

بهینه‌سازی سبد تولید سبز در بازار خرده‌فروشی برق با در نظر گرفتن کش‌سانی مصرف‌کنندگان

حسام گل‌محمدی^۱، دانشجوی دکتری؛ رضا کی‌پور^۲، استادیار؛ آرمان حسن‌پور^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - hessam@semnan.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - rkeypou@semnan.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - arman.ahp@gmail.com

چکیده: در این مقاله، روشی جهت بهینه‌سازی سبد تولید سبز از دیدگاه خرده‌فروش در محیط رقابتی بازار پیشنهاد شده است. بدین‌منظور، عدم قطعیت موجود در قیمت برق و تولید انرژی بادی و خورشیدی با استفاده از متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، به‌منظور تأمین بار مشتریان، از قراردادهای پیش‌خرید استفاده شده تا ریسک ناشی از خرید برق از دیدگاه مشتریان کاهش داده شود. به‌موازات استفاده از قراردادهای پیش‌خرید، روش شاخص و بلوک مطرح‌شده در این مقاله مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان را قادر می‌سازد تا بتوانند ریسک و سود ناشی از شرکت در بازار خرده‌فروشی را مدیریت کنند. با هدف بهینه‌سازی سبد تولید انرژی پاک، عدم قطعیت‌های مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی و سری‌های زمانی، مدل^۱ ARIMA و روش نمونه‌برداری مونت‌کارلو لحاظ شده‌اند. همچنین، مطالعات تحلیل ریسک و خاصیت کش‌سانی بار، مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان را قادر می‌سازد تا تعادل مناسبی بین سود و ریسک ناشی از فعالیت خود در محیط بازار خرده‌فروشی فراهم نمایند. در پایان، شبیه‌سازی‌ها و مثال‌های عددی ارائه‌شده نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به‌خوبی قادر است ضمن بهینه‌سازی استفاده از انرژی‌های پاک، تعادل مناسبی بین سود و ریسک در بازار برقرار نماید.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، ریسک، سبد انرژی، عدم قطعیت، خرده‌فروش.

Optimization of a Green Energy Portfolio in a Retail Electricity Market Considering Consumers' Elasticity

Hessam Golmohamadi¹, PhD Student; Reza Keypour², Assistant Professor; Arman Hassanpour³, MSc Student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: hessam@semnan.ac.ir
 2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: rkeypou@semnan.ac.ir
 3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: arman.ahp@gmail.com

Abstract: In this paper, a novel approach is proposed to optimize a green energy portfolio in a retail electricity market. To achieve this goal, uncertainties associated with the electricity price and energy extracted from wind and solar generating units are considered as random variables through a bi-level stochastic programming. From retailer's prospective, different kinds of contracts, including forward contracts and contracts based on block-index pricing methods, are proposed to enable consumers and retailers to manage risk and profit in a competitive electricity market. To optimize green energy portfolio, uncertainties associated with the problem are modeled by using a time series, Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) approach and a Monte-Carlo simulation scheme. Risk and elasticity analysis make a golden opportunity for retailers and consumers to strike a right balance between risk and profit through their participation in electricity market. At the end, numerical examples and simulation results show the applicability of the proposed approach in an electricity retail market.

Keywords: Stochastic programming, Risk, Energy portfolio, Uncertainty, Retailer.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰

نام نویسنده مسئول: رضا کی‌پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - روبروی پارک سوکان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، صنعت برق در سراسر جهان با تغییرات بسیاری که از آن به‌عنوان تجدید ساختار یاد می‌شود؛ مواجه بوده است. صنعت برق به یک صنعت رقابتی که در آن بازار، تعیین‌کننده قیمت برق است تبدیل شده و قیمت خالص برق را با افزایش رقابت کاهش داده است [۱]. در این میان با ورود بازیگران جدید در بازار برق از قبیل خرده‌فروش‌ها امکان ورود مصرف‌کنندگان و مشارکت هرچه بیشتر آن‌ها در بازار فراهم شده است. خرده‌فروش، انرژی الکتریکی را از بازار عمده‌فروشی و یا از طریق قراردادهای مختلف با تولیدکنندگان خریداری کرده و آن را دوباره به مصرف‌کنندگانی که تمایلی به شرکت در بازار عمده‌فروشی ندارند و یا مجاز به شرکت در آن نیستند می‌فروشد [۲، ۱].

