

ارائه‌ی مدلی تحلیلی جهت تعیین اثرات پارامترهای توربین بادی و مشخصه احتمالی سرعت باد بر میانگین قیمت گره‌ای بازار برق

الهه زکی‌خانی^۱، مهدی صمدی^{۲*} و محمدابراهیم حاجی‌آبادی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷	
واژگان کلیدی: بازار برق، مدل‌سازی تحلیلی، توزیع احتمال وایبل، پارامترهای توربین بادی، قیمت گرهی برق.	با نفوذ رو به افزایش نیروگاه‌های بادی در سیستم‌های قدرت، ضرورت آنالیز آثار تولید تصادفی آن‌ها در قیمت‌های بازار برق احساس می‌شود. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه، غالباً با ابزار شبیه‌سازی صورت گرفته، مدل‌سازی تحلیلی ریاضی به‌ندرت دیده می‌شود. هدف این مقاله، ارائه روشی تحلیلی برای ارزیابی آثار پارامترهای مولد بادی بر قیمت‌های گرهی بازار برق، بر پایه اصول علم احتمال می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، از تجزیه قیمت گرهی در یک بازار مقید به قیود انتقال استفاده می‌گردد. در این زمینه، با استفاده از توزیع رایلی برای سرعت باد، تابعیت غیرخطی توان مولد بادی نسبت به سرعت باد و اصول ریاضی احتمالات، توزیع احتمال توان یک مولد بادی به‌صورت تحلیلی تعیین شده است. سپس متوسط توان بادی با یک حل دقیق و مفصل ریاضی، در یک فرم بسته و به صورت تابعی از مشخصات احتمالی سرعت باد و مشخصات توربین بادی به دست می‌آید. درنهایت، برای متوسط قیمت در هر باس، یک رابطه تحلیلی دقیق تعیین می‌شود. روش پیشنهادی، بر روی شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE آزمایش شده است. مقایسه نتایج روش تحلیلی پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت، دقت و کارایی مدل پیشنهادی را به‌خوبی نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، افزایش چشمگیری داشته است [۱]. در این میان، انرژی باد در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم بیشتری در تولید برق دارد [۲]. استفاده از باد، یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولید برق است و انتظار می‌رود مولدهای بادی، بخش قابل توجهی از نیازهای جهانی انرژی را در آینده تأمین کند [۳]. مهم‌ترین دلایل این موضوع عبارت‌اند از: کاهش هزینه توربین و هزینه نصب نیروگاه بادی، افزایش بازده نیروگاه‌های بادی و کاهش اتکا به منابع انرژی وارداتی [۴]. از اواخر قرن بیستم، ظرفیت

نیروگاه‌های بادی جهان در هر سه سال تقریباً دو برابر شده است و تولید برق از باد تا سال ۲۰۲۵ به میزان ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش نفوذ توان بادی، چالش‌های جدیدی در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند [۵ و ۶].

۱-۱- انگیزه تحقیق

با تجدید ساختار در سیستم قدرت و ایجاد عرصه رقابتی، مطالعات اقتصادی بازار برق، اهمیتی دوچندان یافته است. در این میان، رفتار تصادفی متغیرهای تصمیم‌ساز بازار همچون استراتژی قیمت‌دهی نیروگاه‌ها، بار و تولید مزارع بادی، باعث ایجاد عدم قطعیت‌هایی در قیمت برق می‌شود [۷-۹]. بنابراین با رشد سریع و نفوذ رو به افزایش

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ma.samadi@hsu.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

مشخصات تحقیقات انجام‌شده و نیز نکات لحاظ‌نشده در این مقالات، در جدول، جمع‌بندی گردیده است. برای روشن شدن نوآوری کار در مقایسه با مقالات موجود، مشخصات روش پیشنهادی این مقاله در ستون آخر جدول، ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های مقالات مرور شده

روش پیشنهادی	[۱۴]، [۱۵]	[۱۷]	[۲۱]	[۱۶]، [۱۹]، [۲۰]	[۱۸]	[۴]، [۲۲]	
ارزیابی محل نصب نیروگاه بادی بر قیمت	×	×	×	×	×	✓	
لحاظ مدل توربین	×	×	×	✓	×	×	
نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت	توزیع وایبل	سناریو محور	توزیع نرمال	توزیع وایبل	توزیع نرمال	توزیع نرمال	
روش مدل‌سازی	شبه‌سازی	شبه‌سازی	شبه‌سازی	شبه‌سازی	تحلیلی	تحلیلی	
امکان آنالیز قیمت باس‌های مختلف شبکه	×	×	✓	✓	✓	✓	
تعیین صریح اثر مشخصه تصادفی باد و پارامترهای توربین بر LMP	×	×	×	×	×	×	

۳-۱- نوآوری تحقیق

در این مقاله، یک روش تحلیلی جدید برای ارزیابی اثر پارامترهای مولد بادی بر LMP باس‌های شبکه پیشنهاد شده که در آن، ابتدا سهم توان تولیدی نیروگاه بادی در LMP به کمک تجزیه ساختاری قیمت تعیین گردیده است. سپس با حل دقیق و مفصل ریاضی، رابطه جدید پیشنهادی برای آنالیز عوامل مؤثر بر متوسط LMP هر باس به دست آمده است. نوآوری‌های مقاله به صورت کلی عبارت‌اند از:

- تعیین تابع چگالی احتمال توان مولد بادی با استفاده از ریاضیات توزیع احتمال‌های وابسته متغیرهای تصادفی و استخراج یک رابطه تحلیلی برای متوسط

نیروگاه‌های بادی دارای تولید تصادفی، ضرورت آنالیز آثار آن‌ها بر نحوه بهره‌برداری از سیستم احساس می‌شود [۱۰-۱۲]. بررسی آثار احداث نیروگاه بادی در نقاط مختلف شبکه و تأثیر آن بر قیمت و در نتیجه قدرت بازار واحدهای تولیدی، امری ضروری است [۱۳].

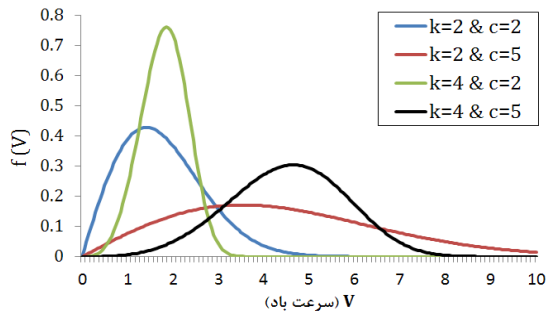
تحقیقات گوناگون انجام‌شده در این زمینه، غالباً با ابزار شبیه‌سازی صورت گرفته، مطالعه اثر نیروگاه بادی بر پایه تئوری احتمالات و با مدل‌سازی تحلیلی ریاضی به‌ندرت دیده می‌شود. این مقاله سعی دارد بر پایه قواعد ریاضی، مدلی جدید برای ارزیابی آثار تولید احتمالی نیروگاه‌های بادی بر قیمت باس‌های مختلف شبکه ارائه کند.

