

تصمیم‌گیری خرید انرژی الکتریکی برای مصرف‌کنندگان بزرگ در حضور توربین‌های بادی

ارسلان نجفی^۱، دانشجوی دکتری، حمید فلقی^۲، دانشیار، مریم رضانی^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - arsalan.najafi@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - falaghi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mramezani@birjand.ac.ir

چکیده: در بازارهای رقابتی مصرف‌کنندگان به دنبال راه‌هایی اقتصادی برای خرید انرژی الکتریکی از منابع مختلف هستند. این منابع عبارتند از: قرارداد دوجانبه، شرکت مستقیم در حوضچه توان و یا تولید از طریق ژنراتورهای تحت مالکیت. انرژی الکتریکی باید در زمان مناسب و تا حد امکان با کمترین قیمت ممکن از این منابع خریداری شود. از طرفی، طی سال‌های اخیر نیز اثر نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در زمینه‌های مختلف سیستم قدرت بررسی شده است. در نظر گرفتن این عدم قطعیت علاوه بر افزایش پیچیدگی تصمیم‌گیری، موجب ایجاد حالات نامطلوبی مانند ریسک می‌شود. به همین دلیل در این مقاله تصمیم‌گیری برای خرید انرژی مصرف‌کنندگان بزرگ، در محیط تجدید ساختاریافته با حضور عدم قطعیت ناشی از توربین‌های بادی بررسی شده است. قیمت در بازار انرژی الکتریکی و میزان تقاضای انرژی الکتریکی نیز با عدم قطعیت همراه است. لحاظ همزمان این سه منبع عدم قطعیت موجب افزایش ریسک می‌شود. در همین راستا، معیاری مناسب از ارزیابی ریسک انتخاب شده تا در نهایت تهیه انرژی الکتریکی با کمترین ریسک همراه شود. همچنین به منظور نمایش تأثیر انرژی الکتریکی حاصل از باد در هزینه و ریسک، آزمایشی به همین منظور انجام شده است. کارایی روش پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی‌های متنوع به اثبات رسیده است.

کلیدواژه: تصمیم‌گیری، انرژی‌های تجدیدپذیر، ریسک، مصرف‌کنندگان بزرگ، بازار انرژی الکتریکی

Decision making to procure electrical energy of large consumers in the presence of wind turbines

A. Najafi, PhD student¹, H. Falaghi, Associate professor², M. Ramezani, Associate professor³

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: arsalan.najafi@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: falaghi@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mramezani@birjand.ac.ir

Abstract: Consumers seek an economic way to procure electrical energy in the competitive electricity market. These ways includes: bilateral contract, participating in the pool market and generating the energy by the self-generating units. Electrical energy should be bought in appropriate time with the best price. In the other hand, effects of increasing the renewable energies have been investigated in the recent years. Considering the uncertainty of these sources increases the complexity of the decision making process as well as un-favorite decision making situations. In this paper, decision making to procure the electrical energy has been investigated in the presence of wind turbine uncertainty. The electricity energy prices and the electricity load demand have also uncertainty. Considering three sources of uncertainty increases the decision making risk. In this regard, an appropriate risk index has been selected to decrease the risk in the system. A simulation is also conducted to demonstrate the wind generation effects. Efficiency of the proposed method has been verified with various simulations.

Keywords: Decision making, renewable energies, risk, large consumers, electrical energy market.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۴

نام نویسنده مسئول: حمید فلقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - بلوار دانشگاه - پردیس شوکت آباد - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مهندسی قدرت

۱- مقدمه

در سیستم قدرت تجدید ساختاریافته، مصرف‌کنندگان بزرگ به مصرف‌کنندگانی اطلاق می‌شود که به‌صورت مستقیم می‌توانند در بازار انرژی الکتریکی شرکت کنند. مصرف‌کنندگانی نظیر صنایع بزرگ، کارخانه‌ها و یا قسمتی از یک شهر و ... [۱]. هدف اصلی این مصرف‌کنندگان از شرکت در بازار، تهیه انرژی الکتریکی با کم‌ترین هزینه است [۲]. این مصرف‌کنندگان می‌توانند انرژی موردنیاز خود را از راه‌های مختلفی به دست بیاورند که عبارت‌اند از: شرکت مستقیم در بازار حوضچه توان^۱، خرید از طریق قرارداد دوجانبه^۲ و تولید با ژنراتورهای تحت مالکیت. هنگامی که مصرف‌کنندگان دانش صحیحی از قیمت بازار و رفتار رقبای نداشته باشند عمل تصمیم‌گیری پیچیده‌تر می‌شود. به‌همین دلیل شرکت‌کنندگان در بازار انرژی الکتریکی سعی می‌کنند که با کنترل ریسک ناشی از عدم قطعیت قیمت بازار، هزینه‌های خود را کمینه کنند. با توجه به اهمیت امر خصوصی‌سازی، تأمین درصدی از بار یک شهر توسط یک بنگاه خصوصی (مالک و یا مسئول تأمین بار مصرف‌کننده بزرگ) در آینده‌ای نه‌چندان دور، در بسیاری از کشورها کاملاً محتمل به‌نظر می‌رسد.

تاکنون فعالیت‌های متعددی مرتبط با مصرف‌کنندگان بزرگ در شبکه‌های توزیع انجام شده است. شرایط لازم برای مشارکت مصرف‌کنندگان در بازار در [۳] بررسی شده است. گزینه‌های انتخاب برای مشتریان صنعتی در یک بازار رقابتی در [۴] مورد بحث قرار گرفته است. نحوه پیشنهاددهی قیمت از سمت مصرف‌کنندگان در بازار روزانه و لحظه‌ای در [۵] تحلیل شده است. نویسندگان مرجع [۶] به مسئله تهیه انرژی مصرف‌کنندگان بزرگ پرداخته‌اند درحالی‌که هیچ عدم قطعیتی لحاظ نشده است. در [۷ و ۸] نیز از روش پراکنش^۳ میانگین برای حل مسئله خرید انرژی برای مصرف‌کنندگان بزرگ استفاده شده است. در [۹ و ۲] نویسندگان روشی را برای تهیه انرژی معرفی کرده‌اند که به‌وسیله آن می‌توان ریسک ناشی از خرید انرژی را برای مصرف‌کنندگان بزرگ در نظر گرفت. اگرچه نویسندگان عدم قطعیت را تنها در قیمت بازار لحاظ کرده‌اند. تحقیقات برای خرید انرژی برای مصرف‌کنندگان بزرگ اخیراً نیز مورد توجه محققان بوده است. در [۱۰] تهیه انرژی در شرایطی انجام شده است که در آن هزینه انتقال نیز در نظر گرفته شده است. در [۱۱] طراحی بهینه قرارداد دوجانبه به‌منظور دستیابی به جواب بهینه در مسئله خرید انرژی انجام شده است. در [۱۲] فضای جدید شبکه هوشمند در نظر گرفته شده است. در این مقاله استراتژی جدیدی برای نحوه پیشنهاد مزایده^۴ برای مصرف‌کنندگان بزرگ در یک شبکه هوشمند ارائه شده است. ریزشبکه‌ها به دلیل کوچک بودن بار به‌صورت مستقیم نمی‌توانند در بازار انرژی الکتریکی شرکت نمایند. این فضای جدید در [۱۳] نیز بررسی شده است، به‌گونه‌ای که طی آن انرژی الکتریکی در ریز شبکه به‌گونه‌ای تأمین می‌شود که مالکان تولیدات پراکنده متضرر نشوند. همچنین نویسندگان در [۱۴]، با در نظر گرفتن شبکه‌های مجازی

متشکل تعداد زیادی منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی و تعداد زیادی مصرف‌کننده کوچک یک شبکه مجازی تشکیل داده و در بازار انرژی الکتریکی شرکت کرده‌اند. علاوه بر مصرف‌کنندگان بزرگ، خرده‌فروشان نیز می‌توانند برای تهیه انرژی در بازار انرژی الکتریکی شرکت نمایند. در [۱۵] تهیه انرژی در شرایطی بررسی شده است که طی آن خرده‌فروشان برای پاسخ‌گویی بار تشویق در نظر گرفته‌اند که این تشویق به‌وسیله یک منحنی پله‌ای تقریب زده شده است. همچنین نویسندگان [۱۶] پاسخ بهینه برای تهیه انرژی برای خرده‌فروشان انرژی الکتریکی را، هنگامی که گزینه‌های مختلفی برای تهیه انرژی وجود دارد، با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی تعیین کرده‌اند.

