



PSC 2007

98-F-REN-375

ارزیابی اقتصادی توپینهای بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید

حسن سیاهکلی

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب

واژه‌های کلیدی: ارزیابی اقتصادی، عدم قطعیت تولید، توربین بادی، منابع تولید پراکنده

چکیده:

با بروز تجدید ساختار در صنعت برق، وظایف توزیع و انتقال از وظیفه تولید جدا شده و به شرکت‌های توزیع و انتقال محول گردید. تجدید ساختار صنعت برق به منظور دستیابی مصرف‌کنندگان به منابع توان رقابتی و دادن اجازه انتخاب به مصرف‌کنندگان از میان این منابع صورت گرفت که از جمله نتایج آن می‌توان به ایجاد بازار رقابتی برای منابع تولید توان بویژه منابع تولید پراکنده^۱ (DG) اشاره نمود.

بروز برخی بحرانهای جهانی و اثر آنها بر قیمت انرژی‌های فسیلی، روند تجدید ساختار و تشکیل بازار برق در بسیاری از کشورها (که موجب افزایش رقابت و قدرت انتخاب گردید) و همچنین برخی ملاحظات زیست محیطی (مانند پروتکل کیوتو) در کنار ویژگی‌های منابع تولید پراکنده باعث شده در سالهای اخیر توجه بیشتری به این منابع جلب شود. در این مقاله بررسی و مقایسه اقتصادی یکی از منابع تولید پراکنده (توربینهای بادی) با توجه به عدم قطعیت انرژی اولیه (نیروی باد) این توربینها و همچنین عدم قطعیت موجود در

دسترس‌پذیری واحدها^۲، تحت سناریوهای مختلف سوخت و آلودگی زیست محیطی و از دیدگاه مشترکین مختلف ارائه شده است. نتایج حاصل حاکی از اقتصادی بودن استفاده از این منبع تحت مقیاس‌های مشخص و برای مشترکین مختلف می‌باشد.

۱- مقدمه

بروز بحران جهانی نفت در سال ۱۹۷۳ موجب شد که بسیاری از کشورهایی که در صنعت خود، به سوخت‌های فسیلی وابسته بودند، در پی یافتن جایگزین مناسب برای این سوخت‌ها باشند. همچنین با افزایش آگاهی عمومی در مورد مسائل زیست محیطی، یافتن جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی، اهمیت بیشتری پیدا کرد. مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشید، باد، آب، زیست توده و زمین گرمایی و ... که از نظر زیست محیطی تمیز بوده، می‌توانند جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی باشند [۱ و ۲].

علاوه بر این تجدید ساختار صنعت برق موجب جدا شدن وظایف توزیع و انتقال از وظیفه تولید گردیده و حوزه‌های

² - Availability

¹ - Distributed Generation

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

محیط زیست در صنعت برق ایران برابر ۱۴۵/۱ ریال بر کیلووات ساعت برآورد شده است.

۷- بررسیهای انجام شده نشان می دهد هزینه سرمایه گذاری منابع مختلف تولید پراکنده (برحسب واحد پول بر کیلووات) با استفاده از رابطه زیر با ظرفیت منابع (برحسب کیلووات) مرتبط می باشد [۴-۶]:

$$P = \begin{cases} D + E \times \ln(\text{Size}) & \text{if } \text{size} \leq \text{size}_L \\ P_L & \text{if } \text{size} > \text{size}_L \end{cases} \quad (1)$$

$$D = P_S - E \times \ln(\text{size}_S)$$

$$E = \frac{P_L - P_S}{\ln(\text{size}_L / \text{size}_S)} \quad \text{که در آن:}$$

size_L و size_S : کوچکترین و بزرگترین ظرفیت در بازه ظرفیت منبع تولید (برحسب کیلووات)

P_L و P_S : قیمت کوچکترین و بزرگترین ظرفیت منبع با اندازه size_L و size_S (واحد پول بر کیلووات)

به عبارت دیگر با مشخص بودن دو ظرفیت منبع تولید و هزینه سرمایه گذاری آنها، منحنی نزولی (برازش شده) با رابطه (۱) بدست می آید که توسط آن برای سایر ظرفیتهای می توان هزینه سرمایه گذاری مربوطه را بدست آورد (روش درونیابی).

۸- برای بازه هزینه های بهره برداری ثابت (واحد پول بر کیلووات در سال) و متغیر (واحد پول بر کیلووات ساعت) و ارتباط آنها با بازه ظرفیت منبع تولید، فرض شده است که رابطه مستقیم و خطی بین این دو پارامتر برقرار بوده و به صورت نزولی (به دلیل وجود بازدهی فزاینده به مقیاس) تغییر نماید. به عبارت دیگر فرض می شود که با افزایش ظرفیت منبع، هزینه های ثابت و متغیر به صورت خطی کاهش یابند.

۳- هزینه اجتناب شده مشترکین

هزینه اجتناب شده مشترکین شامل هزینه های خرید برق از شرکت برق و هزینه دیماند (در بخشهای بعدی مقاله به این هزینه ها، هزینه اجتماعی آلودگی محیط زیست نیز افزوده می شود) می باشد. هزینه اجتناب شده مشترکین تحت این شرایط (بدون احتساب هزینه آلودگی محیط زیست) برای

اخیر به شرکت های توزیع و انتقال محول گردیده اند. در کنار این موضوع شکل گیری بازار برق به منظور افزایش قدرت انتخاب مصرف کنندگان موجب شد آنان ارزیابی اقتصادی منابع تولید اختصاصی به عنوان جایگزین خرید برق از شبکه (فروش مازاد یا خرید کمبود از شبکه) را جدی تر گیرند. در کنار این موضوع وجود برخی قوانین حمایتی برای توسعه منابع تجدید پذیر یا سرمایه گذاری خصوصی، فضای مناسبی برای توسعه منابع تولید پراکنده را به وجود آورد. در کنار این موارد جدی شدن ملاحظات زیست محیطی در قالب پروتکل کیوتو، حرکت به سمت منابع تولید غیر آلاینده یا با آلاینده گی کمتر را تقویت کرده است.

مقاله حاضر به بررسی اقتصادی توبینهای بادی از دیدگاه مشترکین و برای تعرفه های مختلف می پردازد. این ارزیابی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای آلودگی محیط زیست انجام خواهد شد.

۲- فرضیات ارزیابی اقتصادی

در هر مطالعه برای پوشش عدم قطعیت برخی متغیرها و یا ساده سازی مدل، تدوین برخی پیش فرضها ضروری است. بدین لحاظ در ادامه این مقاله به پیش فرضهای مناسب برای این مطالعه، اشاره خواهد شد.

۱- هزینه های راه اندازی و خاموشی واحد و همچنین اقتصاد به مقیاس هزینه ها (مثلاً سرمایه گذاری و بهره برداری) لحاظ نشده اند.

۲- تعداد ساعات پرباری، میانی و کم باری به ترتیب ۴، ۱۲ و ۸ ساعت در نظر گرفته شده است.