۲-۱- مرور مقالات

مقالات زیادی به مطالعه قیمت بازار برق در حضور نیروگاه‌های بادی پرداخته‌اند که در ادامه، تعدادی از آن‌ها معرفی می‌شوند. مرجع [۴] یک مکانیسم تسویه بازار جدید بر مبنای قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP) پیشنهاد داده که در آن، عدم قطعیت تولید و بار لحاظ شده است. در [۱۴] اثر همبستگی بین توان بادی و قیمت برق بر استراتژی تولیدکنندگان برق از انرژی باد بررسی شده است. در [۱۵] با استفاده از مدل بازی استاکلبرگ، به تجزیه و تحلیل رفتار تولیدکننده انرژی باد در بازار برق دارای نفوذ بالای مولد‌های بادی می‌پردازد و شاخصی برای ارزیابی رقابت در بازار ارائه می‌دهد. در [۱۶] مدلی جدید برای پیشنهاد‌های استراتژیک مولد بادی در بازار برق پیشنهاد شده است. مرجع [۱۷] مدلی برای تعیین رابطه تولید بادی و قیمت برق و تعیین پیشنهاد قیمت در ساختارهای مختلف بازار ارائه کرده است. در [۱۸] با در نظر گرفتن توزیع نرمال برای تولید مولد بادی، روشی تحلیلی برای تعیین حد بالا و پایین قیمت در حضور نیروگاه بادی پیشنهاد شده است. در [۱۹] مدلی تقریبی برای محاسبه LMP در شرایط نفوذ زیاد نیروگاه‌های بادی ارائه شده و هزینه مازاد ناشی از عدم قطعیت آن‌ها ارزیابی گردیده است. در [۲۰] یک روش احتمالی برای ارزیابی آثار حضور نیروگاه‌های بادی در شبکه توزیع ارائه گردیده که طبیعت تصادفی باد و نیز عدم قطعیت در پیشنهاد قیمت به بازار در آن لحاظ شده است. در [۲۱] تأثیر عدم قطعیت در پیش‌بینی توان نیروگاه بادی بر LMP با کمک تبدیل ویولت و شبکه عصبی مطالعه شده است. در [۲۲] اثر حضور نیروگاه بادی در قیمت باس‌های شبکه با استفاده از تجزیه قیمت برق بررسی شده است.

شامل پارامتر شکل (k) و پارامتر مقیاس (c) است. V در این رابطه، سرعت باد است. در شکل (۱)، تابع توزیع وایبل به‌ازای چند مقدار نمونه پارامتر مقیاس رسم شده است.

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



شکل ۱- توزیع وایبل در پارامترهای شکل و مقیاس مختلف

توزیع رایلی، حالت خاصی از توزیع وایبل است که در آن، پارامتر شکل برابر با ۲ فرض می‌شود [۲۵]. در این پژوهش، از تابع توزیع احتمال رایلی استفاده شده است که انطباق خوبی با داده‌های سرعت باد به‌ویژه در محدوده سرعت توربین بادی دارد. تابع هدف و قیود مدل تسویه بازار به‌کاررفته، مطابق [۲۶] است. برای یافتن رابطه‌ای تحلیلی برای LMP، از ساختار تجزیه‌شده این کمیت در [۲۷] استفاده شده است. در این مرجع، LMP هر باس به سه بخش اصلی مطابق رابطه (۲) تجزیه شده است. در (۲) بعد از جمله ثابت اولیه، اثر قیمت پیشنهادی واحدها (a_i) در جمله دوم و اثر ظرفیت واحدهای ارزان (P_i^{\max}) در جمله سوم ظاهر می‌شود. توضیحات مربوط به نحوه استخراج این ضرایب، در [۲۷] ارائه شده است.

$$LMP_n = A_{0,n} + \sum_{i=K_{\min}+1}^{N-K_{\max}} A_{i,n} \times a_i + \sum_{i=N-K_{\max}+1}^N A'_{i,n} \times P_i^{\max} \quad (2)$$

۳- روش پیشنهادی

واحد بادی به‌دلیل هزینه بهره‌برداری بسیار ناچیز، در دسته ارزان‌ترین واحدهای سیستم قرار می‌گیرد. بنابراین رابطه (۳) (که از توسعه رابطه (۲) نتیجه می‌شود) برای تحلیل LMP در یک بازار مقید به قیود انتقال و دارای نیروگاه بادی قابل استفاده است.

$$LMP_n = \left(A_{0,n} + \sum_{i=K_{\min}+1}^{N-K_{\max}} A_{i,n} \times a_i + \sum_{i=N-K_{\max}+1}^{N-1} A'_{i,n} \times P_i^{\max} \right) + B_n \times P_w \quad (3)$$

توان بادی در یک فرم بسته و کلی (متغیر تصادفی سرعت باد و وابستگی موردنظر، تابعیت غیرخطی توان نسبت به سرعت باد است).

- استخراج رابطه‌ای که در آن، تأثیر هریک از مؤلفه‌های نیروگاه بادی شامل توان نامی، پارامترهای توربین (سرعت نامی، سرعت قطع پایین و سرعت قطع بالا) و نیز مشخصه تغییرات تصادفی باد در متوسط LMP هر باس شبکه، به‌صورت تحلیلی و دقیق مشخص شده است. این رابطه که مهم‌ترین نوآوری مقاله است، بر مبنای ترکیب ریاضیات معرفی‌شده در بند قبل و روابط قیمت تجزیه‌شده، تعیین می‌گردد.

شایان ذکر است تا به حال در هیچ مرجعی، رابطه‌ای که اثر مستقیم پارامترهای مولد بادی بر قیمت‌های گرهی را صراحتاً و به‌تفکیک نشان دهد، ارائه نشده است.

روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE آزمایش شده است. مقایسه نتایج روش تحلیلی این مقاله با نتایج شبیه‌سازی، دقت و کارایی روش پیشنهادی را به‌خوبی نشان می‌دهد. آنالیز حالات متنوع سرعت باد تصادفی، نیاز به اجرای برنامه بازار در تکرارهای زیاد دارد، ولی استفاده از روابط پیشنهادی این مقاله می‌تواند حجم چنین محاسباتی را به‌شدت کاهش دهد. بنابراین، روابط پیشنهادی این مقاله می‌تواند به‌عنوان زیربخشی از مدل‌های ارزیابی عملکرد بازارهای برق دارای مولد بادی استفاده شود.

۱-۴- سازماندهی مقاله

در ادامه، ابتدا فرض‌های مسئله در بخش ۲ بیان می‌شود. بخش سوم به توضیح روش پیشنهادی می‌پردازد. در بخش چهارم، سیستم مورد مطالعه معرفی گردیده، سپس نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه و بحث شده است.

۲- فرض‌های مسئله

برای آنالیز دقیق آثار نیروگاه بادی، باید مدل مناسبی از احتمال وزش باد و توان تولیدی آن تعیین شود. به این منظور، توابع توزیع احتمال متنوعی در مقالات استفاده شده است، از جمله توزیع سه پارامتری گامای عمومی، توزیع دو پارامتری وایبل، توزیع یک پارامتری رایلی، توزیع دو پارامتری نرمال، توزیع دو پارامتری لوگ-نرمال، توزیع سه پارامتری بتا که توزیع وایبل و توزیع رایلی، از سایر توابع متداول‌ترند [۲۳-۲۴]. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، تابع چگالی احتمال توزیع وایبل دارای دو پارامتر

$$f_Y(y) = \left| \frac{d}{dy} g^{-1}(y) \right| \times f_X(g^{-1}(y)) \quad (6)$$

به کمک (۶) می‌توان، تابع چگالی احتمال توان مولد بادی در بخش خطی رابطه (۵) را یافت. با تعریف شیب قسمت خطی رابطه (۵) به صورت m ، P_w به شکل (۷) نوشته می‌شود.