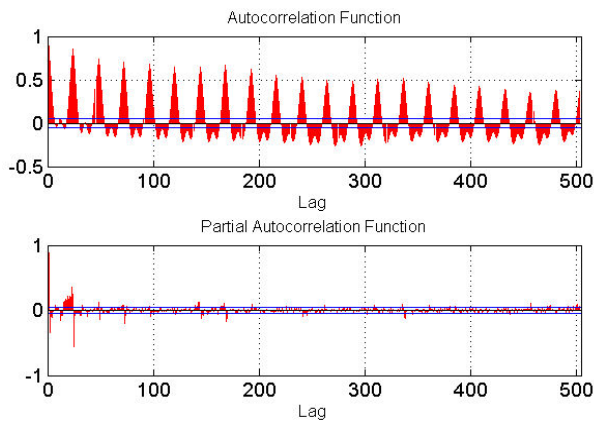
در راستای تکمیل پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، در این مقاله تصمیم‌گیری خرید انرژی مصرف‌کنندگان بزرگ در شبکه توزیع در حضور توربین‌های بادی بررسی خواهد شد. در واقع در نظر گرفتن تولید توربین‌های بادی و عدم قطعیت ناشی از توربین‌های بادی در تصمیم‌گیری خرید انرژی برای مصرف‌کنندگان بزرگ، نوآوری این مقاله است. بدیهی است در نظر گرفتن این عدم قطعیت علاوه بر عدم قطعیت ناشی از قیمت بازار و بار الکتریکی مصرف‌کنندگان بر پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری می‌افزاید. یک شبکه با بار واقعی و قیمت‌های واقعی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. میزان بار نیز درصدی از بار شهر نیویورک است و قیمت‌ها نیز دارای عدم قطعیت هستند. همچنین یک مزرحه بادی در نظر گرفته شده که عدم قطعیت ناشی از سرعت باد در نظر گرفته خواهد شد و با استفاده از یک معیار ریسک، پاسخ‌های مناسب و کارآمد به دست خواهند آمد.

در این مقاله ابتدا بیان مسئله و سپس نحوه تولید سناریوها بیان خواهد شد. بعد از آن، فرمول‌بندی مسئله و چارچوب تصمیم‌گیری در یک بازار نامطمئن بررسی می‌شود. در بخش بعدی نتایج مطالعات عددی ارائه خواهد شد و در نهایت نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

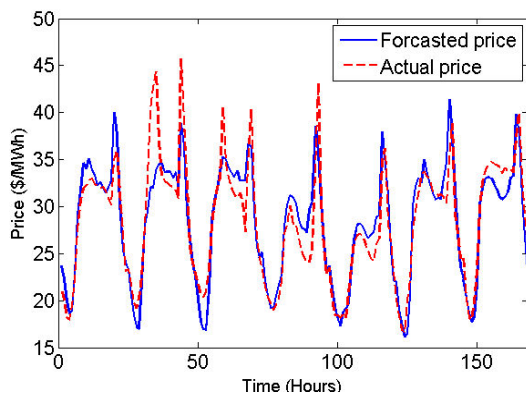
۲- بیان مسئله

همان‌گونه که ذکر شد، مصرف‌کنندگان بزرگ گزینه‌های مختلفی برای تهیه انرژی پیش روی دارند. شکل ۱ راه‌های تهیه انرژی توسط مصرف‌کنندگان بزرگ را نشان می‌دهد. در این مقاله تمامی این موارد در نظر گرفته شده‌اند. حال تصمیم‌گیری بدین صورت تعریف می‌شود که از هرکدام از این منابع به چه اندازه و در چه زمانی انرژی خریداری و یا تولید شود، به‌گونه‌ای که هزینه‌های ناشی از این عمل کمینه شود. مصرف‌کنندگان برای تصمیم‌گیری با چالش عدم قطعیت روبرو هستند. قیمت بازار و بار الکتریکی مصرف‌کنندگان همواره دارای عدم قطعیت هستند که تاکنون نیز به این موضوع پرداخته شده است [۲]. در صورتی که عدم قطعیت توربین‌های بادی نیز به این عدم قطعیت اضافه شود، فضای تصمیم‌گیری و جواب‌های ممکن مسئله تغییر خواهد کرد. برای تصمیم‌گیری در این چنین فضای نامطمئنی باید از مفهوم سناریو، که یکی از قابلیت‌های برنامه‌ریزی تصادفی است، استفاده کرد.

در این رابطه $\hat{\lambda}_t$ قیمت پیش‌بینی شده بازار است. مقدار به‌دست‌آمده برای $\sqrt{FMSE}$ در طول هفته اول ۱۲/۴۴ بوده که در مقایسه با مقادیر ارائه‌شده در [۱۳] کاملاً قابل قبول است.



شکل ۲: ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی قیمت بازار نیویورک



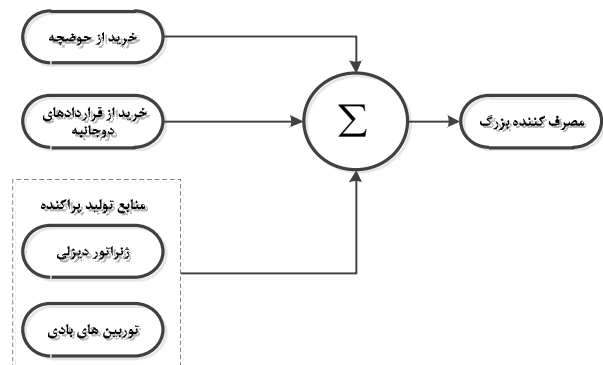
شکل ۳: قیمت پیش‌بینی شده از بازار انرژی الکتریکی نیویورک در یک هفته نمونه

جدول ۱: ضرایب معنی‌دار در پیش‌بینی قیمت بازار با استفاده از سری زمانی

ARIMA			
ضریب	مقدار	ضریب	مقدار
ϕ_{143}	-۰/۰۴۸۷۱۵۱	ϕ_1	۰/۱۳۷۴۷۶
ϕ_{145}	۰/۰۱۳۹۵۱۹	ϕ_2	۰/۱۷۷۲۰۱
ϕ_{168}	-۰/۱۷۹۵۸۵	ϕ_3	-۰/۰۳۴۷۵۴۵
θ_1	-۰/۹۲۸۶۹۳	ϕ_{24}	۰/۳۴۲۲۷۶
θ_2	-۰/۰۳۶۳۰۹۸	ϕ_{32}	-۰/۰۷۴۹۲۶۶
θ_{24}	۰/۰۹۲۸۳۶۲	ϕ_{48}	۰/۱۸۱۲۰۳
θ_{168}	-۰/۰۷۶۳۰۸	ϕ_{72}	۰/۱۴۳۹۲۵
θ_{336}	-۰/۰۳۴۹۶۶۸	ϕ_{97}	۰/۰۳۸۲۶۱۶
θ_{504}	-۰/۰۵۳۱۱۷۱	ϕ_{121}	۰/۰۰۹۰۳۶۲۲

با استفاده از این ضرایب معنی‌دار و با استفاده از روش ارائه‌شده در [۱] تعداد ۱۰۰ سناریو از قیمت بازار تولید شده است. اساس این روش به این صورت است که یک سناریوی مشخص باید برای تمام ساعت‌ها (T)، تولید شود. بعد از تعیین ضرایب عملگرهای پس‌رو، با داشتن مقدار پراکنش می‌توان سناریوی s_p را تولید کرد. حال با تغییر مقدار پراکنش

بنابراین ابتدا باید سناریوهایی از منابع عدم قطعیت موجود در مقاله (قیمت بازار، تقاضای الکتریکی و سرعت باد) تولید شده و سپس مدل مسئله در قالب برنامه‌ریزی تصادفی بیان شود.



شکل ۱: راه‌های تهیه انرژی توسط مصرف‌کنندگان بزرگ

۳- تولید سناریو

۳-۱- تولید سناریوی قیمت بازار

قیمت بازار همواره دارای نوسان بوده و به صورت روزانه و هفتگی در حال تغییر است. ماهیت قیمت بازار همواره به‌گونه‌ای است که دارای میانگین و پراکنش متغیر با زمان است. به همین دلیل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی قیمت بازار از سری زمانی ARIMA^۵ و روش ارائه‌شده در [۱۷] استفاده می‌شود. این سری زمانی به صورت کلی دارای معادله زیر است.

$$\phi(B) \cdot \lambda_t = \theta(B) \cdot \varepsilon_t \quad (1)$$

در این رابطه ε_t تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و λ_t نیز قیمت بازار در ساعت t ام هستند. $\phi(B)$ و $\theta(B)$ نیز عملگرهای پس‌رو^۶ هستند که هرکدام با یک سری ضرایب معنی‌دار مشخص می‌شوند. این ضرایب با استفاده از روش باکس^۷ و جنکینس^۸ قابل حصول هستند [۱۸]. به همین منظور ابتدا باید ضرایب خودهمبستگی^۹ و خودهمبستگی جزئی^{۱۰} استخراج شوند. این ضرایب در شکل ۲ آورده شده است. ضرایب معنی‌دار استخراج‌شده از بازار نیویورک نیز به‌صورت جدول ۱ است. قیمت‌ها با استفاده از شبیه‌سازی قیمت‌های بازار نیویورک در سال ۲۰۱۲ به‌دست آمده و پیش‌بینی‌ها برای مدت ۲۸ روز انجام شده است. برای پیش‌بینی از اطلاعات تاریخی در بازه زمانی ۱ دسامبر ۲۰۱۱ تا ۳ آوریل ۲۰۱۲ استفاده شده و بازه زمانی ۴ آوریل تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۲ پیش‌بینی شده است [۱۹]. یک هفته نمونه از این پیش‌بینی در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تأیید کارایی پیش‌بینی انجام‌شده از شاخص ارائه‌شده در [۱۳] استفاده شده است. این شاخص متوسط خطای پیش‌بینی بوده و به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\sqrt{FMSE} = \sqrt{\sum_{t=1}^{168} (\lambda_t - \hat{\lambda}_t)^2} \quad (2)$$

ARMA(2,3) به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای سایت واتفورد حاصل شده است. در نهایت رابطه سری زمانی به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$z_t = \varepsilon_t + 1.147z_{t-1} - 0.3049z_{t-2} - 0.0747\varepsilon_{t-1} + 0.01756\varepsilon_{t-2} + 0.0356\varepsilon_{t-3} \quad (5)$$

پراکنش تخمینی برای سری زمانی نیز ۰/۳۱ به دست آمده است. در شکل ۵ شاخص خودهمبستگی داده‌های تاریخی در بازه زمانی پیش‌بینی شده و شاخص شبیه‌سازی شده نمایش داده شده است. نزدیکی شاخص‌های واقعی و پیش‌بینی شده، نشان از صحت مدل ارائه شده است.