۳- نرخ برابری دلار با ریال معادل ۹۰۹۵ ریال برای هر دلار آمریکا در نظر گرفته شده است [۳].

۴- نرخ افزایش هزینه ها (نرخ تورم) لحاظ نشده است.

۵- نرخ بهره در کلیه تحلیلها ۱۰ درصد فرض شده است.

۶- هزینه آلودگی محیط زیست در [۳] با نرخهای داخلی و برای انواع آلاینده ها شامل آلودگی NO_x ، SO_2 و CO_2 به ترتیب برابر ۴۹/۱۵، ۶/۳۷ و ۸۹/۵۸ ریال بر کیلووات ساعت می باشد. بدین ترتیب متوسط هزینه آلودگی

ارزیابی اقتصادی تویینهای بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

سطوح مختلف ولتاژی (برقراری انشعاب) در جدول (۱) ارائه

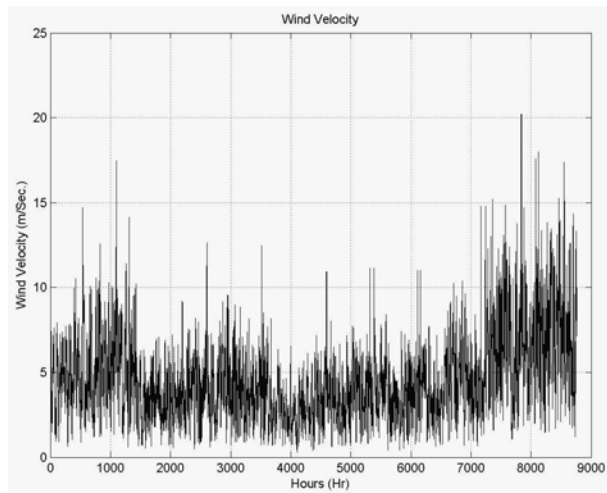
شده است [۶].

نوع مشترک	سطح اتصال	نرخ تعرفه		کنتور دو زمانه		ساعات همزمان	هزینه اجتناب شده (ریال بر کیلووات ساعت)		
		انرژی (ریال بر کیلووات ساعت)	دیپماند (ریال بر کیلووات ساعت)	ضریب پیک (ساعت غیر پیک)	ضریب (ساعت)		ضریب پیک (ساعت)	ضریب (ساعت)	ضریب (ساعت)
خانگی	فشار ضعیف زیر ۳۰ کیلووات	۰	۱۵۵/۴	۱/۵	۱	۴	۲۱۷/۶	۱۹۰/۴	۱۷۸/۳
	فشار ضعیف بالای ۳۰ کیلووات	۹۱۲	۴۸۱/۶				۶۷۹/۳	۵۹۲/۵	۵۵۳/۹
تجاری	فشار ضعیف زیر ۳۰ کیلووات	۰	۴۴۹/۲	۱/۸	۱	۲	۵۹۷/۴	۵۳۴/۵	۵۰۶/۶
	فشار ضعیف بالای ۳۰ کیلووات	۱۶۲۱۵	۳۲۳/۵				۵۲۰/۳	۴۳۰	۳۸۹/۹
	فشار متوسط و بالاتر	۱۶۲۱۵	۲۹۳/۳				۴۸۰/۲	۳۹۴/۱	۳۵۵/۸
صنعتی	فشار ضعیف زیر ۳۰ کیلووات	۰	۲۱۴/۳	۱/۸	۱	۴	۳۴۵	۲۸۵	۲۵۸/۴
	فشار ضعیف بالای ۳۰ کیلووات	۱۱۸۷۰/۱	۱۶۱/۵				۳۲۶	۲۴۷/۸	۲۱۳
	فشار متوسط و بالاتر	۱۱۸۷۰/۱	۱۳۴/۵				۲۸۲/۵	۲۱۱/۹	۱۸۰/۵

جدول (۱): هزینه اجتناب شده در تعدادی از تعرفه های انواع مشترکین

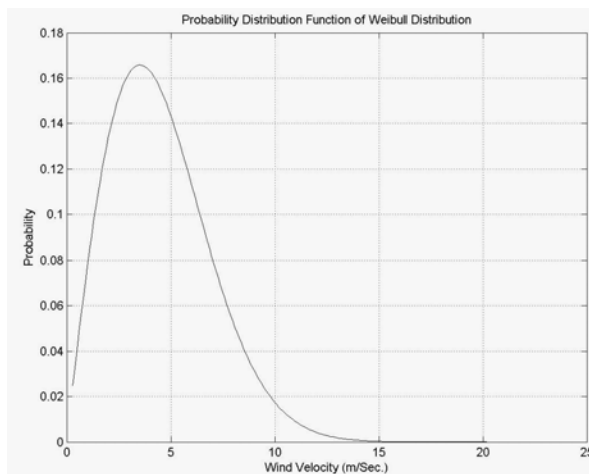
(تعرفه عادی)

شکل (۱) داده‌های مربوط به سرعت باد برای هر ساعت از یک سال را در یک نقطه نمونه نشان می‌دهد.



شکل (۱) تغییرات ساعتی سرعت باد در یک سال

با استفاده از این اطلاعات و برازش یک توزیع وایبال روی آن، پارامترهای مقیاس و شکل تابع توزیع به میزان 0.0418 و $1/9512$ بدست آورده می‌شوند. شکل (۲) تابع توزیع وایبال مربوط به این داده‌های سرعت باد را نشان می‌دهد.



شکل (۲) تابع توزیع وایبال سرعت باد مربوط به شکل (۱) با

پارامترهای مقیاس و شکل 0.0418 و $1/9512$

همانگونه که اشاره شد میزان تولید توان توربین بادی تابعی از سرعت باد می‌باشد. شکل (۳) منحنی تغییرات توان تولیدی بر حسب سرعت باد را برای یک توربین بادی نشان می‌دهد (منحنی مشخصه توربین بادی).

۴- ارزیابی عدم قطعیت در تولید توربین بادی

فاکتورهای مختلفی در ایجاد عدم قطعیت در تولید توان یک توربین بادی دخیل هستند که از جمله مهمترین آنها می‌توان به عدم قطعیت در انرژی اولیه و همچنین عدم قطعیت در دسترس پذیری توربین بادی اشاره نمود. در کلیه منابع تولید پراکنده‌ای که از انرژیهای نو به عنوان منبع انرژی اولیه استفاده می‌نمایند می‌توان عدم قطعیت در منبع انرژی اولیه را به عنوان مهمترین فاکتور ذکر نمود. لیکن در سایر منابع تولید پراکنده، منبع انرژی اولیه بطور تقریباً قابل اعتمادی در اختیار می‌باشد و بایستی فقط عدم قطعیت در دسترس‌پذیری این منابع در نظر گرفته شود [۷-۱۱].