$$m = \frac{P_r}{V_r - V_{ci}} \Rightarrow P_w = m(V - V_{ci}) \quad (7)$$

برای سادگی، در روابط بعدی، اندیس w مربوط به P_w حذف شده و توان نیروگاه بادی با نماد P نشان داده شده است. براساس (۷) داریم:

$$V = \frac{(mV_{ci} + P)}{m} \Rightarrow \frac{dV}{dP} = \frac{1}{m} \quad (8)$$

سرعت باد در رابطه (۷)، مشابه متغیر تصادفی X و تابعیت P از سرعت باد معادل همان $g(x)$ است. بنابراین طبق (۶)، برای توزیع احتمال توان داریم:

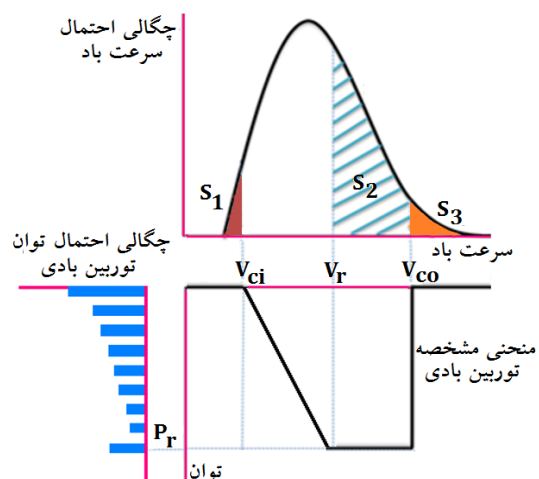
$$f(P) = \left| \frac{dV}{dP} \right| \times \frac{2}{c^2} \left(\frac{mV_{ci} + P}{m} \right) e^{-\left(\frac{mV_{ci} + P}{mc} \right)^2} \quad (9)$$

چون در اینجا m همواره مثبت است، قدرمطلق برداشته می‌شود و رابطه (۱۰) نتیجه می‌شود.

$$f(P) = \frac{2(mV_{ci} + P)}{(mc)^2} e^{-\left(\frac{mV_{ci} + P}{mc} \right)^2} \quad (10)$$

$$V_{ci} \leq V \leq V_r \Rightarrow 0 \leq P \leq P_r$$

در شکل (۲)، ارتباط تغییرات تصادفی سرعت باد و اثر آن بر توان تولیدی مولد بادی نمایش داده شده است. قسمت بالای شکل، توزیع احتمال سرعت باد و قسمت پایین راست، تابعیت توان مولد از سرعت باد را نشان می‌دهد.



در این رابطه، توان تولیدی نیروگاه بادی است که متناسب با سرعت باد می‌باشد. برای تمرکز بر آثار مولدهای بادی بر قیمت هر باس، رابطه (۴) استفاده می‌شود که با در نظر گرفتن کل پیرانتز اول در (۳) به صورت یک ضریب A_n به دست آمده است.

$$LMP_n = A_n + B_n \times P_w \quad (4)$$

بنابراین، LMP_n تابعی خطی از خروجی مولد بادی با شیب و عرض از مبدأ مختص باس n است. در ادامه، ابتدا تابع توزیع احتمال توان مولد بادی و میانگین آن تعیین شده، سپس به کمک (۴)، قیمت در هر باس آنالیز می‌گردد.

۳-۱- تعیین تابع چگالی احتمال توان مولد بادی

هدف از این بخش، تعیین تابع چگالی احتمال توان مولد بادی به صورت تحلیلی است. همان طور که قبلاً بیان شد، سرعت باد دارای یک توزیع احتمال است که در این مقاله با توزیع رایلی مدل شده است. از طرفی، بین توان تولیدی توربین و سرعت باد، یک تابعیت غیرخطی وجود دارد که می‌تواند به صورت رابطه (۵) بیان شود [۲۸]. این تابع، یک بخش خطی و سه بخش ثابت دارد.

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq V < V_{ci} \\ \frac{P_r}{(V_r - V_{ci})} (V - V_{ci}) & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V \leq V_{co} \\ 0 & V > V_{co} \end{cases} \quad (5)$$

در توضیح رابطه (۵) می‌توان گفت وقتی سرعت باد به مقدار V_{ci} (سرعت قطع پایین) می‌رسد، توربین‌های بادی شروع به تولید می‌کنند و در سرعت V_r (سرعت نامی) به مقدار نامی تولید خود می‌رسند. با افزایش سرعت باد و تا رسیدن آن به مقدار V_{co} (سرعت قطع بالا)، خروجی این توربین‌ها در مقدار ثابت P_r (توان نامی) می‌ماند. در صورت افزایش سرعت باد بیشتر از V_{co} ، برای جلوگیری از آسیب مکانیکی، توربین‌ها قفل می‌شوند و در نتیجه توان خروجی آن‌ها به صفر می‌رسد [۲۹].

در این مقاله، برای تعیین تابع چگالی احتمال توان، از ریاضیات مربوط به توزیع احتمال‌های وابسته استفاده شده است. اگر $f_X(x)$ تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی X و $y=g(x)$ تابعی مشتق‌پذیر و اکیداً صعودی یا نزولی باشد، چگالی احتمال متغیر جدید Y از رابطه (۶) به دست می‌آید که در آن، g^{-1} معکوس g است [۳۰].

$$\bar{P} = \int P \times f(P) dP \quad (16)$$

با قرار دادن ضابطه توان از (۱۱) در (۱۶) داریم:

$$\bar{P} = P_r \times s_2 + \underbrace{\int_0^{P_r} P f_1(P) dP}_M \quad (17)$$

که M در رابطه (۱۷) برابر است با:

$$M = \frac{2}{mc} \int_0^{P_r} P \times \left(\frac{mV_{cin} + P}{mc} \right) e^{-\left(\frac{mV_{cin} + P}{mc} \right)^2} dP \quad (18)$$

برای محاسبه انتگرال رابطه (۱۸)، از تغییر متغیری مطابق (۱۹) استفاده می‌شود.

$$z = \frac{mV_{ci} + P}{mc} \Rightarrow dP = (mc) dz$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P = 0 \Rightarrow z = \frac{V_{ci}}{c} \\ P = P_r \Rightarrow z = \frac{V_r}{c} \end{cases} \quad (19)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$M = 2 \int_0^{P_r} P \times z e^{-z^2} dz = 2 \int_0^{P_r} (mcz - mV_{ci}) \times z e^{-z^2} dz$$

$$\Rightarrow M = \underbrace{2mc \int_0^{P_r} z^2 e^{-z^2} dz}_{M_1} + \underbrace{mV_{ci} \int_0^{P_r} (-2z) \times e^{-z^2} dz}_{M_2} \quad (20)$$

برای محاسبه M_1 از انتگرال جزء به جزء به صورت رابطه (۲۱) استفاده شده است:

$$\int_a^b z^2 e^{-z^2} dz = \int_a^b z \cdot \underbrace{z e^{-z^2}}_{dv} dz$$

$$= \left(z \cdot \frac{-1}{2} e^{-z^2} \right)_a^b + \int_a^b \left(\frac{1}{2} e^{-z^2} \right) dz \quad (21)$$

با استفاده از (۲۱) می‌توان نوشت:

$$M_1 = mc \left(V_{ci} e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} - V_r e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} \right) + mc \int_{V_{ci}/c}^{V_r/c} \left(e^{-z^2} \right) dz \quad (22)$$

بخش دوم M_1 در (۲۲)، انتگرالی است که به صورت تحلیلی غیرقابل حل است، اما به کمک تابع مشهور erf^1 به صورت

شکل ۲- نحوه استخراج تابع چگالی احتمال توان نیروگاه بادی براساس مشخصات توربین و نمودار چگالی احتمال سرعت باد

با ترکیب اطلاعات این دو تابع با استفاده از روابط تحلیلی، احتمال توان خروجی نیروگاه بادی طبق شکل پایین چپ تعیین می‌شود.

