/۷۳	۹۷۶۱/۸۲	۳۰۴۲
	۳/۲							۹۸۷/۸۱	۱۷۳۰۶۴/۷۸	۳۶۵۱۶/۶۷	۱۰۶۱۶/۶۴	۲۹۰۷
	۳/۵							۱۱۸۱/۷۱	۲۰۷۰۳۵/۵	۴۳۶۸۴/۴۹	۱۱۱۵۰/۸۹	۲۵۵۳
	۴							۱۵۴۳/۴۶	۲۷۰۴۱۳/۷۲	۵۷۰۵۷/۲۹	۱۴۸۹۰/۷	۲۶۱۰



شکل ۴: نمودار رابطه هزینه واحد برق نسبت به قطر روتور توربین برای مناطق مورد نظر

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

برای این منظور، ابتدا بر اساس صورت حساب مصرف برق یک خانوار، میانگین هزینه واحد برق مصرف شده از تقسیم کل مبلغ پرداختی بر میزان کل مصرف برق محاسبه می‌شود. سپس با قرار دادن این هزینه بجای هزینه واحد برق در معادله‌های (۱۴) و (۱۵)، بترتیب ارتفاع پایه توربین و قطر روتور تعیین می‌شوند. حال با در دست داشتن مقدار این دو فاکتور و جایگزین کردن آنها در هر یک از معادله‌های بیان شده، می‌توان کلیه جزئیات سیستم تبدیل انرژی باد را بدست آورد. این روابط از این نظر که می‌توانند اطلاعات مورد نیاز برای نصب و راه‌اندازی یک سیستم تبدیل انرژی باد را برای یک خانوار فراهم کنند، بسیار حائز اهمیت هستند. بعلاوه این روابط قابلیت استفاده در کلیه زمین‌های بهره‌برداری از توربین‌های بادی را داشته و می‌توان از آنها برای بدست 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 هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین با هزینه واحد برق بدون یارانه‌ای که بوسیله نیروگاه‌های آبی فعلی در ایران تولید می‌شود (دست کم ۷۵۰ تا ۸۰۰ ریال برای هر کیلووات ساعت)، ناچیز است. البته این تمایز در قطر روتور و ارتفاع‌های پایه 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 هزینه نهایی برق برای مصرف کننده 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 پایه توربین و هزینه‌های آن (تا ۵۰٪)، ارزش فعلی هزینه سیستم تبدیل انرژی باد و به تبع آن هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین را کاهش داد. با در نظر گرفتن این موارد، تولید برق توسط توربین‌های بادی نسبت به انرژی‌های غیرقابل تجدیدپذیر دارای برتری است و می‌توان این نوع تولید پراکنده را جایگزین مناسبی برای توسعه روش‌های معمول و متمرکز تولید برق در ایران دانست.

### نتیجه‌گیری

بدلیل افزایش بهره‌برداری از انرژی‌های جدید می‌بایست اقدامات اساسی در زمینه گسترش استفاده از این نوع انرژی‌ها انجام گیرد. از جمله این انرژی‌ها، انرژی بادی است که می‌تواند به عنوان یک انرژی اولیه برای تأمین برق مورد نیاز استفاده شود. در این مقاله که در زمینه بهره‌برداری از توربین‌های بادی کوچک برای تأمین تقاضای برق در بخش خانگی ارائه شده است، خصوصیات سیستم تبدیل انرژی باد با بررسی عوامل تأثیر گذار بر آن تعیین می‌شود. این عوامل را می‌توان به دو دسته خصوصیات توربین بادی و شرایط جغرافیایی منطقه تقسیم‌بندی نمود که طبق بررسی‌های انجام گرفته بر روی میزان انرژی الکتریسیته خروجی کل و به دنبال آن هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین، قطر روتور و ارتفاع پایه توربین بترتیب به عنوان منشأ هر کدام از دو عامل فوق تعیین شده‌اند. از آنجا که هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین برای