۴-۱- ارزیابی عدم قطعیت در منبع انرژی اولیه

میزان تولید یک توربین بادی اساساً به میزان سرعت باد در منطقه‌ای که توربین در آن نصب شده، بستگی دارد. لذا با در اختیار داشتن اطلاعات سرعت وزش باد در منطقه در یک دوره مشخص، می‌توان میزان تولید توربین بادی را توسط تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد بدست آورد. در بسیاری از مطالعات انجام شده، پیشنهاد شده است تا از توزیع وایبال^۱ به عنوان تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد استفاده شود. رابطه (۲) رابطه عمومی یک توزیع وایبال (با پارامتر مقیاس^۲ و شکل^۳ A و B) را بیان می‌کند. در [۱۱و۱۰] از رابطه (۳) برای توزیع وایبال سرعت باد استفاده شده است.

(۲)

$$Weibull(A,B) = ABX^{(B-1)} e^{-AX^B} \quad (3)$$

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

که در آن V سرعت باد (متر بر ثانیه)، $\left(\frac{1}{c}\right)^k$ پارامتر

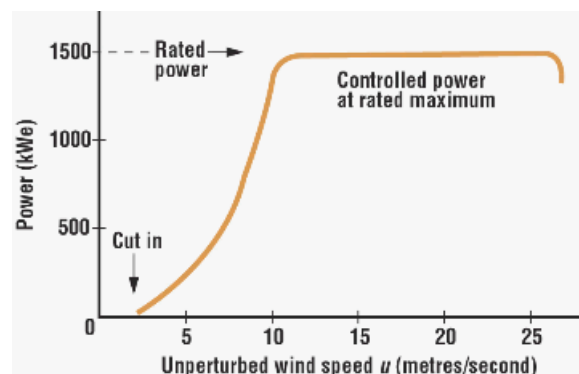
مقیاس توزیع وایبال، k پارامتر شکل توزیع وایبال و $f(V)$ احتمال اینکه سرعت باد از سرعت V کمتر باشد، می‌باشند.

¹ - Weibull Distribution

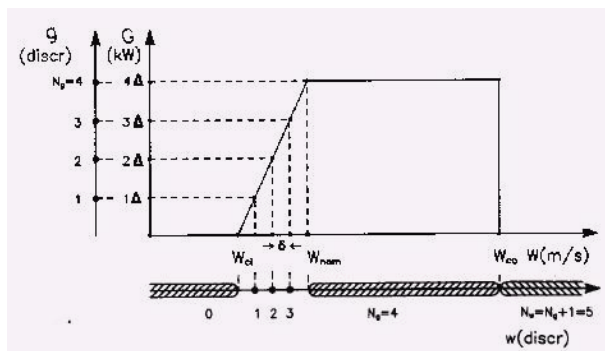
² - Scale Factor

³ - Shape Factor

توربین بادی، احتمال مربوطه را بدست آورد. به عبارت دیگر مشخصه توان تولیدی بر حسب سرعت باد دارای دو حالت (ناحیه) تولید صفر و تولید ماکزیمم بوده و یک ناحیه نیز توان تولیدی پیوسته ایجاد می‌نماید. لذا با در نظر گرفتن تعدادی قدمهای یکسان در این محدوده، می‌توان این ناحیه پیوسته را به صورت گسسته در آورده و بدین ترتیب احتمال مربوط به این حالتها یا نواحی را محاسبه نمود. شکل (۴) بطور شماتیکی کار گسسته سازی منحنی مشخصه بصورت یک مشخصه خطی را بیان می‌کند.



شکل (۳) میزان تولید توربین بادی بر حسب سرعت باد



شکل (۴) گسسته‌سازی منحنی مشخصه تولید توربین بادی بر حسب سرعت باد

جدول زیر بطور نمونه، نتایج مربوط به کار گسسته‌سازی منحنی مشخصه توربین بادی (درجه سوم) را برای ده ناحیه مختلف در توزیع وایبال نشان می‌دهد. مشخصات توربین بادی شامل سرعت ابتدایی، نامی و قطع توربین به ترتیب ۳، ۸ و ۲۵ متر بر ثانیه فرض شده است.

در این منحنی سه سرعت ابتدایی^۱، نامی^۲ و قطع^۳ برای هر نوع توربین بادی در نظر گرفته می‌شود به نوعی که در زیر سرعت ابتدایی و بالای سرعت قطع، توان تولیدی توربین بادی صفر می‌باشد. همچنین توان تولیدی توربین بادی در فاصله بین سرعتهای نامی و قطع نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود. لیکن در فاصله بین سرعتهای ابتدایی و نامی، منحنی تغییرات توان تولیدی با توان سوم سرعت باد رابطه دارد (در بعضی از مطالعات جهت سادگی، این رابطه بصورت خطی در نظر گرفته شده است). بدین لحاظ رابطه کلی مابین توان تولیدی و سرعت باد را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۲].

$$C(V) = \begin{cases} 0 & V \leq V_{Cut-in} \\ C_{max} \left(\frac{V_{Cut-in}^n - V^n}{V_{Cut-in}^n - V_{Rating}^n} \right) & V_{Cut-in} \leq V \leq V_{Rating} \\ C_{max} & V_{Rating} \leq V \leq V_{Cut-out} \\ 0 & V \geq V_{Cut-out} \end{cases}$$

که در آن C_{max} ماکزیمم توان تولیدی توسط توربین بادی، n مشخص‌کننده درجه منحنی مشخصه (که در این مطالعه n برابر ۳ فرض شده است) و $C(V)$ توان تولیدی توربین در سرعت V می‌باشند.

بدین ترتیب با استفاده از این منحنی مشخصه و تابع توزیع احتمالی سرعت باد می‌توان برای هر حالت توان تولیدی

- 1 - Cut-in Wind Speed
- 2 - Rating Wind Speed
- 3 - Cut-out Wind Speed

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

۱- اینکه توربینها در نزدیکی هم و به عبارت دیگر، یک مزرعه بادی مدنظر باشد (تحت تاثیر یک توزیع سرعت باد یکسان هستند).

۲- اینکه توربینهای بادی در یک مزرعه قرار ندارند ولیکن در تامین یک بار مشخص با یکدیگر همکاری دارند (تحت تاثیر یک توزیع سرعت باد یکسان نیستند).

به عبارت دیگر در این دو وضعیت، در یکی از یک توزیع احتمالی سرعت باد و تحت تاثیر قرار گرفتن همه توربینهای مزرعه تحت سرعت یکسان می توان استفاده کرد ولیکن در دیگری از کانولوشن توزیع سرعت باد بایستی استفاده کرد.