با توجه به ثابت بودن توان در بخش ابتدایی و انتهای منحنی مشخصه توربین، احتمال صفر بودن توان مولد بادی از جمع انتگرال‌های S_1 و S_3 مشخص شده در شکل به دست می‌آید. برای فاصله (V_r, V_{co}) نیز، چون توان ثابت است، احتمال برابر انتگرال S_2 می‌باشد. احتمال قسمت خطی نمودار منحنی مشخصه توربین هم در رابطه (۱۰) تعیین گردید. بنابراین، تابع چگالی احتمال توان مولد بادی مطابق (۱۱) به صورت سه ضابطه‌ای خواهد بود.

$$f(P) = \begin{cases} s_1 + s_3 & P = 0 \\ s_2 & P = P_r \\ f_1 & 0 < P < P_r \end{cases} \quad (11)$$

$$f_1 = \frac{2(mV_{cin} + P)}{(mc)^2} e^{-\left(\frac{mV_{cin} + P}{mc} \right)^2}$$

تعیین دقیق احتمال توان در (۱۱)، نیاز به محاسبه انتگرال‌های S_1 و S_2 و S_3 دارد. طبق روابط موجود در لیست انتگرال‌های مهم و پرکاربرد، داریم:

$$\int x e^{ax^2} = \frac{1}{2a} e^{ax^2} \quad (12)$$

بنابراین سه سطح زیر نمودار تابع چگالی احتمال سرعت باد به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$s_1 = \int_0^{V_{ci}} \left(\frac{2V}{c^2} \right) e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^2} dV = 1 - e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} \quad (13)$$

$$s_2 = \int_{V_r}^{V_{co}} \left(\frac{2V}{c^2} \right) e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^2} dV = e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} - e^{-\left(\frac{V_{co}}{c}\right)^2} \quad (14)$$

$$s_3 = \int_{V_{co}}^{\infty} \left(\frac{2V}{c^2} \right) e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^2} dV = e^{-\left(\frac{V_{co}}{c}\right)^2} \quad (15)$$

۳-۲- محاسبه تحلیلی میانگین توان مولد بادی

محاسبه میانگین توان توسط رابطه (۱۶) انجام می‌شود.

¹.error function

$$\Rightarrow \bar{P} = P_r \times s_2 - P_r e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} \quad (30)$$

با جای گذاری s_2 از رابطه (۱۴) داریم:

$$\Rightarrow \bar{P} = -P_r e^{-\left(\frac{V_{co}}{c}\right)^2} + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} \quad (31)$$

با جای گذاری شیب m یعنی $m = \frac{P_r}{V_r - V_{ci}}$ داریم:

$$\Rightarrow \bar{P} = \underbrace{\left(\frac{c\sqrt{\pi} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\}}{2(V_r - V_{ci})} - e^{-\left(\frac{V_{co}}{c}\right)^2} \right)}_{f(c, V_{ci}, V_r, V_{co})} \times P_r \quad (32)$$

یعنی توان متوسط نیروگاه بادی، ضریبی از P_r (توان نامی توربین) است که این ضریب به سه مشخصه توربین، یعنی V_{ci} و V_r و V_{co} و یک مشخصه از توزیع احتمال باد، یعنی c وابسته است. در (۳۲) نسبت توان متوسط به توان نامی

با $f(c, V_{ci}, V_r, V_{co})$ نشان داده شده است.

۳-۳- محاسبه تحلیلی میانگین LMP هر باس

طبق خواص امید ریاضی داریم:

$$E(a+bX) = a+bE(X) \quad (33)$$

بنابراین با توجه به دو رابطه (۳۲) و (۳۳) می‌توان نوشت:

$$\overline{LMP_n} = A_n + \left(\frac{c\sqrt{\pi} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\}}{2(V_r - V_{ci})} - e^{-\left(\frac{V_{co}}{c}\right)^2} \right) \times B_n P_r \quad (34)$$

یعنی متوسط قیمت هر باس، به عوامل زیر بستگی دارد:

- مشخصات توربین (V_{ci} و V_r و V_{co})؛
- مشخصه باد در باس محل نصب نیروگاه بادی (c)؛
- ضرایب A_n و B_n که تابعی از ساختار سیستم هستند. مزیت رابطه (۳۴) این است که اثر هر عامل در متوسط قیمت به صراحت معلوم است. به کمک این رابطه می‌توان تغییرات متوسط قیمت در سناریوهای مختلف را بدون اجرای مسئله بازار در تکرارهای زیاد تحلیل کرد.

عددی قابل محاسبه می‌باشد. تابع erf که تعریفی به صورت رابطه (۲۳) دارد، در آنالیز معادلات دیفرانسیل و در آمار و احتمالات، بسیار استفاده می‌شود [۳۱].

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (23)$$

براساس (۲۳) و خواص انتگرال‌ها داریم:

$$\int_a^b e^{-t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\operatorname{erf}(b) - \operatorname{erf}(a)) \quad (24)$$

بنابراین رابطه (۲۲) به صورت (۲۵) بازنویسی می‌شود:

$$M_1 = mc \left(V_{ci} e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} - V_r e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} \right) + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} \quad (25)$$

از طرفی، M_2 در (۲۰)، به سادگی از (۲۶) به دست می‌آید:

$$M_2 = mV_{ci} \int_0^{P_r} (-2z) \times e^{-z^2} dz = mV_{ci} \left(e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} - e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} \right) \quad (26)$$

با جمع M_1 و M_2 خواهیم داشت:

$$M = m \left(V_{ci} e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} - V_r e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} \right) + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} + mV_{ci} \left(e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} - e^{-\left(\frac{V_{ci}}{c}\right)^2} \right) \quad (27)$$

با ساده‌سازی رابطه (۲۷) نتیجه می‌شود:

$$M = m(V_{ci} - V_r) e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} \quad (28)$$

با جای گذاری $P_r = m(V_r - V_{ci})$ از رابطه (۷) داریم:

$$M = -P_r e^{-\left(\frac{V_r}{c}\right)^2} + \frac{mc\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{V_r}{c}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{ci}}{c}\right) \right\} \quad (29)$$

با جای گذاری M طبق (۲۹)، در رابطه (۱۷)، متوسط توان احتمالی مولد بادی برابر است با:

با اعمال احتمال رخداد هر حالت، متوسط مقادیر احتمالی قیمت محاسبه و ذخیره شده است.

* ولی در روش تحلیلی فقط با یک بار اجرای برنامه بازار در زمانی کوتاه، ضرایب A_n و B_n باس‌ها تعیین و سپس به کمک (۳۴)، متوسط قیمت هر باس محاسبه می‌شود.

۵-۱- حالت اول: نصب نیروگاه بادی در باس ۵ شبکه
در جدول ۲، ضرایب تجزیه LMP هر باس و مقایسه بین دو روش شبیه‌سازی و روش پیشنهادی ارائه شده است.