خروجی توربین‌های بادی تابعی از سرعت باد است. این تابع به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود. سه پارامتر اصلی در این تابع عبارت‌اند از: V_n ، V_{cin} و V_{cout} . زمانی که سرعت باد به اندازه V_{cin} می‌رسد، توربین‌های بادی شروع به تولید توان می‌کنند. هنگامی که سرعت باد به اندازه V_n می‌رسد توان خروجی به اندازه نامی P_n می‌رسد. در صورتی که سرعت باد از اندازه V_{cout} بیش‌تر شود تولید توان متوقف می‌شود. این روابط به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq WS_t \leq V_{cin} \\ A+B \times WS_t + C \times WS_t^2 & V_{cin} \leq WS_t \leq V_n \\ P_n & V_n \leq WS_t \leq V_{cout} \\ 0 & V_{cout} \leq WS_t \end{cases} \quad (6)$$

در این رابطه، P_t توان خروجی توربین‌های بادی در ساعت t هستند. ضرایب A ، B و C نیز با استفاده از V_{cin} ، V_n و V_{cout} قابل حصول هستند و روابط آن‌ها در [۲۵] موجود است.

۳-۳- تولید سناریوهای بار مصرف‌کننده

میزان بار به‌صورت محلی بوده و میزان تولید توربین‌های بادی تحت مالکیت تصمیم‌گیرنده است. بنابراین با دقت قابل‌قبولی می‌توان از احتمال اندک همبستگی بین بار محلی و تولیدات بادی توربین‌های تحت مالکیت صرف‌نظر کرد. برای تولید سناریوهای بار مصرف‌کننده، فرض می‌شود که میزان مصرف و تولید توربین‌های بادی کاملاً از هم مستقل هستند ولی همبستگی بین قیمت و میزان بار در نظر گرفته می‌شود. به‌همین منظور برای تولید سناریوهای بار از رابطه بیان شده در [۲۶] استفاده می‌شود. این رابطه به‌گونه‌ای است که در آن سناریوهای بار از روی سناریوهای قیمت محاسبه شده که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{rw}^D = \bar{P}_t^D \left[1 + \gamma \left(\frac{s_p - \bar{\lambda}_t}{\bar{\lambda}_t} \right) \right] \quad (7)$$

در این رابطه P_{rw}^D میزان بار در سناریوی w ، $\bar{\lambda}_t$ میانگین سناریوی قیمت تولیدشده در زمان t ، $\bar{P}_t^D$ نیز میانگین بار در ساعت t و γ نیز عددی است که نشان‌دهنده ارتباط بین قیمت و بار است که در این مقاله برابر ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود.

می‌توان به تعداد دلخواه سناریو تولید کرد. شکل ۴ فلوجارت مراحل تولید سناریوی قیمت بازار را برای تولید SP سناریو نشان می‌دهد.

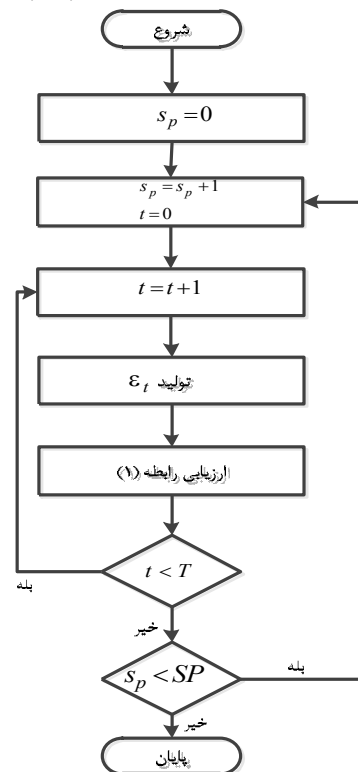
۳-۲- تولید سناریوی بادی

برای مدل‌سازی سرعت باد از سری‌های زمانی ARMA استفاده شده است. سری زمانی ARMA در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳-۲۰]:

$$z_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^m \psi_i z_{t-i} + \sum_{j=1}^n \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (3)$$

که در این رابطه z_t مقدار سری زمانی در زمان t ، ψ_i ($i=1,2,3,\dots,m$) و θ_j ($j=1,2,3,\dots,n$) به ترتیب ضرایب الگو^{۱۱} و میانگین متحرک^{۱۲} هستند. سرعت باد ده در ساعت t (WS_t) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

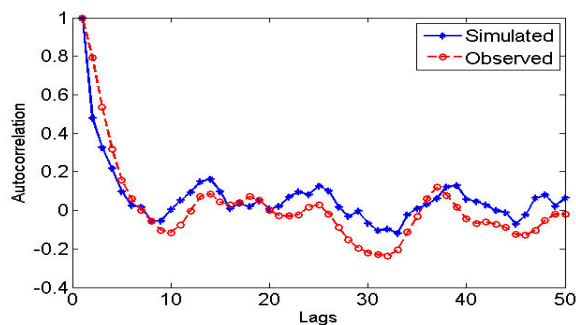
$$WS_t = \mu_t + \sigma_t \cdot z_t \quad (4)$$



شکل ۴: فلوجارت روش تولید سناریوهای قیمت

در این رابطه μ_t و σ_t به ترتیب میانگین و انحراف معیار سرعت باد در زمان t هستند. ضرایب الگو و میانگین متحرک با استفاده از ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزیی سرعت باد به دست می‌آیند. برای شبیه‌سازی سرعت باد در این مقاله از اطلاعات سایت واتفورد^{۱۳} در منطقه‌ی داکوتای شمالی^{۱۴} استفاده شده است [۲۴]. میانگین و انحراف معیار داده‌های تاریخی به ترتیب ۹/۶۳ متربرثانه و ۵/۶۳ هستند. این اطلاعات برای ایجاد سری زمانی ARMA استفاده شده است [۱۶ و ۱۷]. اطلاعات تاریخی در برگرنده سرعت باد به مدت ۱۲ سال از ماه مارس ۲۰۰۱ تا مارس ۲۰۱۲ است. سری زمانی

گام چهارم: در صورتی که تعداد مجموعه‌های انتخابی کافی باشند به گام سوم رفته در غیر این صورت به گام پنجم می‌رویم.
گام پنجم: احتمال هر سناریوی انتخاب‌نشده، به نزدیک‌ترین سناریو از بین سناریوهای انتخاب‌شده اضافه می‌شود.



شکل ۵: شاخص خودهمبستگی سرعت باد پیش‌بینی شده و واقعی سایت واتفورد

۴- تصمیم‌گیری برای خرید انرژی الکتریکی با وجود عدم قطعیت‌ها

۴-۱- گزینه‌های خرید در بازار نامطمئن
گزینه‌های خرید انرژی مصرف‌کنندگان بزرگ از نظر بازه زمانی در یک برنامه‌ریزی میان‌مدت با یکدیگر متفاوت هستند. این گزینه‌ها براساس زمان به‌صورت زیر هستند [۱]:

- قرارداد ماهانه که در ابتدای ماه امضا می‌شود.
 - قراردادهای هفتگی که در ابتدای هفته امضا می‌شود.
 - خریداری از حوضچه که به صورت روزانه انجام می‌شود.
 - تهیه توان با ژنراتورهای خودی که به‌صورت روزانه بررسی می‌شود.
- هر کدام از این موارد در ادامه بررسی می‌شوند.

۴-۲- مدل‌سازی بازار حوضچه توان
مصرف‌کنندگان به‌منظور خرید یا فروش انرژی در بازار انرژی الکتریکی شرکت می‌کنند. تراکنش‌ها در بازار حوضچه توان به قیمت بازار وابسته هستند. به دلیل عدم قطعیت در قیمت بازار، این تصمیم‌گیری‌ها همواره با پیچیدگی‌های خاص خود همراه هستند. قیمت‌ها در قالب سناریو بیان می‌شوند. هر سناریویی تحقق^{۱۵} قیمت حوضچه در تمام دوره‌های زمانی است. یعنی هر سناریویی بیانگر یک حالت خرید انرژی با احتمال مربوط به خود است. هزینه نهایی در حوضچه توان به‌صورت زیر به دست می‌آید [۲]:

$$C_{ts}^P = \lambda_{ts}^P \cdot P_{ts}^P \quad (12)$$

در این رابطه λ_{ts}^P قیمت بازار، P_{ts}^P توان خریداری شده در سناریوی s و ساعت t و C_{ts}^P نیز هزینه نهایی تراکنش است.