همانگونه که اشاره شد در وضعیت یک فرض شده که تمامی توربینها تحت یک تابع توزیع سرعت باد قرار خواهند گرفت. لذا احتمالات مربوط به عدم قطعیت توان تولیدی توربین بادی تحت توزیع سرعت باد متناسب با ظرفیت تولیدی مجموعه توربینهای یک مزرعه بدست آورده می شود. به عنوان مثال در جدول (۲) گسسته سازی منحنی مشخصه مربوط به توان تولیدی یک توربین بادی ۵۰ کیلووات بیان شده که در حالت سوم میزان تولید (ردیف سوم جدول (۲)) و احتمال توزیع وایبال آن به ترتیب ۳۶/۵۰۲۹ و ۰/۰۸۲۵ محاسبه شده است. بدین ترتیب در صورتیکه ۲ توربین بادی با ظرفیت ۵۰ کیلوواتی در این مزرعه وجود داشته باشد که نرخ خرابی هر یک ۰/۰۵ باشد، سه حالت جدید با ظرفیتهای ۷۳/۰۰۵۸ (هر دو واحد سالم)، ۳۶/۵۰۲۹ (یک واحد سالم) و صفر (هر دو واحد خراب) به ترتیب با احتمالات ۰/۰۷۴۴، ۰/۰۰۷۸ و ۰/۰۰۲۰۶۲۵ ایجاد خواهد شد. جدول (۳) نتایج مربوط به این وضعیت را برای دو توربین ۵۰ کیلوواتی نشان می دهد. لازم به ذکر است که احتمال حالت صفر از ترکیب سایر حالات مشابه در جدول فوق بدست آمده است.

حالت	سرعت باد (m/Sec.)	توان تولیدی (kW)	احتمال (توزیع وایبال)
۱	$8 < V < 25$	۵۰	۰/۰۹۸۴
۲	$7/5 < V < 8$	۴۵/۲۰۴۶	۰/۰۸۲۳
۳	$7 < V < 7/5$	۳۶/۵۰۲۹	۰/۰۸۲۵
۴	$6/5 < V < 7$	۲۸/۹۲۲۴	۰/۰۷۹۸
۵	$6 < V < 6/5$	۲۲/۳۸۵۶	۰/۰۷۴۸
۶	$5/5 < V < 6$	۱۶/۸۱۵۴	۰/۰۶۸۲
۷	$5 < V < 5/5$	۱۲/۱۳۴۳	۰/۰۶۰۵
۸	$4/5 < V < 5$	۸/۲۶۵۱	۰/۰۵۲۴
۹	$4 < V < 4/5$	۵/۱۳۰۵	۰/۰۴۴۳
۱۰	$3/5 < V < 4$	۲/۶۵۳	۰/۰۳۶۶
۱۱	$3 < V < 3/5$	۰/۷۵۵۵	۰/۰۲۹۶
۱۲	$V < 3$ و $25 < V$	۰	۰/۲۹۹۷
جمع	-	-	۱/۰۰

جدول (۲) گسسته سازی منحنی مشخصه توان تولید توربین بادی ۵۰

کیلووات بر حسب سرعت باد در ده ناحیه

۲-۴- ارزیابی عدم قطعیت در دسترس پذیری توربینها

پس از بدست آوردن احتمالات مربوط به عدم قطعیت در انرژی اولیه، بایستی عدم قطعیت در دسترس پذیری توربین بادی را نیز مد نظر قرار داد. در صورتی که از مدل دوحالته فرآیند مارکف جهت مدلسازی توربین بادی با نرخ خرابی q استفاده شود، احتمال سالم بودن X توربین از بین N توربین بادی به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود (با استفاده از توزیع دو جمله ای).

$$P(x) = \binom{N}{x} (1-q)^x q^{(N-x)} \quad (5)$$

که در آن N تعداد کل توربینها، x تعداد توربینهای در دسترس (سالم)، q نرخ خرابی توربین و $P(x)$ احتمال سالم بودن x توربین می باشند. از ترکیب این تابع احتمالی با احتمالات مربوط به سرعتهای باد، تابع توزیع احتمالاتی توان تولیدی یک مجموعه توربینهای بادی (مزرعه بادی) بدست خواهد آمد. واضح است که در این قسمت دو وضعیت کاملاً متفاوت زیر قابل بررسی و ارزیابی خواهد بود.

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

۰/۰۵۲۴ خواهد شد. بدین جهت در این وضعیت بایستی کلیه ترکیبهای ممکن تولید و یا به عبارت دیگر کانولوشن حالات بدست آورده شود.

احتمال	تولید (kW)	احتمال	تولید (kW)	احتمال	تولید (kW)
۰/۰۵۶۹	۵۰	۰/۰۰۳۳	۲۴/۲۶۸۷	۰/۱۱۲	۰
۰/۰۰۶۶	۵۰/۳۳۵۱	۰/۰۰۴۹	۲۵/۰۳۸۷	۰/۰۱۸۸	۰/۷۵۵۵
۰/۰۰۴۸	۵۰/۷۵۵۵	۰/۰۰۶۴	۲۵/۰۸۰۵	۰/۰۰۰۸	۱/۵۱۱
۰/۰۱۰۸	۵۱/۳۰۸	۰/۰۰۶	۲۷/۵۱۶۱	۰/۰۲۳۳	۲/۶۵۳
۰/۰۰۵۹	۵۲/۶۵۳	۰/۰۰۵۷	۲۸/۹۲۲۴	۰/۰۰۲	۳/۴۰۸۵
۰/۰۱۰۲	۵۳/۳۱۸۳	۰/۰۰۷۵	۲۸/۹۴۹۷	۰/۰۲۸۲	۵/۱۳۰۵
۰/۰۰۷۸	۵۳/۴۶۹۷	۰/۰۰۴۳	۲۹/۶۷۷۸	۰/۰۰۱۲	۵/۳۰۶۱
۰/۰۰۷۱	۵۵/۱۳۰۵	۰/۰۰۷۱	۳۰/۶۵۰۸	۰/۰۰۲۴	۵/۸۸۸۶
۰/۰۰۹	۵۷/۳۳۸۹	۰/۰۰۵۳	۳۱/۵۷۵۴	۰/۰۰۲۹	۷/۷۸۳۵
۰/۰۰۵۷	۵۷/۸۴۴۷	۰/۰۰۴۲	۳۳/۶۳۰۸	۰/۰۳۳۳	۸/۲۶۵۱
۰/۰۰۸۵	۵۸/۲۶۵۱	۰/۰۰۶۴	۳۴/۰۵۲۸	۰/۰۰۲۸	۹/۰۲۰۶
۰/۰۱۱۱	۵۸/۸۸۸۵	۰/۰۰۸۲	۳۴/۵۲	۰/۰۰۱۸	۱۰/۲۶۱
۰/۰۱۰۱	۶۲/۰۲	۰/۰۵۲۴	۳۶/۵۰۲۹	۰/۰۰۳۵	۱۰/۹۱۸۲
۰/۰۰۹۸	۶۲/۱۳۴۳	۰/۰۰۷۵	۳۷/۱۸۷۵	۰/۰۳۸۵	۱۲/۱۳۴۳
۰/۰۱۱۹	۶۵/۴۲۵۳	۰/۰۰۴۴	۳۷/۲۵۸۴	۰/۰۰۳۲	۱۲/۸۸۹۸
۰/۰۱۱	۶۶/۸۱۵۴	۰/۰۰۵۴	۳۹/۱۵۵۹	۰/۰۰۴۲	۱۳/۳۹۵۶
۰/۰۱۱۱	۶۷/۵۹۰۲	۰/۰۰۹۲	۳۹/۲۰۱	۰/۰۰۴	۱۴/۷۸۷۴
۰/۰۱۲۱	۷۲/۳۸۵۶	۰/۰۰۸۷	۴۱/۰۵۶۷	۰/۰۰۲۵	۱۶/۵۳۰۳
۰/۰۰۶۱	۷۳/۰۰۵۸	۰/۰۰۶۶	۴۱/۶۳۳۴	۰/۰۴۳۴	۱۶/۸۱۵۴
۰/۰۱۱۹	۷۴/۱۲۶۹	۰/۰۰۷۸	۴۴/۷۶۸	۰/۰۰۴۸	۱۷/۲۶۴۸
۰/۰۱۲۹	۷۸/۹۲۲۴	۰/۰۰۵۱	۴۴/۷۷۱۳	۰/۰۰۳۶	۱۷/۵۷۰۹
۰/۰۱۲۲	۸۱/۷۰۷۵	۰/۰۵۲۳	۴۵/۲۰۴۶	۰/۰۰۴۵	۱۹/۴۶۸۴
۰/۰۱۳۳	۸۶/۵۰۲۹	۰/۰۰۹۸	۴۵/۷۳۷۸	۰/۰۰۵۷	۲۰/۳۹۹۵
۰/۰۰۶۱	۹۰/۴۰۹۱	۰/۰۰۴۴	۴۵/۹۶۰۱	۰/۰۰۵۵	۲۱/۹۴۵۹
۰/۰۱۳۳	۹۵/۲۰۴۶	۰/۰۰۵۴	۴۷/۸۵۷۶	۰/۰۴۷۶	۲۲/۳۸۵۶
۰/۰۰۷۲	۱۰۰	۰/۰۰۹	۴۸/۶۳۷۲	۰/۰۰۴	۲۳/۱۴۱۱