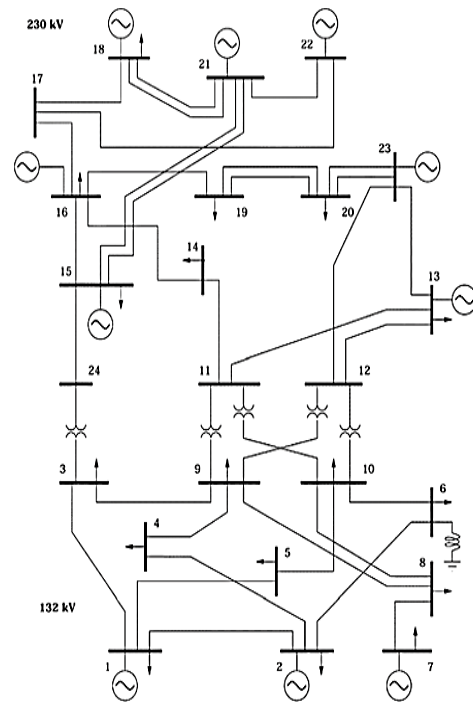
جدول ۲- نتایج در حالت حضور نیروگاه بادی در باس ۵

باس	B_n	A_n	LMP_n		$LMP_n _{P_w=P_r}$
			روش پیشنهادی	روش شبیه‌سازی	
۱	-۰/۰۳۰۶	۳۲/۶۴	۳۱/۲۶	۳۱/۳۰	۲۸/۰۵
۲	-۰/۰۳۴۸	۳۴/۵۰	۳۲/۹۳	۳۲/۹۸	۲۹/۲۸
۳	-۰/۰۱۰۱	۲۰/۷۹	۲۰/۳۳	۲۰/۳۵	۱۹/۲۸
۴	-۰/۰۱۹۵	۲۸/۴۳	۲۷/۵۶	۲۷/۵۸	۲۵/۵۱
۵	-۰/۰۱۳۰	۲۶/۰۴	۲۵/۴۵	۲۵/۴۷	۲۴/۰۸
۶	-۰/۱۱۶۶	۶۹/۴۶	۶۴/۲۲	۶۴/۳۸	۵۱/۹۷
۷	-۰/۰۰۰۸	۲۱/۳۰	۲۱/۲۷	۲۱/۲۷	۲۱/۱۸
۸	-۰/۰۰۰۸	۲۱/۳۰	۲۱/۲۷	۲۱/۲۷	۲۱/۱۸
۹	-۰/۰۰۶۹	۲۳/۴۷	۲۳/۱۶	۲۳/۱۶	۲۲/۴۳
۱۰	۰/۰۰۵۳	۱۹/۱۴	۱۹/۳۸	۱۹/۳۷	۱۹/۹۴
۱۱	-۰/۰۰۳۴	۲۵/۴۱	۲۵/۲۶	۲۵/۲۶	۲۴/۹۰
۱۲	-۰/۰۰۱۲	۲۰/۵۰	۲۰/۴۴	۲۰/۴۴	۲۰/۳۲
۱۳	-۰/۰۰۱۹	۲۱/۵۶	۲۱/۴۷	۲۱/۴۷	۲۱/۲۷
۱۴	-۰/۰۰۷۲	۳۲/۸۸	۳۲/۵۶	۳۲/۵۷	۳۱/۸۰
۱۵	-۰/۰۰۰۵	۱۰/۱۱	۱۰/۰۹	۱۰/۰۹	۱۰/۰۴
۱۶	۰/۰۰۰۵	۱۱/۱۰	۱۱/۱۲	۱۱/۱۲	۱۱/۱۸
۱۷	۰/۰۰۰۲	۳/۵۹	۳/۵۹	۳/۵۹	۳/۶۱
۱۸	۰/۰۰۰۰	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷
۱۹	۰/۰۰۰۰	۱۳/۴۱	۱۳/۴۲	۱۳/۴۱	۱۳/۴۲
۲۰	-۰/۰۰۰۴	۱۵/۴۰	۱۵/۳۸	۱۵/۳۸	۱۵/۳۴
۲۱	-۰/۰۰۰۱	۶/۷۹	۶/۷۸	۶/۷۸	۶/۷۷
۲۲	۰/۰۰۰۰	۵/۵۴	۵/۵۳	۵/۵۳	۵/۵۳
۲۳	-۰/۰۰۰۶	۱۶/۴۸	۱۶/۴۵	۱۶/۴۵	۱۶/۳۹
۲۴	-۰/۰۰۴۱	۱۴/۱۹	۱۴/۰۱	۱۴/۰۱	۱۳/۵۷

این نتایج متناظر حالتی است که نیروگاه بادی در باس ۵ نصب شده است. در ستون آخر، قیمت با فرض تولید نیروگاه بادی در مقدار نامی دیده می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۲، موارد زیر استنباط می‌شود:

۴- سیستم مورد مطالعه

برای بررسی روش پیشنهادی، شبکه تست ۲۴ باس IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است. این شبکه، دارای ۳۲ واحد تولیدی با ظرفیت تولید ۳۴۰۵ مگاوات و ۱۷ نقطه بار با کل بار ۲۸۵۰ مگاوات است. شکل (۳)، دیاگرام این شبکه را نمایش می‌دهد [۳۲]. در شبیه‌سازی‌ها اثر حضور نیروگاه بادی در دو باس نمونه این شبکه (باس‌های ۵ و ۱۵) آنالیز شده است. برای اطلاعات آماری سرعت باد، از داده‌های آنتاریو کانادا استفاده شده است.



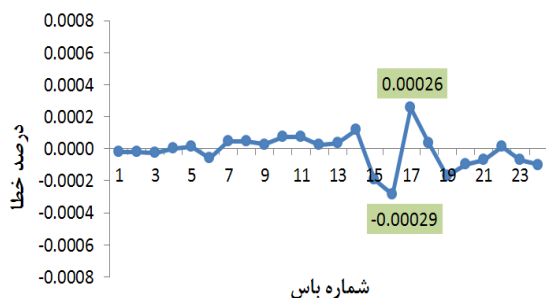
شکل ۳- شبکه تست ۲۴ باس IEEE [۳۲]

فرض شده تعداد ۱۳۶ توربین ۱،۱ مگاواتی با سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالای به ترتیب ۴ و ۱۲ و ۲۰ متر بر ثانیه در یک مزرعه بادی قرار گرفته‌اند [۲۸]. بنابراین توان نامی نیروگاه بادی (مجموعه این توربین‌ها) برابر ۱۴۹،۶ مگاوات خواهد بود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارایی فرمول پیشنهادی برای محاسبه متوسط LMP طبق (۳۴)، مقایسه‌ای بین روش تحلیلی (پیشنهادی این مقاله) و روش شبیه‌سازی به شرح زیر انجام شده است.

* در روش شبیه‌سازی، برنامه تسویه بازار به تعداد کل حالات محتمل برای توان نیروگاه بادی در تکرارهای زیاد اجرا و قیمت باس‌ها در هر حالت ذخیره شده است. سپس



شکل ۵- درصد خطا بین روش تحلیلی و روش شبیه‌سازی (برای حالت نصب نیروگاه بادی در باس ۱۵)