به‌طور کلی تقریباً تمام مصرف‌کنندگان خرید هم‌اکنون به‌نوعی متوسط قیمت که منعکس‌کننده قیمت واقعی بازار عمده‌فروشی نیست را پرداخت می‌کنند [۳]. اگر مصرف‌کنندگان نرخ ثابتی برای هر کیلووات ساعت مصرف خود پرداخت کنند، از قیمت لحظه‌ای بازار جدا شده و مصرف آن‌ها تنها متأثر از چرخه فعالیت آن‌ها خواهد بود.

مقالات [۴-۶] روش جدیدی را برای مدیریت بازارهای لحظه‌ای در یک ریزش‌بکه که به‌طور مستقل از سیستم قدرت بهره‌برداری می‌شوند ارائه داده‌اند. روش ارائه‌شده در مقاله [۴] بر مبنای دو بازار هم‌زمان، شامل بازار روز قبل^۲ و بازارهای زمان‌واقعی^۳ است. مقاله [۵] برنامه‌ریزی مذکور را برای یک بازار انرژی محلی باهدف دستیابی منطقی به کمترین قیمت برق و بر مبنای استفاده حداکثری از منابع تولید پراکنده صورت داده است. مقاله [۷] به بررسی رفتار شرکت کنندگان بازار برق در حضور منابع تجدیدپذیر تولید انرژی می‌پردازد. در این مقاله، در سطح اول تولیدکنندگان انرژی تجدیدپذیر اقدام به قیمت‌دهی در بازار عمده‌فروشی نموده و در سطح دوم مصرف‌کنندگان با ارائه قیمت پیشنهادی خرید برق سعی در بیشینه کردن سود خود دارند. این مقاله نیز از ترکیب هم‌زمان دو بازار روز قبل و بازار زمان‌واقعی استفاده کرده است. مقاله [۸] با استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی، روشی را برای تهیه منحنی‌های پیشنهاد قیمت ارائه داده تا مصرف‌کنندگان بزرگ در شبکه‌های هوشمند^۴ بتوانند با تغییر قیمت برق در بازار سود خود را مدیریت کنند.

تا زمانی که خرید برق به‌صورت تعرفه ثابت باشد، هیچ‌گونه انگیزه‌ای برای اصلاح الگوی مصرف به‌وجود نخواهد آمد [۹]. بدین‌منظور می‌توان با استفاده از انواع قیمت‌گذاری مانند قیمت‌گذاری زمان استفاده، قیمت‌گذاری پیک-بحرانی و قیمت‌گذاری زمان‌واقعی حساسیت مصرف‌کننده را افزایش داد. قیمت‌گذاری زمان‌واقعی به‌عنوان مؤثرترین طرح تعرفه خرده‌فروشی یک ابزار حیاتی برای برنامه‌های پاسخ تقاضا در بازار برق محسوب می‌شود. قیمت‌گذاری زمان‌واقعی مستقیماً تغییرات قیمت حاشیه‌ای تولید برق را در هر فاصله زمانی به

مصرف‌کننده منتقل می‌کند و ارتباط بین بازار عمده و خرد را به‌طور مؤثری محکم می‌نماید.

به‌علت نوسانات زیاد قیمت در بازار عمده‌فروشی، شرکت در این بازار ریسک زیادی به‌همراه دارد و با اعمال قیمت‌گذاری زمان‌واقعی، این ریسک به‌طور کامل به مصرف‌کننده خرد منتقل خواهد شد. به‌منظور کاهش ریسک مصرف‌کنندگان و حفاظت آن‌ها در برابر این ریسک، می‌توان با استفاده از قراردادهای مختلف حفاظتی این ریسک را بین بازیگران بازار تقسیم نمود [۱۰].