جدول (۴) احتمالات مربوط به توان تولیدی دو توربین بادی ۵۰

کیلووات تحت یک توزیع یکسان سرعت باد با گسسته سازی ده ناحیه ای (وضعیت دو)

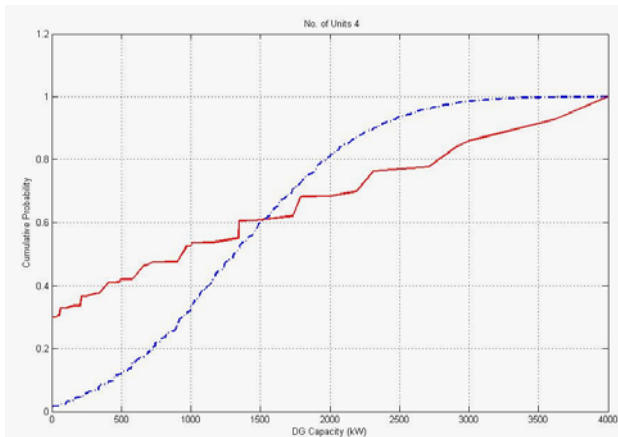
شکلهای (۵) تا (۷) به ترتیب احتمال تجمعی توان تولیدی دو، سه و چهار توربین بادی یکسان (در این اشکال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلووات) را در دو وضعیت اشاره شده، نشان می دهند. همانگونه که ملاحظه می شود در توانهای تولیدی کمتر (به

تولید (kW)	احتمال	تولید (kW)	احتمال
۰	۰/۳۰۱۴	۲۴/۲۶۸۷	۰/۰۵۴۶
۰/۷۵۵۵	۰/۰۰۲۸	۲۸/۹۲۲۴	۰/۰۰۷۶
۱/۵۱۱	۰/۰۲۶۷	۳۳/۶۳۰۸	۰/۰۶۱۵
۲/۶۵۳	۰/۰۰۳۵	۳۶/۵۰۲۹	۰/۰۰۷۸
۵/۱۳۰۵	۰/۰۰۴۲	۴۴/۷۷۱۳	۰/۰۶۷۵
۵/۳۰۶۱	۰/۰۳۳	۴۵/۲۰۴۶	۰/۰۰۷۸
۸/۲۶۵۱	۰/۰۰۵	۵۰/۰	۰/۰۰۸۵
۱۰/۲۶۱	۰/۰۴	۵۷/۸۴۴۷	۰/۰۷۲
۱۲/۱۳۴۳	۰/۰۰۵۷	۷۳/۰۰۵۸	۰/۰۷۴۴
۱۶/۵۳۰۳	۰/۰۴۷۳	۹۰/۴۰۹۱	۰/۰۷۴۳
۱۶/۸۱۵۴	۰/۰۰۶۵	۱۰۰/۰	۰/۰۸۰۷
۲۲/۳۸۵۶	۰/۰۰۷۱	-	-

جدول (۳) احتمالات مربوط به توان تولیدی دو توربین بادی ۵۰

کیلووات تحت یک توزیع یکسان سرعت باد با گسسته سازی ده ناحیه ای (وضعیت یک)

در وضعیت دو، فرض شده است که هر توربین تحت یک تابع توزیع سرعت باد مربوط به منطقه خود قرار خواهد گرفت. لذا احتمالات مربوط به عدم قطعیت توان تولیدی توربین بادی تحت توزیع سرعت باد مربوطه، با احتمال مربوط به خرابی توربین محاسبه خواهد شد (در این وضعیت در هر منطقه یک توربین لحاظ می گردد). به عنوان مثال در جدول (۲) با گسسته سازی منحنی مشخصه در حالت سوم، میزان تولید و احتمال توزیع وایبال آن به ترتیب ۳۶/۵۰۲۹ و ۰/۰۸۲۵ محاسبه شده است. بدین ترتیب با نرخ خرابی هر توربین ۰/۰۵، احتمال این حالت تولید برابر (۰/۰۸۲۵×۰/۹۵) می شود. جدول (۴) نتایج مربوط به این وضعیت را برای دو توربین ۵۰ کیلوواتی نشان می دهد. در این جدول میزان تولید ۳۶/۵۰۲۹ می تواند مربوط به کارکرد یک توربین در یکی از مناطق و عدم کارکرد سایر توربینها باشد. لذا احتمال داشتن تولید یکی (۰/۰۷۸۳=۰/۰۸۲۵×۰/۹۵) به همراه احتمال عدم تولید دیگری (۰/۳۳۴۷=۰/۰۵+۰/۲۹۹۷×۰/۹۵) برابر است با (۰/۰۲۶۲=۰/۳۳۴۷×۰/۰۷۸۳) که چون این حالت دو بار تکرار می شود بدین ترتیب احتمال اینکه میزان تولید ۲ توربین بادی با ظرفیت ۵۰ کیلوواتی برابر ۳۶/۵۰۲۹ کیلووات باشد، معادل