جدول ۳- نتایج در حالت حضور نیروگاه بادی در باس ۱۵

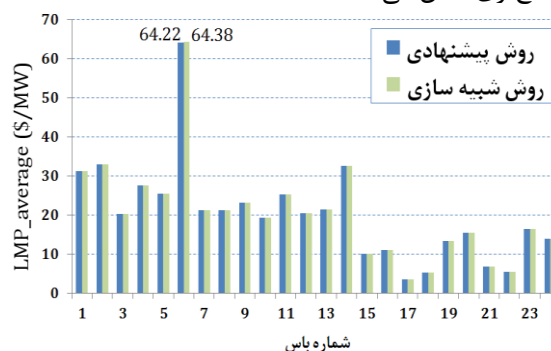
شماره باس (n)	LMP_n				
	B_n	A_n	روش پیشنهادی	روش شبیه‌سازی	$LMP_n _{P_w=P_r}$
۱	-۰/۰۰۱۳	۳۲/۶۶	۳۲/۶۰	۳۲/۶۰	۳۲/۴۶
۲	-۰/۰۰۱۵	۳۴/۵۳	۳۴/۴۷	۳۴/۴۷	۳۴/۳۱
۳	-۰/۰۰۱۰	۲۰/۸۰	۲۰/۷۵	۲۰/۷۵	۲۰/۶۵
۴	-۰/۰۰۰۸	۲۸/۴۵	۲۸/۴۲	۲۸/۴۲	۲۸/۳۳
۵	-۰/۰۰۰۵	۲۶/۰۵	۲۶/۰۳	۲۶/۰۳	۲۵/۹۸
۶	-۰/۰۰۴۹	۶۹/۵۷	۶۹/۳۵	۶۹/۳۶	۶۸/۸۴
۷	۰/۰۰۰۱	۲۱/۳۰	۲۱/۳۱	۲۱/۳۱	۲۱/۳۲
۸	۰/۰۰۰۱	۲۱/۳۰	۲۱/۳۱	۲۱/۳۱	۲۱/۳۲
۹	-۰/۰۰۰۲	۲۳/۴۷	۲۳/۴۶	۲۳/۴۶	۲۳/۴۴
۱۰	۰/۰۰۰۴	۱۹/۱۳	۱۹/۱۵	۱۹/۱۵	۱۹/۲۰
۱۱	۰/۰۰۰۶	۲۵/۴۱	۲۵/۴۴	۲۵/۴۴	۲۵/۵۱
۱۲	-۰/۰۰۰۲	۲۰/۵۰	۲۰/۴۹	۲۰/۴۹	۲۰/۴۶
۱۳	-۰/۰۰۰۱	۲۱/۵۶	۲۱/۵۵	۲۱/۵۵	۲۱/۵۴
۱۴	۰/۰۰۱۸	۳۲/۸۹	۳۲/۹۸	۳۲/۹۷	۳۳/۱۷
۱۵	-۰/۰۰۱۶	۱۰/۱۱	۱۰/۰۴	۱۰/۰۴	۹/۸۷
۱۶	-۰/۰۰۲۵	۱۱/۱۰	۱۰/۹۸	۱۰/۹۹	۱۰/۷۲
۱۷	۰/۰۰۰۶	۳/۵۹	۳/۶۱	۳/۶۱	۳/۶۷
۱۸	۰/۰۰۰۰	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷
۱۹	-۰/۰۰۲۰	۱۳/۴۱	۱۳/۳۲	۱۳/۳۳	۱۳/۱۲
۲۰	-۰/۰۰۱۵	۱۵/۴۰	۱۵/۳۳	۱۵/۳۳	۱۵/۱۷
۲۱	-۰/۰۰۰۵	۶/۷۹	۶/۷۷	۶/۷۷	۶/۷۱
۲۲	-۰/۰۰۰۱	۵/۵۳	۵/۵۳	۵/۵۳	۵/۵۲
۲۳	-۰/۰۰۱۲	۱۶/۴۸	۱۶/۴۲	۱۶/۴۳	۱۶/۲۹
۲۴	-۰/۰۰۱۴	۱۴/۲۰	۱۴/۱۳	۱۴/۱۳	۱۳/۹۹

۵-۳- آنالیز حساسیت

برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر میانگین قیمت طبق فرمول پیشنهادی، آنالیز حساسیتی به شرح زیر انجام شده است. فرض شده نیروگاه بادی در باس ۵ نصب شده

- طبق انتظار، ضرایب B_n غالباً منفی هستند؛ یعنی افزایش تولید مولد بادی دارای تولید ارزان، موجب کاهش قیمت می‌شود، ولی باس‌هایی مانند ۱۰ و ۱۶ و ۱۷ استثنا هستند.
- بیشترین تأثیر در کاهش متوسط قیمت، مربوط به باس ۶ با ضریب B_n برابر ۰/۱۱۶۶- است.
- بیشترین تأثیر در افزایش متوسط قیمت در باس ۱۰ با ضریب B_n برابر ۰/۰۰۵۳ دیده می‌شود.
- مقایسه‌ی دو روش نشان می‌دهد، نتایج روش تحلیلی پیشنهادی برای محاسبه‌ی سریع‌تر متوسط قیمت باس‌های مختلف، دقت قابل‌قبولی دارد.

شکل (۴) انطباق مناسب نتایج دو روش را به صورت واضح‌تری نشان می‌دهد.

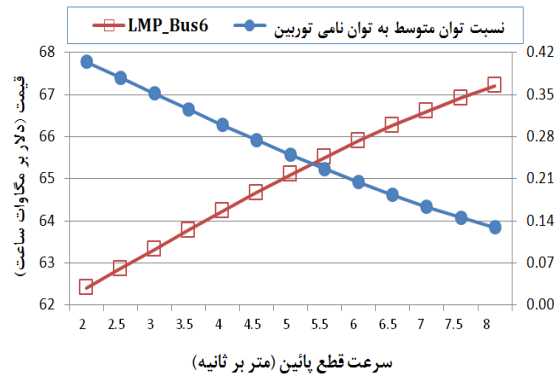


شکل ۴- مقایسه‌ی متوسط LMP روش تحلیلی پیشنهادی و روش شبیه‌سازی (برای حالت نصب نیروگاه بادی در باس ۵)

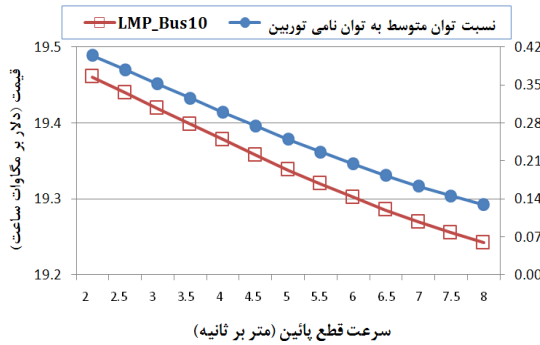
۵-۲- حالت دوم: نصب نیروگاه بادی در باس ۱۵ شبکه

برای حالتی که نیروگاه بادی در باس ۱۵ نصب شده باشد، آنالیزی مشابه حالت قبل انجام شده است. جدول ۳، نتایج ارزیابی دو روش را نشان می‌دهد.

طبق نتایج جدول ۳، باز هم ضریب B_n غالباً منفی است، ولی بعضی باس‌ها استثنا هستند. باس ۱۴ با ضریب ۰/۰۰۱۸ بیشترین افزایش قیمت را در اثر افزایش تولید نیروگاه بادی دارد. نزدیکی نتایج روش پیشنهادی و روش شبیه‌سازی، از دیگر استنباط‌های به‌دست‌آمده از جدول ۳ است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، درصد خطای بین دو روش تحلیلی و روش شبیه‌سازی محاسبه و در شکل ۵ رسم شده است. طبق شکل (۵)، حداکثر درصد خطا کمتر از ۰/۰۰۳ و کاملاً قابل قبول است.