۳-۳- ترکیب سناریوها

برای مدل‌سازی مسئله در قالب یک برنامه‌ریزی تصادفی، باید از مفهوم سناریو استفاده کرد. هر سناریویی در برگرفته تمامی اطلاعات نامطمئن مسئله است. بنابراین در این پژوهش سناریوها برداری متشکل از قیمت بازار و سرعت باد هستند. با توجه به اینکه قیمت بازار و سرعت باد از هم مستقل هستند باید تمامی ترکیب‌های ممکن از این دو سناریو در نظر گرفته شود. برای ترکیب سناریوها از روش ارائه‌شده در [۲۷] استفاده می‌شود. فرم کلی هر سناریو به‌صورت زیر خواهد بود:

$$V(s) = [s_p \ s_w] \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (8)$$

که در این رابطه، $V(s)$ بردار سناریوی s ، s_w سناریوی بادی و s نیز تعداد کل سناریوها است. بدیهی است به دلیل همبستگی بین قیمت بازار و بار الکتریکی مصرف‌کننده، این دو سناریو همانند یک بردار در عمل ترکیب فرض می‌شود.

۳-۴- تکنیک کاهش سناریو

تعداد نهایی سناریوها از ترکیب تمام سناریوهای قیمت بازار و سرعت باد به دست می‌آید. ترکیب این دو، باعث بالا رفتن تعداد سناریوها و افزایش زمان حل مسئله می‌شود. به دلیل زیاد بودن تعداد سناریوها که موجب افزایش زمان محاسبات می‌شود، باید از روش‌های مناسب برای کاهش تعداد سناریوها استفاده کرد. در این مقاله روش استفاده‌شده در [۲۸] به کار گرفته شده است که دارای مراحل زیر است:

گام اول: ماتریسی تشکیل می‌شود که در برگرفته فاصله متوسط یک سناریو و بقیه سناریوها باشد $c(s, s')$.

$$c(s, s') = \|V(s) - V(s')\| \quad (9)$$

گام دوم: برای هر سناریو در مجموعه S ، فاصله میانگین بین یک سناریوی مشخص و بقیه سناریوها به دست می‌آید. سناریوی با کم‌ترین فاصله اولین سناریویی است که انتخاب می‌شود. سناریوی s_1 برای مجموعه S_r به‌صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$s_1 = \arg \left\{ \min_{s \in S_r} \sum_{s' \in S_r} \pi_{s'} c(s, s') \right\} \quad (10)$$

$S_r = \{s_1\}$ ، $S_J = S_r - s_1$
در این رابطه $\arg$ سناریویی که انتخاب شده را ارائه می‌دهد. S_r مجموعه سناریوهای انتخاب‌شده و S_J نیز مجموعه سناریوهای انتخاب‌نشده است. در همین مرحله مجموعه سناریوهای انتخاب‌نشده، به‌روز می‌شود.

گام سوم: سناریوی بعدی از بین سناریوهای انتخاب‌نشده است. برای هر سناریوی انتخاب‌نشده، فاصله متوسط بین سناریوهای انتخاب‌نشده و انتخاب‌شده محاسبه می‌شود. سناریویی که کم‌ترین فاصله را داشته باشد، انتخاب بعدی خواهد بود و به‌صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$s_n = \arg \left\{ \min_{s' \in S_J} \sum_{s \in S_r \cup \{s'\}} \pi_s \min_{s'' \in S_r \cup \{s'\}} c(s, s'') \right\} \quad (11)$$

$S_r = S_r \cup \{s_n\}$ ، $S_J = S_J - s_n$
در این مرحله نیز مجدداً مجموعه سناریوهای انتخاب‌نشده به‌روز می‌شود.

۳-۴- قراردادهای دوجانبه

مصرف‌کنندگان می‌توانند برای تأمین بخشی از انرژی خود از قراردادهای دوجانبه استفاده نمایند. قرارداد دوجانبه یک معاهده بین دو طرف در بیرون از محیط بازار برق است. درواقع مصرف‌کنندگان با امضای یک قرارداد با قیمت مشخص مقداری از میزان مواجه شدن با عدم قطعیت حوضچه توان را می‌کاهند. بنابراین فرض می‌شود قیمت قرارداد λ_s^b مستقل از قیمت بازار است. هزینه خرید از قرارداد دوجانبه در سناریوی s و قرارداد b با C_{bs}^B معرفی شده و به‌صورت زیر به دست می‌آید [۱]:

$$C_{bs}^B = \sum_{t \in T_b} \lambda_{bts}^B P_{bs}^B \quad (13)$$

متغیر تصمیم‌گیری P_{bs}^B توان خریدشده از قرارداد b در سناریوی s را مدل می‌کند. طول دوره این قرارداد T_b است. این توان ممکن است در هر بازه زمانی از بازه مطالعه انجام شود.

۴-۴- تأمین انرژی با ژنراتورهای تحت مالکیت

معمولاً مصرف‌کنندگان دارای یک یا چند واحد تولیدی هستند که مالکیت آن‌ها را خود دارا می‌باشند و به وسیله این واحدها بخشی از انرژی خود را تأمین می‌کنند. دو مدل از منابع تولید پراکنده در این مقاله بررسی می‌شود. توربین‌های بادی در بخش ۲-۳ معرفی شده است. در ادامه نیز مدل‌سازی ژنراتورهای دیزلی ارائه می‌شود. تابع هزینه ژنراتورهای دیزلی به‌صورت یک تابع هزینه درجه دو مدل‌سازی می‌شود که این تابع هزینه به‌صورت پله‌ای تقریب زده می‌شود. انرژی کل با ژنراتورهای دیزلی به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

$$P_{ts}^{DSG} = \sum_{n=1}^{N_N} P_{nts}^{DSG} \quad (14)$$

در این رابطه P_{nts}^{DSG} انرژی تولیدشده در پله n زمان t و سناریوی s است. همچنین N_N نیز تعداد کل پله‌های تقریبی است. هزینه نهایی نیز به‌صورت زیر خواهد بود:

$$C_{ts}^{DSG} = \sum_{n=1}^{N_N} S_n^{DSG} P_{nts}^{DSG} \quad (15)$$

در این رابطه S_n^{DSG} هزینه تولید انرژی در پله n است [۱].

۴-۵- هزینه نهایی تهیه انرژی

همان‌گونه که ذکر شد انرژی موردنیاز از سه طریق تهیه می‌شود. بنابراین هزینه کل TC_{ts} از مجموع این سه به دست می‌آید. ضمن اینکه هزینه تولید انرژی توربین‌های بادی صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$TC_{ts} = C_{ts}^{DSG} + C_{bs}^B + C_{ts}^P \quad (16)$$

۵- فرمول‌بندی مسئله در چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی

۵-۱- به‌کارگیری برنامه‌ریزی تصادفی در خرید انرژی الکتریکی

مسئله خرید انرژی الکتریکی یک مسئله چندمرحله‌ای بوده که در قالب برنامه‌ریزی تصادفی قابل حل است. به‌همین منظور در این مقاله یک بازه زمانی چهار هفته‌ای در نظر گرفته می‌شود و تهیه انرژی الکتریکی در طول این چهار هفته انجام می‌شود. این چهار هفته از ۶۷۲ ساعت تشکیل شده است. برای کاهش ابعاد مسئله به‌گونه‌ای که خللی در دقت مسئله ایجاد نشود، هر دو ساعت یک واحد زمانی در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد واحدهای زمانی به ۳۳۶ کاهش یافته است [۱]. متغیرهای تصمیم در این مسئله عبارت‌اند از:

- تشخیص میزان و مقدار خرید انرژی از قراردادهای دو جانبه
- میزان خرید انرژی الکتریکی از حوضچه توان در تمامی زمان‌ها
- میزان تولید ژنراتور دیزلی در هر واحد زمانی
- میزان تولید توربین‌های بادی در هر واحد زمانی

میزان خرید از قراردادهای دوجانبه در ابتدای ماه و یا ابتدای هفته منعقد می‌گردد و بدون اطلاع از قیمت‌های آینده بازار این کار انجام می‌شود که به تحقق سناریوها نیز مرتبط نیستند. به همین دلیل به این نوع متغیرهای تصمیم‌گیری، متغیرهای اینجا و اکنون^{۱۶} گفته می‌شود. در عوض متغیرهای مربوط به بازار حوضچه توان و ژنراتورهای دیزلی و توربین‌های بادی به‌اندازه کافی به زمان مصرف نزدیک هستند و به آن‌ها متغیرهای بمان و ببین^{۱۷} گفته می‌شود.