شکل (۷) احتمال تجمعی توان تولیدی چهار توربین بادی یکسان تحت توزیع سرعت باد مشابه (خط پر) وضعیت یک) و خط چین (وضعیت دو))

۵- هزینه تولید انرژی الکتریکی

هزینه یکنواخت شده انرژی الکتریکی^۱ تولیدی توسط توربینهای بادی شامل هزینه‌های سالانه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری ثابت و متغیر می‌باشد. رابطه (۶) چگونگی محاسبه هزینه یکنواخت شده انرژی را نشان می‌دهد.

$$LEC = \frac{ICC \times CRF}{E_r} + \frac{AO\&M Fixed \times P_r}{E_r} + AO\&M vari \quad (۶)$$

ICC: هزینه سرمایه‌گذاری کل (برحسب واحد پول)
CRF: ضریب بازگشت سرمایه^۲ که از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$CRF = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (۷)$$

i: نرخ بهره (%)

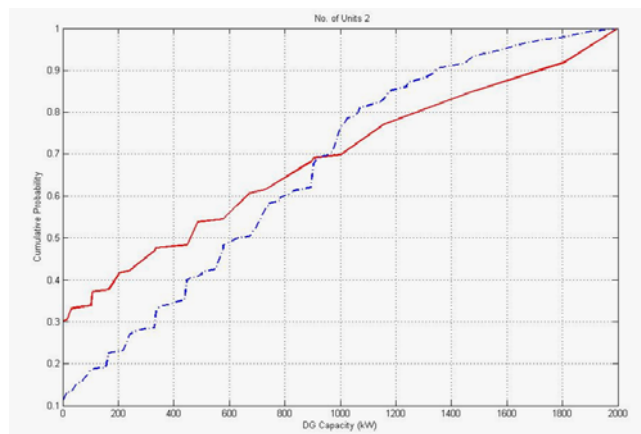
n: عمر مفید توربین بادی (برحسب سال)

AO&M Fixed: هزینه یکنواخت شده بهره‌برداری و نگهداری ثابت (برحسب واحد پول بر کیلووات در سال).

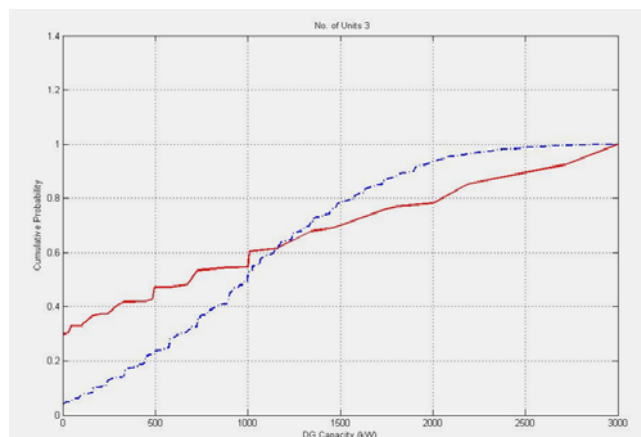
AO&M vari: هزینه یکنواخت شده بهره‌برداری و نگهداری متغیر (برحسب واحد پول بر کیلووات ساعت).

E_r: کل انرژی تولیدی سالانه توربین بادی (برحسب کیلووات ساعت)

عبارت دیگر در سرعتهای باد پایینتر)، احتمال تولید در وضعیت یک بیشتر است. در توانهای تولیدی بالاتر (یعنی سرعتهای باد بالاتر) احتمال تولید در وضعیت دو بیشتر می‌باشد. به بیانی دیگر در سرعتهای باد کمتر بکارگیری توربینهای بادی در مزرعه بادی به تولید توان بیشتر منجر خواهد شد و برعکس در سرعتهای باد بالاتر بکارگیری توربینها در مناطق مختلف به تولید بیشتر منتهی خواهد شد (در اینجا توزیع سرعت باد در مناطق مختلف یکسان فرض شده است).



شکل (۵) احتمال تجمعی توان تولیدی دو توربین بادی یکسان تحت توزیع سرعت باد مشابه (خط پر) وضعیت یک) و خط چین (وضعیت دو))



شکل (۶) احتمال تجمعی توان تولیدی سه توربین بادی یکسان تحت توزیع سرعت باد مشابه (خط پر) وضعیت یک) و خط چین (وضعیت دو))

¹ - Levelized Energy Cost (LEC)

² - Capital Recovery Factor (CRF)

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

صنعت، ظرفیت اقتصادی بکارگیری توربینهای بادی در هر یک از انواع مشترکین حاصل خواهد شد. با استفاده از اطلاعات جدول زیر و همچنین روابط و فرضیات ذکر شده در بخش ۲، هم‌اکنون امکان محاسبه هزینه تمام شده انرژی تولیدی از توربینهای بادی فراهم شده است.

مقدار	واحد	مشخصات
۵۰-۱۰۰۰	kW	بازه ظرفیت توربین بادی
۹۰۰-۱۷۰۰	\$/kW	هزینه سرمایه‌گذاری
۰/۰۰۳-۰/۰۲	\$/kWh	هزینه بهره‌برداری متغیر
۴/۲-۷۰	\$/kW-yr	هزینه بهره‌برداری ثابت
۲۵	سال	عمر مفید

جدول (۵) مشخصات فنی-اقتصادی توربینهای بادی

با استفاده از رابطه (۶)، هزینه انرژی تولیدی توربینهای بادی برای محدوده ظرفیتی ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات بدست خواهد آمد. در این مقاله فرض شده که پارامترها و معیارهای فنی و اقتصادی در طول عمر استفاده از توربین بادی ثابت باقی بمانند. بطور نمونه توزیع سرعت باد (سالانه)، کاهش راندمان با افزایش طول عمر و ... در طول عمر مطالعه اقتصادی در سالهای مختلف طرح یکسان فرض شده‌اند.

بدین ترتیب با در اختیار داشتن جدول احتمالات تولید می‌توان هزینه انرژی تولیدی را برای هر ظرفیت توربین بادی محاسبه نمود. لازم به ذکر است که میزان انرژی سالانه تولیدی توربین بادی در هر دو وضعیت در صورتیکه توزیع سرعت باد یکسانی داشته باشند، مشابه هم می‌باشند. شکل‌های (۸) تا (۱۲) هزینه انرژی تولیدی توربین بادی در بازه ظرفیت ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات را در مقایسه با هزینه اجتناب شده خرید برق مشترکین مختلف خانگی، صنعتی و تجاری در سطوح متفاوت اتصال (انواع تعرفه) و برای ضرایب بار ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ نشان می‌دهند. محل تلاقی این دو منحنی، ظرفیتی از توربین بادی را نشان می‌دهد که به لحاظ اقتصادی، نقطه سربه‌سری هزینه‌ها می‌باشد و برای ظرفیتهای بالاتر از این نقطه، صرفه اقتصادی با استفاده از توربینهای بادی می‌باشد. لازم به ذکر است که به هزینه‌های اجتناب شده مشترکین، هزینه اجتماعی