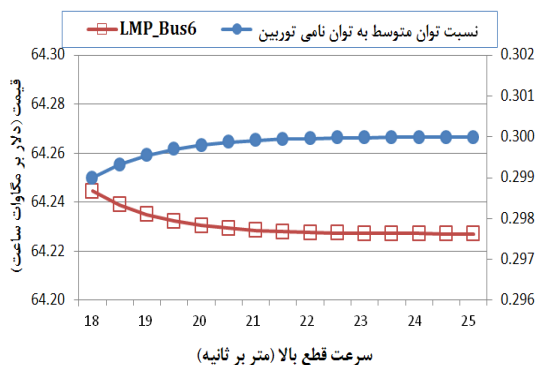


شکل ۸- تأثیر سرعت قطع پایین بر میانگین قیمت باس ۶



شکل ۹- تأثیر سرعت قطع پایین بر میانگین قیمت باس ۱۰

طبق شکل‌های (۸) و (۹)، افزایش سرعت قطع پایین، نسبت توان متوسط به توان نامی توربین را از ۰/۴۰۴ به ۰/۱۳ کاهش می‌دهد؛ یعنی همانند مورد قبل، تأثیر معکوس دیده می‌شود. در اینجا هم روند تغییرات متوسط قیمت در باس ۶ برخلاف روند نسبت توان، افزایشی است و با دامنه بیشتری صورت می‌گیرد که درباره باس ۱۰ این موضوع برعکس است. در شکل (۱۰)، اثر سرعت قطع بالا بررسی شده که طبق نتایج، این پارامتر، تأثیر قابل توجهی بر خروجی ندارد.



شکل ۱۰- تأثیر سرعت قطع بالا بر میانگین قیمت باس ۶

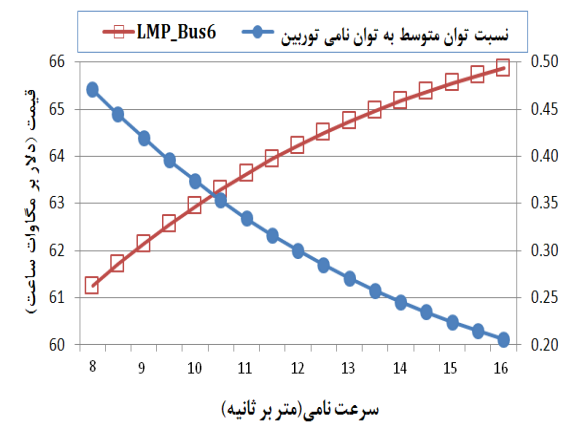
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، اثر پارامتر مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج، پارامتر مقیاس برخلاف موارد قبل، تأثیر مستقیم بر نسبت توان دارد. ملاحظه می‌شود

باشد. سپس متوسط قیمت دو باس نمونه در شرایط مختلف زیر ارزیابی شده است.

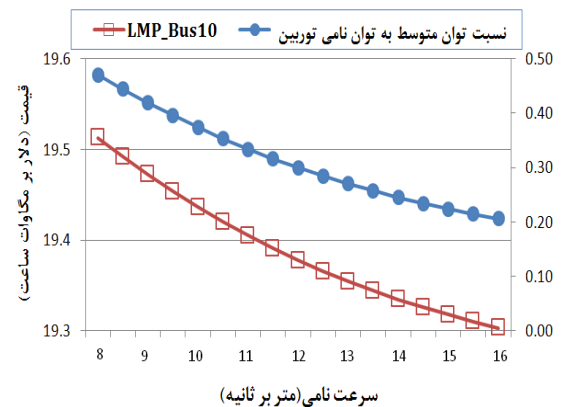
- تغییرات سرعت نامی توربین بادی
- تغییرات سرعت قطع پایین توربین بادی
- تغییرات سرعت قطع بالا توربین بادی
- تغییرات پارامتر مقیاس داده‌های سرعت باد

دو باس نمونه در این بخش، باس‌های ۶ و ۱۰ هستند که به ترتیب دارای بزرگ‌ترین ضریب B_n منفی و مثبت (طبق جدول ۲) هستند.

در شکل‌های (۶) و (۷)، تأثیر تغییرات سرعت نامی توربین بر قیمت متوسط باس‌های به ترتیب ۶ و ۱۰ رسم شده است.



شکل ۶- تأثیر سرعت نامی بر میانگین قیمت باس ۶



شکل ۷- تأثیر سرعت نامی بر میانگین قیمت باس ۱۰

مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت نامی، نسبت توان متوسط به توان نامی توربین در هر دو باس ۶ و ۱۰ به یک میزان (از ۰/۴۷ به ۰/۲۰۶) کاهش می‌یابد؛ اما اثر آن در افزایش قیمت باس ۶ با تغییر از حدود ۶۱/۲۵ به ۶۵/۸۶ نسبت به کاهش قیمت باس ۱۰ با افت از ۱۹/۵۱ به ۱۹/۳۰ چشمگیرتر است.

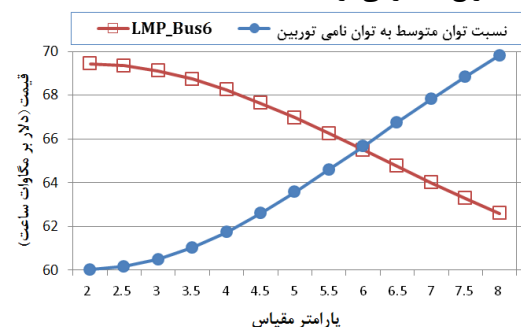
در شکل‌های (۸) و (۹)، تأثیر تغییرات سرعت قطع پایین توربین بر قیمت متوسط دو باس منتخب رسم شده است.

سرعت باد. روش پیشنهادی، بر روی شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE و در دو حالت نصب نیروگاه بادی در باس های ۵ و ۱۵ آنالیز شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:

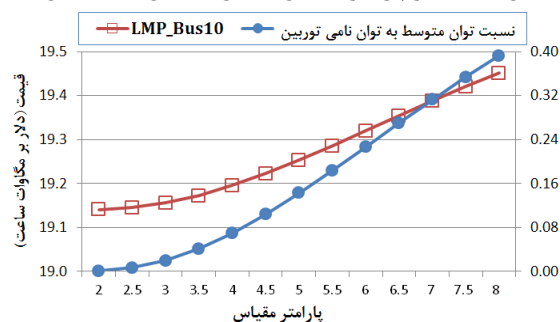
- برخلاف انتظار، افزایش تولید مولد بادی متوسط قیمت بعضی باس‌ها را بالا می‌برد؛ مانند باس‌های ۱۰ و ۱۶ وقتی نیروگاه بادی در باس ۵ نصب است. البته افزایش تولید ارزان مولد بادی، باعث کاهش قیمت بیشتر باس های شبکه می‌شود. بیشترین تأثیر در کاهش متوسط قیمت، مربوط به باس ۶ با ضریب $0/1166$ است.
- مقایسه‌ی روش تحلیلی پیشنهادی و روش شبیه‌سازی متداول نشان می‌دهد دقت روش پیشنهادی با حداکثر درصد خطای $0/003$ کاملاً قابل قبول است. آنالیز حساسیت فرمول پیشنهادی نشان می‌دهد:
- دو پارامتر سرعت قطع پایین و سرعت نامی بر نسبت توان متوسط به توان نامی توربین بادی، تأثیر معکوس دارند و پارامتر مقیاس داده‌های سرعت باد بر آن تأثیر مستقیم دارد.
- تغییرات سرعت قطع بالای توربین، تأثیر قابل توجهی بر توان متوسط ندارد.
- روند افزایشی یا کاهش متوسط قیمت یک باس در برابر تغییرات پارامترهای اولیه، بستگی به علامت ضریب B_n آن باس دارد.