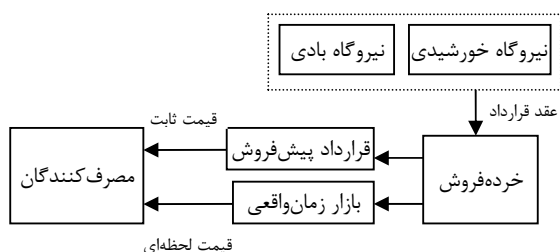
با توجه به نیاز مبرم به کاهش گازهای گلخانه‌ای و همچنین محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر در بسیاری از کشورها بخش قابل توجهی از تولید را به خود اختصاص داده‌اند. در بین فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد بیش‌ترین رشد را در سراسر جهان داشته است. از طرف دیگر، با به‌وجود آمدن بازار برق، مصرف‌کنندگان این امکان را پیدا کرده‌اند که تأمین‌کننده انرژی خود را تعیین کنند و بسیاری از مصرف‌کنندگان خواهان استفاده از انرژی پاک هستند.

امروزه تحقیقات زیادی درباره خریدوفروش انرژی الکتریکی و مسائل مربوط به آن از جمله مدیریت ریسک در بازار خرد انجام شده است. عمده این تحقیقات به‌دلیل استفاده از متغیرهایی با عدم قطعیت بالا از برنامه‌ریزی تصادفی [۱۱] در پژوهش‌های خود استفاده می‌کنند. در [۱۲] چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای خرده‌فروش ارائه شده است تا خرده‌فروش بتواند قیمت فروش انرژی به مصرف‌کننده را در زمان استفاده تعیین کند. همچنین مدیریت سبد سهام برای قراردادهای متفاوت در میان مدت مورد بررسی قرار گرفته است. مقالات [۱۳] و [۱۴] به مسائل مربوط به بهینه‌سازی هزینه خرید در مقابل ریسک یک شرکت توزیع برق محلی با در نظر گرفتن گزینه‌های مختلف خرید پرداخته‌اند. مقاله [۱۵] چارچوب برنامه‌نویسی با ریسک محدود را برای تصمیم‌گیری خرده‌فروش در مورد قراردادهای آینده‌ای که باید منعقد نماید و تعیین قیمت فروش آن به مصرف‌کننده پیشنهاد داده است. مقاله [۱۶] خلاصه‌ای از وضعیت پاسخ سمت تقاضا در بازار تجدید ساختار یافته را بیان کرده است. در [۱۷] روش ریاضی مبتنی بر برنامه‌نویسی تصادفی برای تعیین قیمت بهینه فروش برق به مصرف‌کننده و سیاست خرید برق یک خرده‌فروش برای مدت‌زمان مشخص در یک بازار رقابتی ارائه شده است. در [۱۸] روش مبتنی بر بهینه‌سازی تصادفی برای ارزیابی قیمت و مقدار قرارداد برق خرده‌فروش پیشنهاد شده است. مسئله با عقد قرارداد با تولیدکننده و مصرف‌کننده جهت بیشینه کردن سود در یک سطح قابل قبول از ریسک تسویه بازار حل شده است. در [۱۹] سه گزینه سرویس داوطلبانه شامل قیمت‌گذاری زمان‌واقعی، قیمت‌گذاری زمان استفاده و سرویس قابل قطع که یک شرکت توزیع محلی ممکن است به مشتریان خود پیشنهاد دهد، ارائه شده است. هدف از ارائه این سرویس‌ها تشویق مصرف‌کنندگان به