P_r : ماکزیمم ظرفیت توربین بادی (برحسب کیلووات)
برای بدست آوردن هزینه‌های یکنواخت شده بهره‌برداری نیز می‌توان از روابط زیر استفاده نمود. در صورتیکه افزایش هزینه‌ها (تورم) در نظر گرفته شود روابط کلی زیر قابل استفاده هستند.

$$AO \& M \text{ Fixed} = \begin{cases} \frac{O \& M \text{ Fixed}}{(f-i)} \left[\frac{1+f}{1+i} \right]^n - 1 \times CRF & i \neq f \\ \frac{O \& M \text{ Fixed} \times n}{1+i} \times CRF & i = f \end{cases} \quad (8)$$

$$AO \& M \text{ Vari} = \begin{cases} \frac{O \& M \text{ Vari}}{(f-i)} \left[\frac{1+f}{1+i} \right]^n - 1 \times CRF & i \neq f \\ \frac{O \& M \text{ Vari}}{1+i} \times n \times CRF & i = f \end{cases} \quad (9)$$

f : نرخ تورم یا افزایش قیمت‌ها (%)

$O \& M \text{ Fixed}$: هزینه بهره‌برداری و نگهداری ثابت در سال اول (واحد پول بر کیلووات در سال)

$O \& M \text{ Vari}$: هزینه بهره‌برداری و نگهداری متغیر در سال اول (واحد پول بر کیلووات ساعت)

بدین ترتیب با در اختیار داشتن جدول احتمالات تولید و میزان تولید مربوطه می‌توان انرژی تولیدی سالانه را برای هر توربین بادی محاسبه نمود.

$$E_r = 8760 \times \sum_i P_i \times p_i \quad (10)$$

E_r : کل انرژی تولیدی سالانه (کیلووات ساعت)

P_i : مقدار ظرفیت تولید در هر حالت تولید (کیلووات)

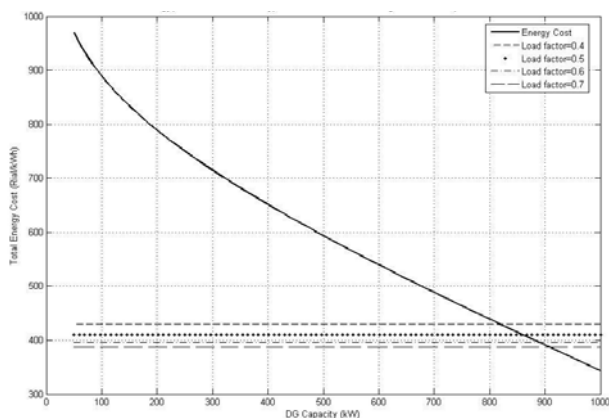
p_i : احتمال مجزای هر حالت تولید

۷- ارزیابی اقتصادی استفاده از توربینهای بادی

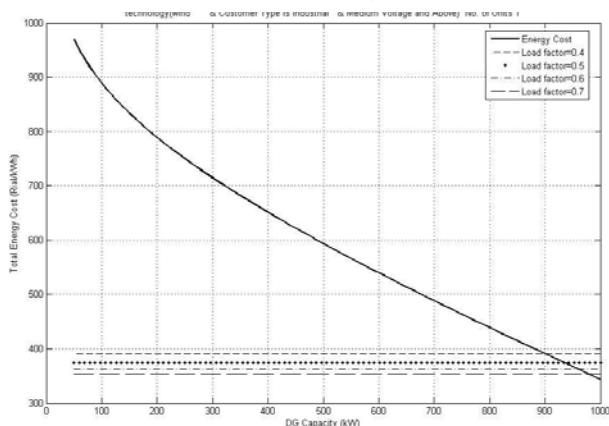
همانگونه که اشاره شد در این مقاله به ارزیابی اقتصادی توربینهای بادی از دیدگاه مشترکین مختلف پرداخته می‌شود. در این دیدگاه با در نظر گرفتن هزینه تمام شده مربوط به توربینهای بادی و مقایسه آن با هزینه اجتناب شده خرید برق مشترکین از صنعت برق تحت تعرفه‌های برق موجود و با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی آلودگی محیط‌زیست توسط این

بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق

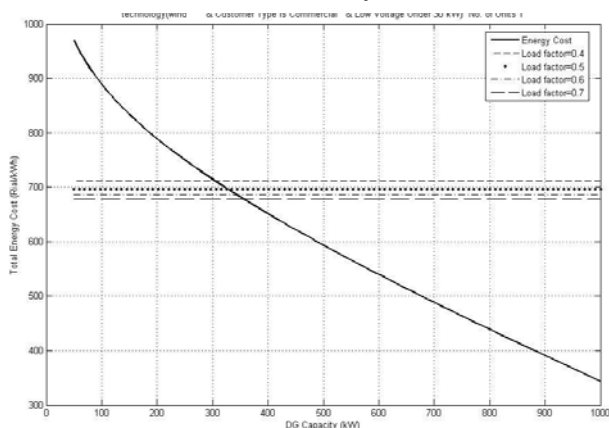
شکل (۱۰): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک صنعتی با تعرفه دیماند فشارضعیف زیر ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات‌ساعت)



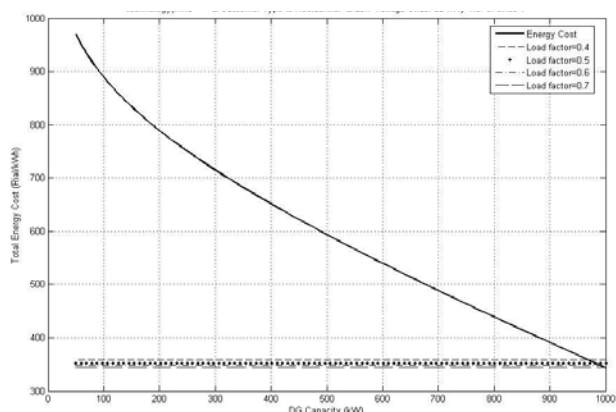
شکل (۱۱): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک صنعتی با تعرفه دیماند فشارضعیف بالای ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات‌ساعت)



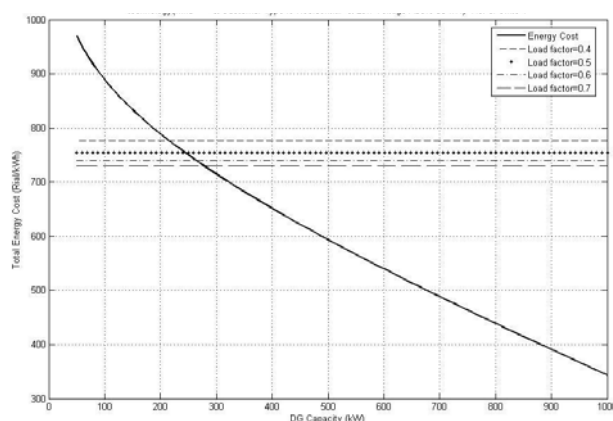
شکل (۱۲): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک صنعتی با تعرفه دیماند فشارمتوسط و بالاتر در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات‌ساعت)