طبق مطالب فوق‌الذکر دو منبع عدم قطعیت شامل قیمت بازار و سرعت باد وجود دارند. این دو منبع عدم قطعیت کاملاً مستقل از یکدیگر هستند. درنتیجه باید تمامی ترکیب‌های ممکن از سناریوهای این دو عدم قطعیت را در نظر گرفت. بنابراین هر سناریویی متشکل از قیمت بازار و سرعت باد (انرژی الکتریکی بادی) است. شکل ۶ چارچوب تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. در این شکل تعداد مرحله‌ها و نوع متغیرهای تصمیم‌گیری در هر مرحله مشخص شده است. همچنین تعدادی مسیر در هر گره مشخص است. ترکیب این گره‌ها به تولید سناریوهای ممکن منجر می‌شود. درواقع هر سناریوی تحقق یک مسیر کامل از گره ریشه تا آخرین گره است.

$$\sum_{t=1}^{N_T} (\sum \lambda_{bts}^B P_{bs}^B + \lambda_{ts}^P P_{ts}^P + \sum_{n=1}^{N_N} S_n^{DSG} P_{nts}^{DSG}) - \xi \leq \eta_s \quad \eta_s \geq 0 \quad (19)$$

ξ مقدار در ریسک^{۱۹} نامیده می‌شود. VaR کوچک‌ترین مقدار هزینه‌ای است که در آن احتمال میزان هزینه‌هایی که بیش‌تر یا مساوی ξ است، کوچک‌تر یا مساوی (1-α) است. علاوه‌براین η_s شرایطی را به وجود می‌آورد که هزینه‌های بزرگ‌تر از ξ مثبت باشند. در نهایت تابع هدف کلی دربرگیرنده هزینه‌ها و ریسک به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \\ \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{t=1}^{N_T} (\sum \lambda_{bts}^B P_{bs}^B + \lambda_{ts}^P P_{ts}^P + \sum_{n=1}^{N_N} S_n^{DSG} P_{nts}^{DSG}) \\ + \beta (\xi + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{s=1}^S \pi_s \eta_s) \end{aligned} \quad (20)$$

در این رابطه β عددی است که اهمیت میزان ریسک را نشان می‌دهد و تعادلی بین امید ریاضی هزینه و ریسک ایجاد می‌کند. قابل ذکر است برای بهینه‌سازی این تابع هدف باید قیود مرتبط با قراردادهای دوجانبه، حوضچه توان و تولیدات خودی نیز در نظر گرفته شوند [۱ و ۲۹].

۴-۵ - قیود مسئله

- محدودیت‌های بازار انرژی الکتریکی محدودیتی در خرید از حوضچه توان در بازار انرژی الکتریکی وجود ندارد. ولی در قرارداد دو جانبه اگر قرارداد b انتخاب شود، توان تهیه شده P_{bs}^B به‌وسیله حد بالا و پایین خودش محصور خواهد شد:

$$P_{bs}^{B,\min} \leq P_{bs}^B \leq P_{bs}^{B,\max} \quad (21)$$

- محدودیت تعادل بار

منابع تهیه انرژی (قرارداد دوجانبه، حوضچه توان و ژنراتورهای تحت مالکیت) باید بتوانند میزان بار را برآورده نمایند که این مهم به‌صورت ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$P_{ts}^{DSG} + P_{ts}^P + WTG_{ts} + \sum_{b \in B_t} P_{bs}^B = P_{tw}^D \quad (22)$$

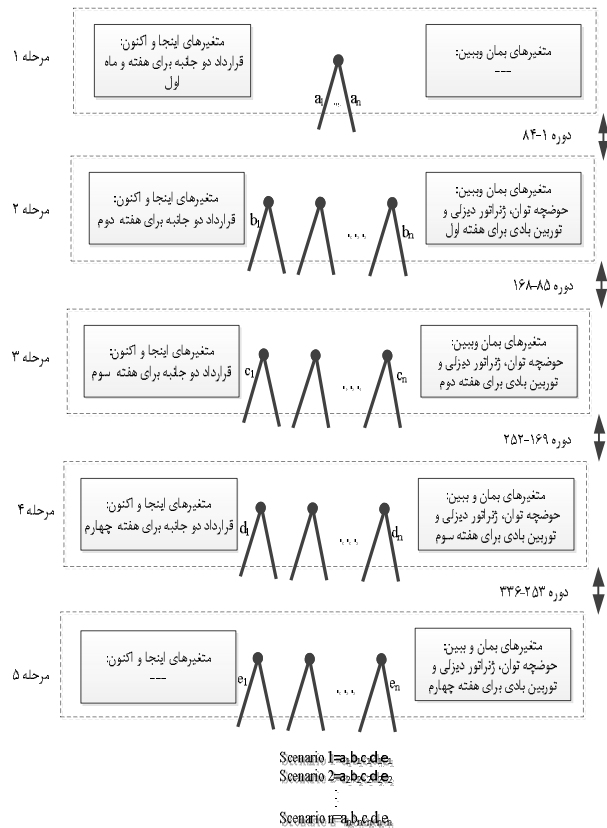
در این رابطه WTG_{ts} میزان تولید توربین‌های بادی در سناریوی s و زمان t است.

- قیود ریسک

در صورتی که تابع ریسک CVaR در تابع هدف در نظر گرفته شود، محدودیت‌های مربوط به ریسک که در رابطه (۱۹) بیان شده نیز باید در نظر گرفته شود.

- پیش‌بینی ناپذیری

برنامه‌ریزی تصادفی از تعداد زیادی سناریو تشکیل شده که به‌صورت چندمرحله‌ای است. هر سناریویی متشکل از یک جواب ممکن در طول دوره برنامه‌ریزی است. هنگامی که تحقق دو سناریوی مختلف s و s' در مرحله k یکسان باشد، آنگاه مقادیر متغیرهای تصمیم در این مرحله مساوی هستند. در مسئله چندمرحله‌ای خرید انرژی برای



شکل ۶: چارچوب تصمیم‌گیری در بازار نامطمئن

۲-۵ - تابع هدف بدون در نظر گرفتن ریسک

مسئله خرید انرژی برای مصرف‌کنندگان بزرگ، یک مسئله بهینه‌سازی چندمرحله‌ای بوده که امید ریاضی هزینه در آن با استفاده از رابطه (۱۵) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \\ \sum_{s=1}^S \pi_s \sum_{t=1}^{N_T} (\sum \lambda_{bts}^B P_{bs}^B + \lambda_{ts}^P P_{ts}^P + \sum_{n=1}^{N_N} S_n^{DSG} P_{nts}^{DSG}) \end{aligned} \quad (17)$$

در این رابطه π_s احتمال سناریوی s است.

۳-۵ - تابع هدف با در نظر گرفتن ریسک

در مسئله تصمیم‌گیری برای تهیه انرژی، هزینه‌های ناشی از خرید انرژی باید کمینه شده، ضمن اینکه باید ریسک ناشی عدم قطعیت‌ها نیز در نظر گرفته شوند. امید ریاضی تابع هدف کمینه‌سازی به‌صورت (۱۷) بیان شد.

در این مقاله برای مدل کردن ریسک ناشی از تغییرات هزینه‌ها، از مدل مقدار شرطی در ریسک^{۱۸} در سطح اطمینان α استفاده می‌شود. CVaR درواقع امید ریاضی $(1-\alpha) \times 100\%$ از سناریوها با بزرگ‌ترین مقدار هزینه است. CVaR با مدل ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$CVaR = \min \xi + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{s=1}^S \pi_s \eta_s \quad (18)$$

در این رابطه محدودیت زیر نیز باید در نظر گرفته شود:

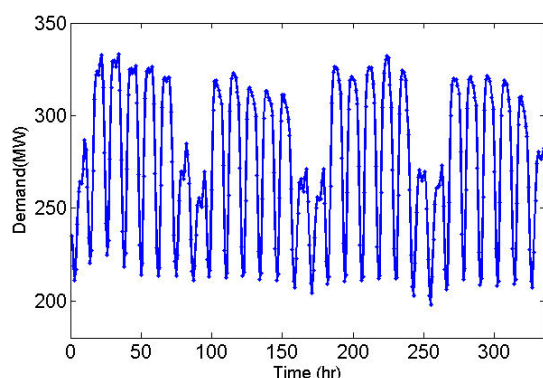
۱-۶- آزمایش اول

در این آزمایش میزان ضرایب مرتبط با ریسک ثابت در نظر گرفته می‌شود و میزان β و α به ترتیب برابر ۱ و ۰/۹ است. شبیه‌سازی‌ها انجام شده و در شکل‌های متنوع نمایش داده شده‌اند. شکل ۱۱ چهار سناریوی نمونه مذکور را نشان می‌دهد. این چهار سناریو بیانگر این موضوع می‌باشد که سناریوهای مختلف در بازه‌های زمانی مختلف، میزان خرید انرژی متفاوتی را از حوضچه توان پیشنهاد می‌دهند که در عمل تصمیم‌گیری بسیار حائز اهمیت است. از طرفی با توجه به یکسان بودن سناریوهای ۲۴ و ۳۰ از نظر قیمت، این دو سناریو از نظر خرید از حوضچه توان بسیار به هم شبیه هستند. با توجه به درصد نفوذ کم توربین‌های بادی در سیستم (۲۰ مگاوات) این موضوع کاملاً قابل پیش‌بینی است. یعنی بیش‌تر توان از طریق حوضچه تأمین می‌شود و در صورتی که قیمت حوضچه در سناریوهای مختلف یکسان باشد، میزان خرید انرژی از حوضچه به هم شبیه خواهند بود ولی یکسان نیستند. شکل ۱۲ نحوه خرید انرژی از قراردادهای دوجانبه در تمام سناریوها را نشان می‌دهد. با توجه به قیمت بالای انرژی از جانب قرارداد کاندید شماره ۳، هیچ قراردادی با آن منعقد نشده است. در عوض از سایر قراردادها به حد بیشینه انرژی خریداری می‌شود.

جدول ۲: مشخصات قراردادهای دوجانبه

شماره قرارداد	قیمت (\$/MWh)	حد بیشینه	حد کمینه	زمان اجرا
۱	۲۵/۲	۳۰	۵	کل دوره
۲	۲۷/۸	۴۵	۱۰	کل دوره
۳	۲۹	۴۰	۵	دو هفته اول
۴	۲۸/۸	۵۰	۱۰	دو هفته آخر
۵	۲۶	۳۸	۷	دو هفته آخر

شکل ۱۳ میزان تولید انرژی در پله اول دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد. مشابه توان خریداری شده از حوضچه وضعیت مشابهی را برای سناریوهای ۲۴ و ۳۰ می‌توان شاهد بود. درحالی‌که سایر سناریوها الگوهای رفتاری متفاوتی دارند.