۲- توصیف مسئله

۲-۱- بازیگران مسئله

ایده اصلی این مقاله، بهینه‌سازی سود خرده‌فروش جهت فروش برق تولیدی نیروگاه‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی است. بازیگران اصلی در این مقاله، تولیدکننده انرژی تجدیدپذیر شامل نیروگاه بادی و خورشیدی، خرده‌فروش و مصرف‌کنندگان می‌باشند. خرده‌فروش در این مسئله، اقدام به خرید برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر نموده و این انرژی را از طریق قراردادهای پیش‌فروش برق با قیمت ثابت به مصرف‌کنندگان عرضه می‌کند. مدل پیشنهادی بر مبنای یک خرده‌فروش و چندین مصرف‌کننده پایه‌گذاری شده است. در این مقاله، مصرف‌کنندگان می‌توانند انرژی موردنیاز خود را از: (الف) قراردادهای پیش‌فروش برق با قیمت ثابت و (ب) بازارهای زمان‌واقعی با قیمت متغیر خریداری نمایند. بنابراین، مصرف‌کنندگان بر اساس قیمت ارائه‌شده در قراردادهای پیش‌فروش اقدام به تصمیم‌گیری می‌کنند که چه سهمی از توان مورد نیاز خود را از طریق قرارداد پیش‌فروش و چه سهمی را از طریق بازار زمان‌واقعی تأمین نمایند تا سود خود را افزایش دهند. شکل ۱ به توصیف اجزای اصلی شرکت‌کننده مسئله خرده‌فروش در بازار و ارتباط متقابل آن‌ها می‌پردازد.



شکل ۱: اجزای اصلی شرکت‌کننده در بازار خرده‌فروشی

۲-۲- ساختار مسئله

هدف ارائه این مقاله، پیشنهاد روشی جهت بهینه‌سازی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، شامل انرژی بادی و خورشیدی، و ارائه بستری جهت ورود آنان به بازارهای فروش در محیط بازار خرده‌فروشی است. به‌منظور غلبه بر عدم قطعیت ذاتی موجود در تولید این دو انرژی، عدم قطعیت‌های مذکور با استفاده از متغیرهای تصادفی مدل‌سازی شده‌اند. علاوه بر آن، اصلی‌ترین عدم قطعیت موجود در بازار خرده‌فروشی که همان نوسانات قیمت برق است نیز در متغیرهای تصادفی لحاظ شده است. با توجه به احتمالاتی بودن داده‌های ورودی، برنامه‌ریزی تصادفی در این مقاله پیشنهاد شده تا بتوان به مدل کاملی از عدم قطعیت‌های مرتبط با مسئله دست یافت. در این مقاله با توجه به خصوصیات موجود، از روش برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی استفاده شده است.

سطح اولیه: در سطح اولیه، تصمیمات مرتبط با تنظیم قراردادهای فروش و خرید برق در بازار خرده‌فروشی گرفته می‌شود. بدین‌منظور،

اصلاح مصرف برق در پاسخ به تغییرات قیمت بازار لحظه‌ای است. در [۲۰] مدلی برای ارزیابی فروش بهینه انرژی که سود را برای تأمین‌کننده‌های سرویس، بهینه می‌کند؛ عرضه شده است. مسئله با مطالعه تأثیر عوامل مختلف بر روی سود نظیر استراتژی قیمت، کاهش تعرفه و حساسیت تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است. مقاله [۲۱] دیدگاه جدیدی را ارائه کرده است که در آن ظرفیت انرژی بادی جزئی از ظرفیت نصب‌شده قطعی سیستم در نظر گرفته شود. این مقاله چالش‌های مرتبط با این دیدگاه را در قیاس با سیستم‌های سنتی مورد بررسی قرار داده است. مقاله [۲۲] به بیان نگرانی‌های زیست‌محیطی در خصوص افزایش گازهای گلخانه‌ای پرداخته و گسترش سرمایه‌گذاری در ایجاد میکروتوربین‌های بادی و صفحه‌های خورشیدی را به‌عنوان راهکار مقابله با آن مطرح می‌نماید.