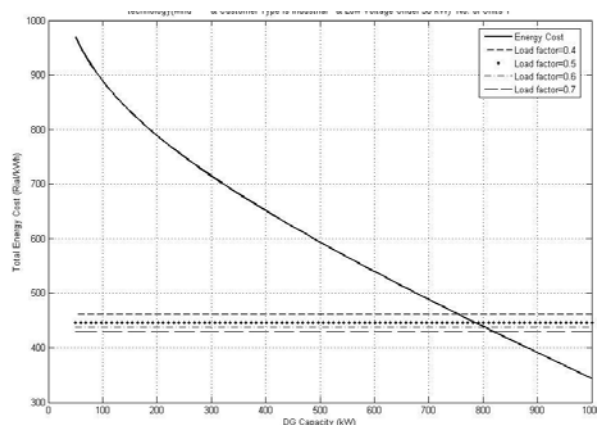
آلودگی محیط‌زیست صنعت برق (معادل ۱۴۵/۱ ریال بر کیلووات‌ساعت) نیز افزوده شده است.



شکل (۸): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک خانگی با تعرفه دیماند فشارضعیف زیر ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات‌ساعت)



شکل (۹): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک خانگی با تعرفه دیماند فشارضعیف بالای ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات‌ساعت)



بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

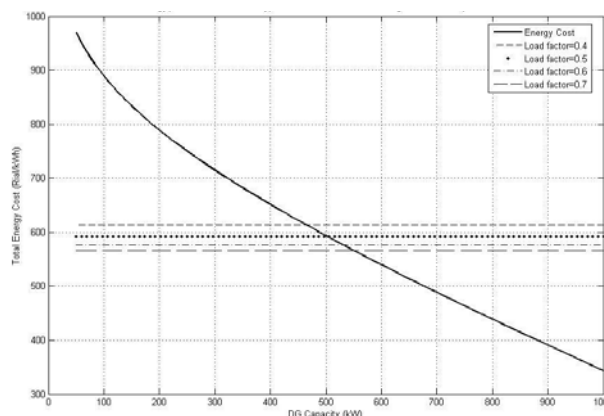
پرداخته شد. همچنین جهت ارزیابی مناسبتر این منابع که جزو منابع انرژی پاک طبقه بندی می شوند، هزینه اجتماعی آلودگی محیط زیست توسط صنعت برق نیز به مطالعه افزوده شد. نتایج حاصله، ظرفیت مرزی اقتصادی برای احداث این منبع تولید توسط مشترکین مختلف را نشان می دهد. آنچه مسلم است این است که پرداختن به این نوع منابع تولید از دیدگاههای مختلف و با اهداف متفاوت می تواند به نتایج اقتصادی نیز منتهی گردد.

۱۲- مراجع

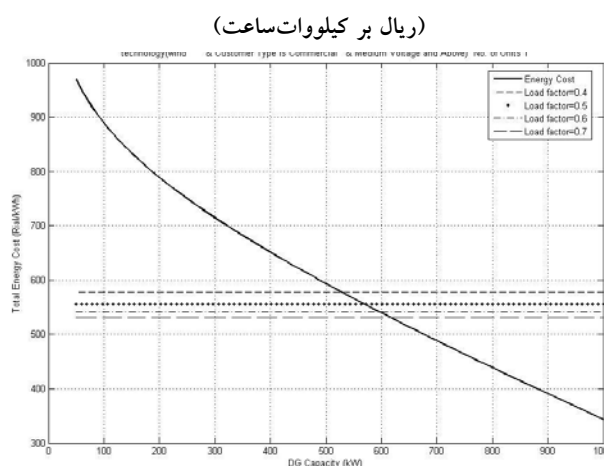
- [1] Report of CIRED Working Group No. 4 on Dispersed Generation.
- [2] T. Akermann, G. Anderson, L. Soder, "Distributed Generation: A Definition", Electric Power Systems Research 57, pp. 195-204, 2001.
- [3] دفتر برنامه ریزی انرژی، "ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۴"، معاونت امور انرژی، وزارت نیرو.
- [4] "World Survey of Decentralized Energy-2002/2003", World Alliance for Decentralized Energy (WADE), "www.localpower.org".
- [5] حسن سیاهکلی، کیومرث حیدری، "ارزیابی اقتصادی بکارگیری میکروتوربینها از دیدگاههای ملی و بنگاهی"، کنفرانس مهندسی برق، زنجان، بهار ۱۳۸۴.
- [6] حسن سیاهکلی، کیومرث حیدری، "ارزیابی اقتصادی بکارگیری میکروتوربینها از دیدگاه مشترکین"، کنفرانس بین المللی برق، تهران، پاییز ۱۳۸۳.

- [7] S. H. Karaki, R. B. Chedid, "Probabilistic Performance Assessment of Wind Energy Conversion Systems", IEEE Trans.on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- [8] I. S. Bae, et al., "Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth", IEEE Trans.on Power System Vol. 19, No. 1, Feb. 2004.
- [9] S. H. Karaki, R. B. Chedid, R. Ramadan, "Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-Wind Energy Conversion Systems", IEEE Trans.on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, Sep. 1999

شکل (۱۳): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک تجاری با تعرفه دیمانده فشارضعیف زیر ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات ساعت)



شکل (۱۴): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک تجاری با تعرفه دیمانده فشارضعیف بالای ۳۰ کیلووات در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات ساعت)



شکل (۱۵): مقایسه هزینه انرژی تولیدی یک توربین بادی (ظرفیت هر توربین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات) و هزینه اجتناب شده مشترک تجاری با تعرفه دیمانده فشارمتوسط و بالاتر در ضرایب بار مختلف (ریال بر کیلووات ساعت)

۱۱- نتیجه گیری

در این مقاله سعی گردید تا از دیدگاه مشترکین به موضوع استفاده از انرژیهای نو (توربینهای بادی) پرداخته شود. بدین لحاظ با استفاده از هزینه اجتناب شده انرژی الکتریکی در صنعت برق ایران برای مشترکین مختلف و هزینه یکنواخت شده تولید انرژی توسط توربینهای بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید آنها، به بررسی و ارزیابی اقتصادی این منابع

- [10] A. Ilinca, et al., “Wind potential assessment of Quebec Province”, Elsevier, Renewable Rnergy, Jan. 2003.
- [11] G. Carpinelli, et al, “Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty”, IEEE PowerTech Conference, Porto, 2001.
- [12] R. Billinton, W. Wangdee, “Reliability Based Transmission Reinforcement Planning Associated With Large Scale Wind”, IEEE Trans. on Power System, Vol. 22, No. 1, Feb. 2007.