شکل ۷: ۵٪ از بار الکتریکی شهر نیویورک

مصرف‌کنندگان بزرگ، این محدودیت بیانگر این مسئله است که شاخه‌هایی که از یک گره منشعب شده‌اند، در آن گره قطعاً از یک قرارداد دو جانبه استفاده کرده‌اند. این محدودیت بسیار به شکل درخت سناریو وابسته است که به آن پیش‌بینی‌ناپذیری^{۲۰} گفته می‌شود و به صورت ریاضی زیر بیان می‌شود [۲۹، ۳۰]:

$$s_b = s'_b \quad (23)$$

$$P_{bs}^B = P_{bs'}^B$$

۶- نتایج مطالعات عددی

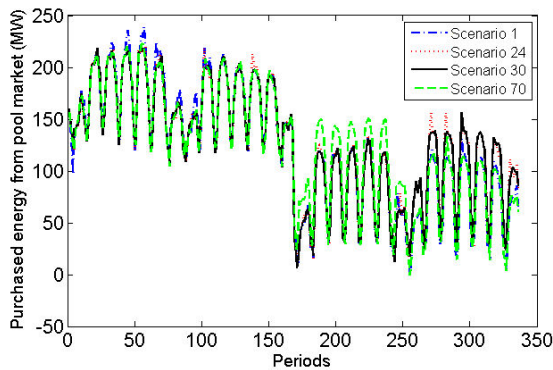
به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها و مطالعات عددی، اطلاعاتی تا حد امکان واقعی و در برخی قسمت‌ها شبه‌واقعی استفاده شده است. برای پیاده‌سازی شبیه‌سازی‌ها نیز از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. مسئله از نوع آمیخته عدد صحیح (MIP) بوده که از CPLEX برای حل آن استفاده شده است. برای ایجاد سناریوها مطابق بخش ۳ از اطلاعات بازار انرژی الکتریکی نیویورک به کار گرفته شده است [۱۹]. برای ایجاد همبستگی بیش‌تر، میزان بار نیز از همین ناحیه انتخاب شده است. میزان همبستگی بین قیمت‌ها و بار ۰/۷ است. البته میزان بار ۵٪ از کل بار شهر نیویورک در نظر گرفته شده است. یعنی هدف تأمین تنها بخشی از بار شهر است.

مشخصه بار سیستم به صورت شکل ۷ است. در طی فرآیند شبیه‌سازی، همان‌گونه که ذکر شد هر ۲ ساعت یک واحد زمانی فرض می‌شود. بنابراین ۶۷۲ ساعت تبدیل به ۳۳۶ ساعت شده و ضمن حفظ دقت از زمان اجرای برنامه نیز کاسته می‌شود [۱].

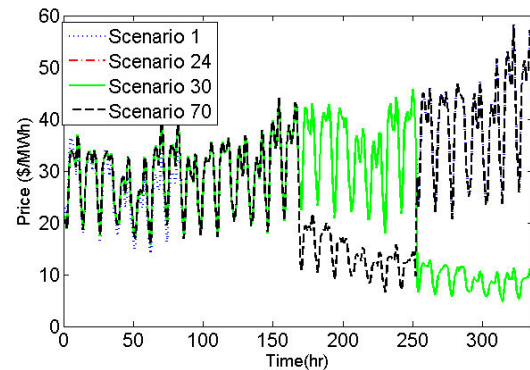
برای شبیه‌سازی سرعت باد نیز مطابق بخش ۳-۲ عمل شده است. مشخصات توربین‌های بادی نیز بر اساس توربین‌های Vestas است [۳۱]. حداکثر ظرفیت تولیدی مجموع توربین‌ها ۲۰ مگاوات است. تعداد ۱۰۸ سناریو برای قیمت بازار انرژی الکتریکی تولید شده است. برای سرعت باد نیز ۲۰ سناریو تولید شده است. از ترکیب این دو ۲۱۶۰ سناریو ایجاد شده که در نهایت با استفاده از تکنیک کاهش سناریو، تعداد سناریوها به ۱۰۰ کاهش یافته است. ۴ سناریوی نمونه ۱، ۲۴، ۳۰ و ۷۰ از این ۱۰۰ سناریو در اشکال ۸ و ۹ نمایش داده شده است. سناریوهای ۲۴ و ۳۰ از نظر قیمت بازار کاملاً مشابه هستند ولی از نظر تولید انرژی الکتریکی بادی کاملاً متفاوت هستند. ژنراتور دیزلی نیز دارای سه سطح تولیدی مطابق شکل ۱۰ است.

یکی از راه‌های تأمین انرژی الکتریکی خرید از قرارداد دوجانبه است. در این مقاله ۵ قرارداد موجود است که خریدار می‌تواند برای تأمین انرژی از این قراردادها استفاده نماید. دوره زمانی این قراردادها و سایر مشخصات مرتبط مطابق با جدول ۲ است.

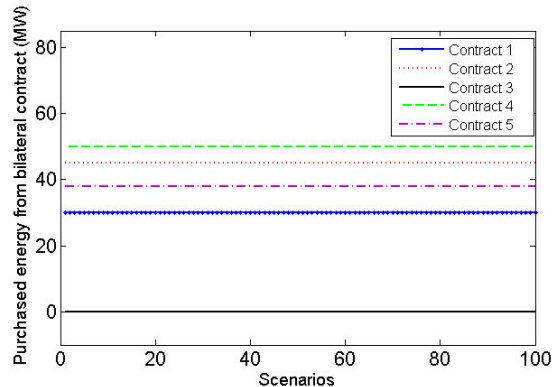
شبیه‌سازی‌ها طی چهار آزمایش انجام می‌شود. در آزمایش اول میزان α و β ثابت است. در آزمایش دوم به منظور تحلیل ریسک این دو مقدار تغییر می‌کنند. آزمایش سوم نیز اثر حضور انرژی تولیدی توربین‌های بادی بررسی می‌شود و در آزمایش چهارم اثر عدم قطعیت بار به عدم قطعیت‌های موجود اضافه شده و تأثیرات آن دیده خواهد شد.



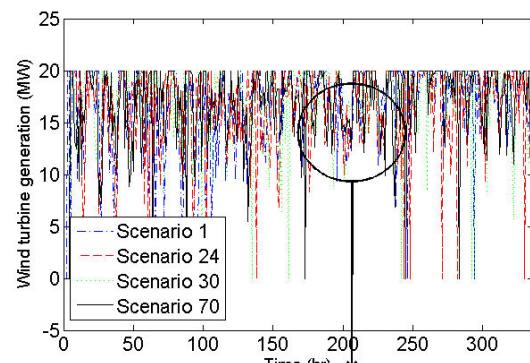
شکل ۱۱: انرژی خریداری شده از حوضچه توان در چهار سناریوی نمونه



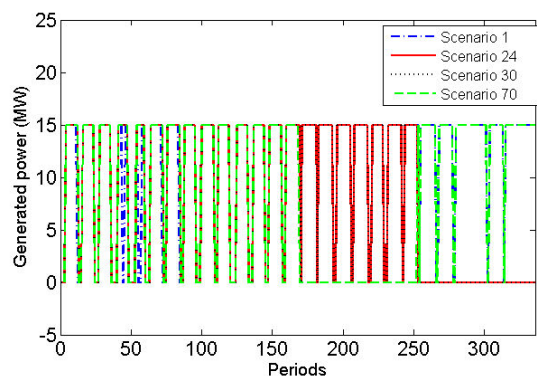
شکل ۸: چهار سناریوی نمونه از قیمت بازار



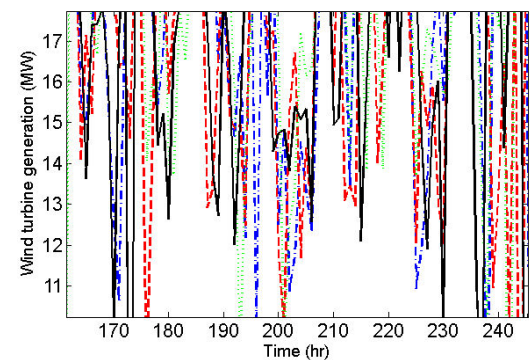
شکل ۱۲: انرژی خریداری شده از قرارداد دوجانبه