در این مقاله خرده‌فروشی در نظر گرفته شده است که انرژی سبز را به مشتریان خود و تحت دو روش قیمت‌گذاری ثابت از طریق قراردادهای پیش‌فروش برق و قیمت‌گذاری زمان‌واقعی عرضه می‌نماید. به‌منظور کاهش ریسک مصرف‌کنندگان و در نتیجه، ترغیب آن‌ها به قیمت‌گذاری ثابت و بهره‌مندی از مزایای آن، بخشی از مصرف آن‌ها با عقد قرارداد پیش‌فروش برق به‌صورت قیمت ثابت در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، بخشی از مشتریان که میزان مصرف دقیق آن‌ها مشخص نیست و یا مایل به تحمل ریسک ناشی از شرکت در بازارهای زمان‌واقعی هستند، می‌توانند انرژی موردنیاز خود را از بازار زمان‌واقعی خریداری کنند. در این مقاله، خرده‌فروش به‌منظور حداکثر نمودن سود خود در مورد میزان قراردادهایی که با مصرف‌کنندگان منعقد می‌کند تا انرژی مورد نیاز آن‌ها را به‌صورت قیمت ثابت و زمان‌واقعی تأمین کند، تصمیم‌گیری می‌نماید. روش پیشنهادی بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی است. عدم قطعیت‌هایی که در قیمت بازار لحظه‌ای، باد و خورشید وجود دارند از طریق روش ARIMA با استفاده از مدل‌های سری زمانی بیان شده‌اند. همچنین خرده‌فروش برای مدیریت ریسک خود از روش ارزش در معرض ریسک مشروط^۵ (CVaR) برای محدود کردن نوسانات سود مورد انتظار استفاده خواهد کرد.

این مقاله به ارائه روشی جامع در خصوص مدیریت بازار خرده‌فروشی در محیط بازار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر می‌پردازد. در نظر گرفتن هم‌زمان چهار عدم قطعیت بار، انرژی بادی، انرژی خورشیدی و قیمت برق از ویژگی‌های اصلی این مقاله است. علاوه بر آن، در نظر گرفتن کش‌سانی بار، این قابلیت را به مصرف‌کنندگان می‌دهد تا در خصوص میزان مصرف خود بر اساس قیمت برق تصمیم‌گیری نمایند. از سوی دیگر، با مطالعه شاخص‌های ریسک پیشنهادشده در این مقاله، خرده‌فروش قادر به شناسایی محدوده کم‌خطر جهت تصمیم‌گیری در خصوص نوع قراردادهای خود است. در پایان، مدل پیشنهادی بر روی یک بازار برق با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه گردیده است.

۲-۳- برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی

بیان کلی مسئله برنامه‌ریزی تصادفی خطی دوسطحی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۱]:

$$\begin{aligned} \min z &= c^T x + E_\lambda[\min Q(\omega)] \\ \text{subject to:} \\ Ax &= b \\ Q(\omega) &= \min_{y(\omega)} q(\omega)^T y(\omega) \\ T(\omega)x + Wy(\omega) &= h(\omega) \\ y(\omega) \in Y, \quad x \in X, \quad \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن، x و $y(\omega)$ به ترتیب تصمیم‌های سطح اول و دوم در برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی می‌باشند و c ، $h(\omega)$ ، A ، $T(\omega)$ و W بردارها و ماتریس‌های معلوم با اندازه مناسب هستند. همچنین E بیان‌گر امید ریاضی است. در این مقاله، تصمیمات x شامل تصمیم‌گیری در خصوص عقد قراردادهای پیش‌فروش برق با مصرف‌کنندگان و قراردادهای ظرفیت با تولیدکنندگان انرژی پاک است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، این‌گونه تصمیمات در سطح اولیه برنامه‌ریزی اخذ می‌شوند. علاوه بر آن، در سطح ثانویه، تصمیمات y شامل مجموعه تصمیماتی می‌شوند که پس از تحقق مقدار واقعی متغیرهای تصادفی اتخاذ می‌شوند. تصمیم‌گیری در خصوص میزان خرید یا فروش انرژی و کاهش یا افزایش مصرف از تصمیماتی است که در این مرحله گرفته می‌شود.