مصرف کننده اهمیت بالایی دارد، در این مقاله رابطه ریاضی بین دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه توربین با هزینه واحد برق برآورد شده است. بر اساس تحلیل‌های انجام گرفته برای چهار منطقه با شرایط جغرافیایی متفاوت، رابطه ریاضی بین هزینه واحد برق با ارتفاع پایه توربین بصورت نمایی و رابطه آن با قطر روتور بصورت چندجمله‌ای از درجه دو با ضریب همبستگی بالا بدست آمده است. با استفاده از این روابط، با در دست داشتن هزینه واحد برق مصرف شده توسط خانوار و به دنبال آن تعیین مقادیر دو فاکتور قطر روتور و ارتفاع پایه مورد نیاز برای توربین، می‌توان کلیه اطلاعات لازم را برای یک سیستم تبدیل انرژی باد که بتواند برق مورد نیاز خانوار را تأمین کند، بدست آورد. بعلاوه به کمک این روابط می‌توان جزئیات مورد نیاز را برای نصب و راه‌اندازی سیستم‌هایی که در آنها از توربین‌های بزرگ استفاده می‌شود نیز تعیین نمود.

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در مناطق روستایی، مزارع و باغات که دسترسی به خطوط انتقال و توزیع وجود ندارد، هزینه برق تولید شده با هزینه تمام شده فعلی در کشور قابل رقابت است.

#### منابع

- [1] Rai, G.D. (2000). "Non-conventional energy sources (4th ed.)", Khanna Publishers, New Delhi, India.
- [2] 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", J. of Energy Conversion and Management, Vol. 48, No. 5, PP. 1640-1655.
- [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>.
- [4] 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, Vol. 27, PP. 1–12.
- [5] 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, Vol 31, PP. 1183–1202.
- [6] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.
- [7] Isaac Y.F. Lun and Joseph C. Lam. (2000). "A study of Weibull parameters using long-term wind observations", J. of Renewable Energy, Vol 20, PP. 145-153.
- [8] Gupta B.K. (1986). "Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in India". J. of Solar Energy, Vol 37, No. 6, PP. 469–471.
- [9] Sahin, A.Z. and Aksakal, A. (1998). "Wind power energy potential at the Northeastern region of Saudi Arabia", J. of Renewable Energy, Vol 14, PP. 435–440.
- [10] Iran's New Energy Department. (2006). [http://www.irses.org/pdf/87/87\\_4.pdf](http://www.irses.org/pdf/87/87_4.pdf).



- [11] 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.
- [12] 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), PP. 81-86.
- [13] Ameri, M., Lari, H.R. (1997). "The study of Iran's wind energy potential and economics", Proceedings of the JSME ICFE 97, PP. 629-632.
- [14] 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, Vol.3, No. 2, PP. 132-45.
- [15] Bansal, R.C., Bhatti, T.S. and Kothari, D.P. (2002). "On some of the design aspects of wind energy conversion systems", Energy Convers Manage, Vol. 43, PP. 2175-2187.
- [16] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, "Small Wind Electric System, An Alaska Customers' Guide.pdf".
- [17] Hennessey, J.P. (1977). "Some aspects of wind power statistics", J. of Appl Meteor, Vol. 16, PP. 119-128.
- [18] 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].
- [19] Sarkar, M. and Hussain, M. (1991). "The potential of wind electricity generation in Bangladesh", J. of Renewable Energy, Vol. 1, PP. 855-857.
- [20] Ucar, A. and Balo, F. (2008). "Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludag-Bursa, Turkey", J. of Applied Energy, Vol. 86, PP. 333-339.
- [21] Ahmed Shata A.S. and Hanitsch R. (2008). "Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt", Renew Energy, Vol. 33, PP. 141-8.
- [22] El-Mallah, A. and Soltan, A.M. (1989). "A nomogram for estimating capacity factors of wind turbines using site and machine characteristics", Sol Wind Technol, Vol. 6, PP. 633-635.
- [23] 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, Vol. 74, PP. 93-102.
- [24] 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, Vol.48, PP. 1640-55.
- [25] Peterson, E.W. and Hennessey, J.P. (1977). "On the use of power laws for estimates of wind power potential", J. of Appl Meteor, Vol. 17, PP. 390-394.
- [26] [www.provenenergy.com%252F](http://www.provenenergy.com%252F) [Wind turbine characteristics and Proven price list (in GBP)].
- [27] [www.turbex.co.za%252Fgenprices.html](http://www.turbex.co.za%252Fgenprices.html) [Turbex price list of wind generators, towers and other instruments (in USD)].
- [28] [www.fortiswindenergy.com%252Feng%252Fprices.asp](http://www.fortiswindenergy.com%252Feng%252Fprices.asp) [Fortis prices of complete systems for utility (in €)].