استفاده از روابط پیشنهادی این مقاله، برای آنالیز حالات متنوع سرعت باد، نیاز به اجرای بازار در تکرارهای زیاد ندارد؛ بنابراین، حجم محاسبات به‌شدت کاهش می‌یابد. از این رو مدل پیشنهادی این مقاله می‌تواند به‌عنوان یک زیربخش کارا در مدل‌های ارزیابی عملکرد بازارهای برق دارای مولد بادی استفاده شود.

تأثیر این پارامتر بر نسبت توان، نسبت به موارد قبل بیشتر است (با رنج تغییراتی از $0/001$ تا $0/393$).



شکل ۱۱- تأثیر پارامتر مقیاس (C) بر میانگین قیمت باس ۶



شکل ۱۲- تأثیر پارامتر مقیاس (C) بر میانگین قیمت باس ۱۰

طبق نتایج، با افزایش C از ۲ به ۸، قیمت باس ۶ از $69/44$ به $62/60$ کاهش می‌یابد. این تغییرات برای LMP باس ۱۰ به‌صورت افزایش از $19/14$ به $19/45$ است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی جدید برای ارزیابی اثر مؤلفه‌های اصلی نیروگاه بادی بر قیمت احتمالی باس‌های مختلف سیستم قدرت ارائه گردید. این کار، با استفاده از تجزیه قیمت برق و روابط توزیع احتمال‌های وابسته انجام شده است. درنهایت، تابعیت دقیق متوسط قیمت هر باس از مؤلفه‌های مؤثر به‌صورت تحلیلی تعیین می‌شود. این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از: سرعت قطع پایین و بالا و سرعت نامی، به‌عنوان مشخصات توربین بادی و پارامتر مقیاس توزیع احتمال

مراجع

- [1] M.R. Dorostkar-Ghamsari, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen, A. Safdarian and A.S. Hoshyarzade, "Stochastic Operation Framework for Distribution Networks Hosting High Wind Penetrations", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 1, January 2019, pp. 344-354.
- [2] M. Banaei, M. Oloomi-Buygi and S.M. Zabetian-Hosseini, "Strategic gaming of wind power producers joined with thermal units in electricity markets", Renewable Energy, Vol. 115, January 2018, pp. 1067-1074.
- [3] M. Ramezani, C. Singh and M.R. Haghifam, "Role of clustering in the probabilistic evaluation of TTC in power systems including wind power generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, 2009, pp. 849-58.

- [4] X. Fang, B.M. Scott Hodge, E. Du, C. Kang and F. Li, "Introducing Uncertainty Components in Locational Marginal Prices for Pricing Wind Power and Load Uncertainties", IEEE Transactions on Power Systems, January 2019, Early Access.
- [5] Y. Wang, Z. Zhou, A. Botterud and K. Zhang, "Optimal Wind Power Uncertainty Intervals for Electricity Market Operation", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No. 1, January 2018, pp. 199–210.
- [6] J.E. Aerodyn, "European wind energy association (ewea)", Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, Vol. 1, 2012, pp. 91-100.
- [7] N. Hatziargyriou and A. Zervos, "Wind power development in Europe" Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 12, 2001, pp. 1765-1782.
- [8] K. Andrew and P. Glenn, "Simple wind energy controller for an expanded operating range", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, 2005, pp. 459-466.
- [۹] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی و محمدرضا کریمی، «هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.
- [۱۰] میلاد غلامی‌فرد، نیما امجدی و حسین شریف‌زاده، «پخش بار بهینه احتمالاتی به منظور تعیین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در حضور تولید بادی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۶۵-۱۸۲.
- [۱۱] حسین شریف‌زاده و نیما امجدی، «ارزیابی امنیت استاتیک سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۵۹-۳۷۰.
- [12] R.H. Zubo, G. Mokryani, H.S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam and P. Pillai, "Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 72, pp.1177-1198.
- [13] J. Logan and S.M. Kaplan, "Wind power in the United States: Technology, economic, and policy issues", CRS Report for Congress, 2008.
- [14] H. Shin, D. Lee and R. Baldick, "An Offer Strategy for Wind Power Producers That Considers the Correlation Between Wind Power and Real-Time Electricity Prices", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No. 2, April 2018, pp. 695–706.
- [15] X. Yunpeng, W. Xifan, W. Xiuli, D. Can and L. Ming, "Behavior analysis of wind power producer in electricity market", Applied energy, Vol. 171, 2016, pp. 325-335.
- [16] M. Banaei, M. Oloomi Buygi and H. Zareipour, "Impacts of strategic bidding of wind power producers on electricity markets", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 6, 2016, pp. 4544-4553.
- [17] V. Michael and B. Audun, "Wind power bidding in electricity markets with high wind penetration", Applied Energy, Vol. 118, 2014, pp. 141-155.
- [18] X. Fang, Y. Wei and F. Li, "Evaluation of LMP Intervals Considering Wind Uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 3, May 2016, pp. 2495–2496.
- [19] Q. Zhang, W. Feng, M.M. Kamel, B. Wang and F. Li, "Extended LMP under High-Penetration Wind Power", IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition Latin America, Lima, Peru, September 2018.
- [20] G. Mokryani and P. Siano, "Combined Monte Carlo simulation and OPF for wind turbines integration into distribution networks", Electric Power Systems Research, Vol. 103, June 2013, pp. 37– 48.
- [21] H. Dehghani, B. Vahidi and S.H. Hosseinian, "Wind farms participation in electricity markets considering uncertainties", Renewable Energy, Vol. 101, September 2017, pp. 907-918.
- [22] Y. Jiang, L. Guo and S. You, "Research on nodal wind power values and optimal accommodation based on locational marginal price", International journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 109, February 2019, pp. 343–350.
- [23] Z. Yao, W. Jianxue and W. Xifan, "Review on probabilistic forecasting of wind power generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, 2014, pp. 255-270.

[24] J.A. Carta, P. Ram'irez and S. Velázquez, "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the canary islands", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 933–955.

[۲۵] پریا سفیدپری، علیرضا کیهانی، سید حسن پیشگر، مجید خانعلی و اسدالله اکرم، «پتانسیل‌سنجی تولید انرژی باد به کمک تحلیل آماری مشخصه‌های باد، مطالعه در شهرستان اقلید در استان فارس»، مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۷، ۱۳۹۵، صفحه ۴۶۹–۴۸۳.

[26] M. Samadi M and ME. Hajiabadi, "Assessment of the Collusion Possibility and Profitability in the Electricity Market: A New Analytical Approach", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems (IJEPES)*, Vol. 112, 2019, pp. 381-392.

[27] M.E. Hajiabadi and H. Rajabi Mashhadi, "LMP decomposition: A novel approach for structural market power monitoring", *Electric Power Systems Research*, Vol. 99, 2013, pp. 30-37.

[28] Y.M. Atwa and E.F. El-Saadany, "Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, No. 1, 2011, pp. 79-88.

[29] M. Hosseinpour, H. Rajabi Mashhadi and M.E. Hajiabadi, "A probabilistic model for assessing the reliability of wind farms in a power system", *Journal of Zhejiang University Science C*, Vol. 14, No. 6, 2013, pp. 464-474.

[۳۰] نادر نعمت‌اللهی، آمار و احتمالات مهندسی، جلد ۱، انتشارات دالفک، ایران، ۱۳۹۶.

[31] N. Edward and M. Geller, "A table of integrals of the error functions", *Journal of Research of the National Bureau of Standards B*, Vol. 73, No. 1, 1969, pp. 1-20.

[32] W. Ongsakul and N. Petcharaks, "Transmission constrained generation scheduling in a centralized electricity market by improved Lagrangian relaxation", *Power Engineering Society General Meeting*, 2004, pp. 1156–1163