شکل الف



شکل ۱۳: میزان انرژی تولید شده با ژنراتور دیزلی در پله اول در ۴ سناریوی نمونه

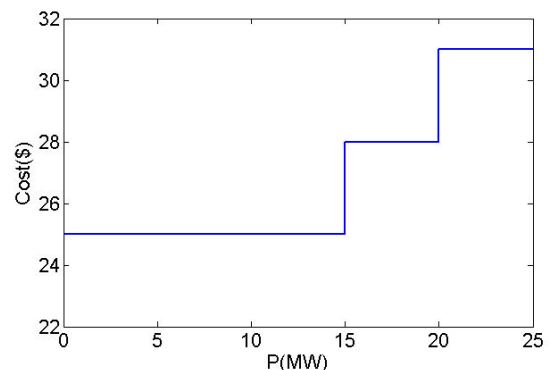


شکل ب

شکل ۹: چهار سناریوی نمونه از سرعت باد

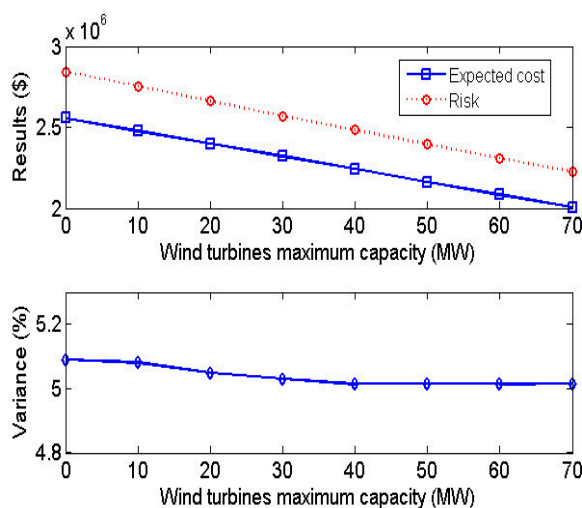
۶-۲- آزمایش دوم

این بخش تحلیلی را بر روی ریسک در خرید انرژی الکتریکی بررسی می‌کند. برای نیل به این هدف، مقدار β از ۰ تا ۴ و مقدار α از ۰ تا ۰/۹۵ تغییر می‌کند. نتایج این تحلیل‌ها در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. افزایش مقدار β موجب کاهش مقدار ریسک و افزایش امید ریاضی هزینه می‌شود. افزایش مقدار α نیز موجب کاهش امید ریاضی هزینه و افزایش ریسک می‌شود. اگرچه این رابطه به هیچ وجه خطی نیست. به عنوان مثال وقتی که β برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود با افزایش α از ۰/۹ به ۰/۹۵ امید ریاضی هزینه تغییری نمی‌کند در حالی که مقدار ریسک افزایش می‌یابد. اگرچه در مجموع می‌توان رابطه معکوس امید ریاضی هزینه و ریسک را با تغییرات β در تمامی α ها شاهد بود. از طرفی افزایش β به معنی افزایش اهمیت ریسک و کاهش پراکنش (انحراف معیار) هزینه سناریوهای مختلف



شکل ۱۰: مشخصه تولیدی ژنراتور دیزلی

هزینه‌های کل کاهش می‌یابد، میزان ریسک نیز به نسبت کاهش می‌یابد. درواقع ریسک هزینه با توجه به میزان هزینه‌ها به دست می‌آید و در صورتی که امید ریاضی هزینه‌ها در یک β و α ثابت به میزان چشمگیری کاهش یابد، میزان ریسک نیز کاهش می‌یابد. این در صورتی است که میزان پراکنش نرمال شده هزینه‌ها با توجه به شکل ۱۶، تغییر قابل توجهی ندارد زیرا با اینکه نفوذ باد در سیستم بالا رفته و عدم قطعیت حاصل از باد افزایش یافته، ولی از طرفی دیگر میزان خرید انرژی از بازار حوضچه توان کاهش می‌یابد و درواقع نفوذ عدم قطعیت بازار در هزینه کاهش می‌یابد. در نهایت هیچکدام از این دو عدم قطعیت بر یکدیگر غلبه آنچنانی نداشته و میزان پراکنش تغییر محسوسی نمی‌کند. قابل ذکر است که میزان عدم قطعیت باد و یا بازار به ماهیت بازار نیویورک و سایت واتفورد بستگی داشته و مستقل از نحوه مدل‌سازی است.



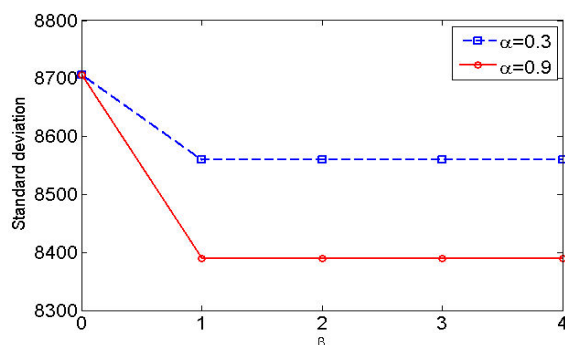
شکل ۱۶: بررسی اثر نفوذ انرژی بادی در امید ریاضی هزینه‌ها و ریسک و پراکنش هزینه‌ها

۴-۶ - آزمایش چهارم

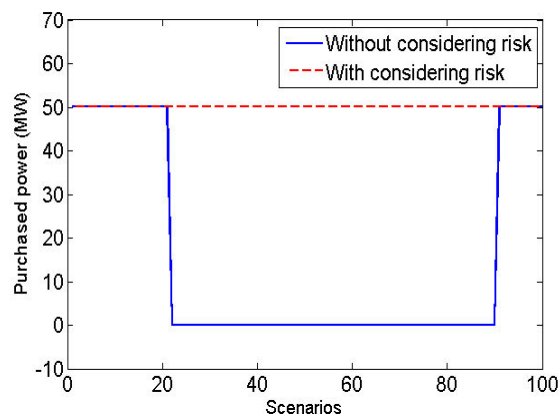
در این آزمایش علاوه بر عدم قطعیت‌های قیمت بازار و سرعت باد، عدم قطعیت ناشی از بار مصرف‌کننده نیز در نظر گرفته شده است. سناریوها بر اساس رابطه (۷) تولید شده‌اند. مقدار α و β نیز همانند آزمایش ۱ است. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۵ آورده شده که حاکی افزایش میزان امید ریاضی هزینه به مقدار کم و امید ریاضی ریسک به میزان فاحش است که تاییدکننده افزایش ریسک تصمیم‌گیری به دلیل افزایش میزان عدم قطعیت است. همچنین برای نمایش تأثیر عدم قطعیت ناشی از بار مصرف‌کننده در تصمیم‌گیری خرید انرژی الکتریکی، سناریوی اول خرید از بازار حوضچه در دو حالتی که طبیعت بار در نظر گرفته شده و حالتی که در نظر گرفته نشده است، به تصویر کشیده شده است. اختلاف تصمیم خرید در دو حالت کاملاً مشخص است (شکل ۱۷).

این مهم در شکل ۱۴ در دو مقدار متفاوت α به نمایش درآمده است. افزایش اهمیت ریسک موجب کاهش انحراف معیار شده است. اگرچه این کاهش در ابتدا بسیار سریع و سپس بسیار ملایم است. همچنین α بیش‌تر نیز به معنی سطح اطمینان بیش‌تر و پراکنش کم‌تر هزینه‌ها است.

به منظور نمایش تأثیر لحاظ ریسک در بهینه‌سازی، میزان قرارداد منعقدشده شماره ۴ در تمام سناریوها، در دو حالتی که ریسک در نظر گرفته نمی‌شود ($\beta = 0$) و در حالتی که ریسک با ($\beta = 1$) در نظر گرفته می‌شود، به نمایش درآمده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۴: بررسی تغییرات انحراف معیار هزینه سناریوها با تغییرات α و β



شکل ۱۵: مقایسه قرارداد منعقد با و بدون در نظر گرفتن ریسک

اختلاف این دو حالت کاملاً محرز است. قرارداد شماره ۴ بعد از قرارداد ۳ گران‌ترین قرارداد است. ولی در حالتی که ریسک در نظر گرفته می‌شود این قرارداد در تمام سناریوها منعقد می‌گردد. این در حالی است که امضای این قرارداد در تمام سناریوها به معنی بالا رفتن امید ریاضی هزینه‌هاست ولی بهره‌بردار سیستم برای کاهش ریسک، این افزایش هزینه را متحمل می‌شود.

۴-۳ - آزمایش سوم

در این آزمایش میزان نفوذ انرژی الکتریکی بادی مطابق شکل ۱۶ از ۷۰ تا ۷۰۰ تغییر داده شده است. مقدار α و β نیز مانند آزمایش ۱ است. با افزایش نفوذ باد در سیستم، امید ریاضی هزینه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که هزینه‌های بهره‌برداری توربین‌های بادی صفر فرض می‌شود. هنگامی که امید ریاضی

جدول ۳: حساسیت امید ریاضی هزینه به α و β

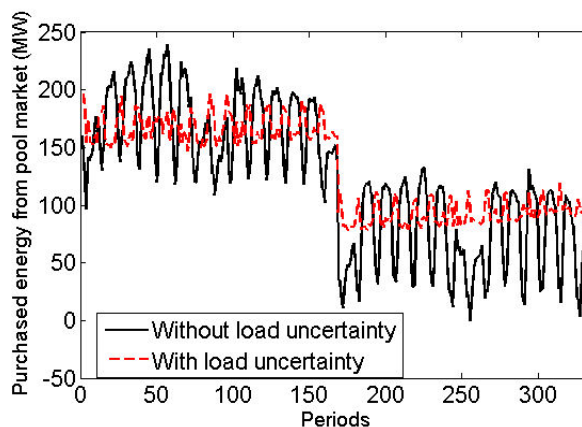
β						
α	۰	۰/۵	۱	۲	۳	۴
۰/۹۵	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۴۰۱۸۶۰/۷۷
۰/۹	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷
۰/۷	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷
۰/۵	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷	۲۳۹۸۹۲۵/۳۷
۰/۳	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱
۰/۱	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱	۲۳۸۶۵۴۳/۹۱
۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰

جدول ۴: حساسیت میزان ریسک به α و β

β						
α	۰	۰/۵	۱	۲	۳	۴
۰/۹۵	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۶۹۱۱۲۹/۹۹	۲۶۷۵۷۴۹/۳۳	۲۶۷۵۷۴۹/۳۳	۲۶۷۵۷۴۹/۳۳	۲۶۷۴۸۴۶/۹۹
۰/۹	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۶۸۲۶۴۸/۴۱	۲۶۶۱۴۱۱/۷۱	۲۶۶۱۴۱۱/۷۱	۲۶۶۱۴۱۱/۷۱	۲۶۶۱۴۱۱/۷۱
۰/۷	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۶۸۲۶۴۸/۴۱	۲۶۳۲۵۷۰/۲۲	۲۶۳۲۵۷۰/۲۲	۲۶۳۲۵۷۰/۲۲	۲۶۳۲۵۷۰/۲۲
۰/۵	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۵۸۲۸۴۴/۹۷	۲۵۸۲۸۴۴/۹۶	۲۵۷۵۲۸۳/۷۴	۲۵۷۵۲۸۳/۷۴	۲۵۷۵۲۸۳/۷۴
۰/۳	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۵۱۹۶۹۹/۶۶	۲۵۱۳۵۰۷/۲۲	۲۵۱۳۵۰۷/۲۲	۲۵۱۳۵۰۷/۲۲	۲۵۱۳۵۰۷/۲۲
۰/۱	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۴۴۴۲۷۱/۱۲	۲۴۴۴۲۷۱/۱۲	۲۴۴۴۲۷۱/۱۲	۲۴۴۲۸۳۶/۴۷	۲۴۴۲۸۳۶/۴۷
۰	۲۷۳۱۳۶۲/۴۸	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰	۲۳۸۳۳۶۵/۵۰

جدول ۵: نتایج امید ریاضی هزینه و ریسک با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار

بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار	امید ریاضی هزینه (\$)	امید ریاضی ریسک (\$)
با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار	۲۴۰۸۴۷۰	۲۷۲۸۰۴۴
بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار	۲۳۹۸۹۲۵	۲۶۶۱۴۱۲



شکل ۱۷: تصمیم‌گیری اتخاذ شده برای خرید از حوضچه توان در سناریوی ۱ با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله مسئله خرید انرژی الکتریکی را در محیط تجدید ساختار یافته، با در نظر گرفتن عدم قطعیت بررسی می‌کند. گزینه‌هایی که خریداران برای تهیه انرژی خود پیش‌رو دارند عبارت‌اند از خرید انرژی از قرارداد دوجانبه، حوضچه توان و تولید با ژنراتورهای تحت مالکیت و توربین‌های بادی. عدم قطعیت در قیمت بازار انرژی الکتریکی و سرعت باد در تصمیم‌گیری لحاظ می‌شود. برای حل مسئله در این فضای

نامطمئن از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد موجب گسترش فضای سناریوها و تعداد سناریوها می‌شود. بنابراین برای کاهش تعداد سناریوها از تکنیک کاهش سناریو استفاده می‌شود. افزایش عدم قطعیت‌ها موجب پیچیده‌تر شدن عمل تصمیم‌گیری می‌شود. همچنین در مدل پیشنهادی، برای حذف حالات نامطلوب در هزینه سناریوها، از مفهوم ریسک (CVaR) استفاده می‌شود. افزایش اهمیت ریسک در مسئله، موجب کاهش ریسک و افزایش امید ریاضی هزینه‌ها می‌شود. همچنین در نظر گرفتن ریسک منجر به جواب‌های متفاوتی می‌شود. علاوه‌براین هر سناریویی نیز جواب متفاوتی برای تهیه انرژی الکتریکی ارائه می‌دهد. افزایش نفوذ باد نیز در سیستم موجب کاهش امید ریاضی هزینه‌ها و تبع آن کاهش ریسک هزینه‌ها می‌شود. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از بار علاوه‌بر عدم قطعیت‌های موجود، باعث افزایش ریسک می‌شود. قابل‌ذکر است استفاده از اطلاعات واقعی شهر نیویورک، نشان از قابل استفاده بودن روش پیشنهادی در دنیای واقعی است.

مراجع

- [1] A. J. Conejo, M. Carrion and M. J. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*, Springer, 2010.
- [2] K. Zare, M. Parsa Moghaddam and MK. Sheikh-El-Eslami, "Risk-based electricity procurement for large consumers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 1826-1835, 2011.
- [3] D. S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 520-527, 2003.

- generating systems incorporating wind energy," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 163-170, 2008.
- [۲۲] امیرحسین زارع نیستانک، رحمت‌اله هوشمند و معین پرستگاری، «بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌های بادی با استفاده از نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای به‌منظور کاهش عدم قطعیت در عملکرد آنان در بازار برق»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۱، جلد ۴۱، شماره ۲، صفحه ۵۱-۵۹.
- [۲۳] زهره فرقانی، رحمت‌اله هوشمند، امین خدابخشیان و معین پرستگاری، «بررسی عملکرد هماهنگ نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش و خدمات جانبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۱۳۸۹، جلد ۴۰، شماره ۲، صفحه ۶۳-۷۵.
- [24] North Dakota Agriculture Weather Network. [Online], (<http://ndawn.ndsu.nodak.edu/wind-speeds.html>).
- [25] P. Giorsetto and K.F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 1, pp. 134-143, 1983.
- [26] M. Carrión, J. M. Arroyo, and A.J. Conejo, "A Bilevel Stochastic Programming Approach for Retailer Futures Market Trading," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1446-1456, 2009.
- [27] L. Baringo, and A. J. Conejo, "Risk-constrained multi-stage wind power investment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 401-411, 2013.
- [28] A. Soroudi and B. Mohamadi Ivatloo, *Energy Hub Management with Intermittent Wind Power*, Springer, 2014.
- [29] G. B. Shrestha, B. Kumar Pokharel, T. T. Lie and S. E. Fleten, "medium term power planning with bilateral contracts," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 625-633, 2005.
- [30] J. R. Birge and F. Louveaux. *Introduction to stochastic programming*. Springer- Verlag, New York, 1997.
- [31] [Online], (<http://www.vestas.com>).
- [4] S. Talati and J. Bednarz, "Deregulation and opportunities for industrial customers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1378-1386, 1998.
- [5] Y. Lin and X. Guan, "Purchase allocation and demand bidding in electric power markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 106-112, 2003.
- [6] A. J. Conejo, J.J. Fernandez-Gonzalez and N. Alguacil, "Energy procurement for large consumers in electricity markets," *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering Generation Transmission and Distribution*, vol. 152, pp. 357-364, 2005.
- [7] A. J. Conejo and M. Carrion, "Risk constrained electricity procurement for a large consumer," *IEEE Proceeding Generation Transmission and Distribution*, vol. 153, no. 4, pp. 407-413, 2006.
- [8] M. Carrión, A.B. Philpott, A.J. Conejo, and M. Arroyo Jose, "Astochastic programming approach to electric energy procurement for large consumers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 744-754, 2006.
- [9] K. Zare, M. Parsa Moghaddam and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Electricity procurement for large consumers based on Information Gap Decision Theory," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 234-242, 2010.
- [10] D. Fang, J. Wu and D. Tang, "A double auction model for competitive generators and large consumers considering power transmission cost," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, pp. 880-888, 2012.
- [11] F. Gilbert, M. Anjos, P. Marcotte and G. Savard, "Optimal design of bilateral contracts for energy procurement," *European Journal of Operational Research*, vol. 246, pp. 641-650, 2015.
- [12] S. J. Kazempour, A. J. Conejo and C. Ruiz, "Strategic bidding for a large consumer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 848-856, 2015.
- [13] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen and F. Aminifar, "Optimal electricity procurement in smart grids with autonomous distributed energy resources", *IEEE Transactions on Smart Grid*, to be published.
- [14] M. Giuntoli and D. Poli, "Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages," *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 4, no. 2, pp. 942-955, 2013.
- [15] N. Mahmoudi, M. Eghbal and T. K. Saha, "Employing demand response in energy procurement plans of electricity Retailers," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 455-460, 2014.
- [16] S. Nojavan, M. Mehdinejad, K. Zare and B. Mohammadi-Ivatloo, "Energy procurement management for electricity retailer using new hybrid approach based on combined BICA-BPSO," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 411-419, 2015.
- [17] J. Contreras, R. Espinola, F. J. Nogales and A. J. Conejo, "ARIMA models to predict next-day electricity prices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 9, pp. 1014-1020, 2003.
- [18] G. E. Box, G.M. Jenkins and G. C. Reinsel. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2008.
- [19] [Online], (<http://www.nyiso.com>).
- [20] R. Billinton, H. Chen and R. Ghajar, "Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy," *Microelectronics Reliability Journal*, vol. 36, no. 9, pp. 1253-1261, 1996.
- [21] R. Billinton and Y. Gao, "Multistate wind energy conversion system models for adequacy assessment of

زیرنویس‌ها

1. Pool trading
2. Bilateral contract
3. Variance
4. Bid
5. Auto Regressive and Integrated Moving Average
6. Backshift operator
7. Box
8. Jenkins
9. Autocorrelation
10. Partial autocorrelation
11. Auto regressive
12. Moving average
13. Watford
14. North Dokota
15. Realization
16. Here and now
17. Wait and see
18. Conditional Value at Risk (CVaR)
19. Value at Risk (VaR)
20. Non-anticipativity