۳-۳- تابع هدف بازار خرده‌فروشی

با در نظر گرفتن مدل خطی برنامه‌ریزی دوسطحی در بخش قبل، تابع هدف مسئله خرده‌فروشی در بازار برق با در نظر گرفتن مقدار شاخص ریسک به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \max_{P_t^S(\omega), P_t^P(\omega), P_t^F, v(t), \lambda^F, \xi, \eta(\omega)} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \sum_{t \in T} \left[\left(P_t^S(\omega) - P_t^P(\omega) \right) + (l_t - l_f) \times \left(1 + E \times \left(\frac{\lambda_t(\omega) - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \right) \times \lambda_t(\omega) - P_t^W(\omega) \lambda^W(\omega) - P_t^{SU}(\omega) \lambda^{SU}(\omega) + \sum_{t \in T} (l_f \lambda^F d_t - C_t^C) \right] + \beta \left(\xi - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \eta(\omega) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه فوق، هدف خرده‌فروش بیشینه‌سازی سود برای شرکت در بازار خرده‌فروشی از طریق انعقاد قراردادهای پیش‌فروش برق و شرکت در بازار زمان حقیقی است. بر این مبنای، بیشینه‌سازی سود خرده‌فروش با تأکید بر استفاده حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر، شامل انرژی بادی و خورشیدی، صورت می‌گیرد. در تابع هدف فوق تأثیر خاصیت کشسانی بار و ریسک مشروط بر میزان سود خرده‌فروش در نظر گرفته شده است.

اولین عبارت در تابع هدف، $(P_t^P(\omega) - P_t^S(\omega)) \times \lambda_t^P(\omega)$ ، بیان‌گر هزینه خالص مبادله در بازار لحظه‌ای است. که در آن، $P_t^P(\omega)$

و $P_t^S(\omega)$ به ترتیب توان خریداری شده و فروخته شده در سناریو ω در بازار لحظه‌ای می‌باشند. اگر حاصل این عبارت مثبت باشد بدان معنی است که خرده‌فروش از بازار لحظه‌ای انرژی خریداری می‌کند و اگر حاصل عبارت مذکور منفی باشد یعنی خرده‌فروش انرژی مازاد خود را در بازار لحظه‌ای به فروش می‌رساند.

دومین عبارت تابع هدف، $(l_t - l_f) \times \left(1 + E \times \left(\frac{\lambda_t(\omega) - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \right)$ ، سود ناشی از فروش انرژی تحت قیمت‌گذاری زمان واقعی را با در نظر گرفتن حساسیت مصرف‌کننده نشان می‌دهد. در این عبارت، E حساسیت مصرف‌کننده، l_t و l_f به ترتیب بار در زمان t و بار پیش‌بینی شده، λ_t قیمت برق در زمان t و λ_0 قیمت مرجع در محاسبه حساسیت مصرف‌کنندگان می‌باشد.

عبارت سوم تابع هدف، $[-P_t^W(\omega) \lambda^W(\omega) - P_t^{SU}(\omega) \lambda^{SU}(\omega)]$ ، هزینه مبادله شده در بازار را برای فروش انرژی بادی و خورشیدی نشان می‌دهد. در این عبارت، P_t^W و P_t^{SU} به ترتیب توان پیش‌بینی شده بادی و خورشیدی و λ^W و λ^{SU} قیمت برق تولیدی نیروگاه بادی و خورشیدی است. عبارت چهارم، $\sum_{t \in T} (l_f \lambda^F d_t - C_t^C)$ ، سود خرده‌فروش در انعقاد قراردادهای پیش‌فروش برق را نشان می‌دهد. در این عبارت، d_t طول دوره زمانی مصرف انرژی بر حسب ساعت، λ^F قیمت برق پیش‌بینی شده و C_t^C هزینه قراردادهای پیش‌فروش در بازه زمانی t را نشان می‌دهد.

عبارت پنجم در تابع هدف، $\beta \left(\xi - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \eta(\omega) \right)$ ، بیان‌گر شاخص ارزش در معرض ریسک مشروط CVaR در محاسبه سود خرده‌فروش است. توضیحات تکمیلی پیرامون توصیف متغیرهای این عبارت در بخش ۳-۶ آورده شده است. در ادامه و در بخش‌های جداگانه به تشریح قسمت‌های مختلف تابع هدف پرداخته می‌شود.

۱-۳-۳- تصمیمات سطح اول

در تابع هدف، عقد قراردادهای پیش‌فروش برق با مصرف‌کنندگان تصمیم سطح اول برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد. پیش از اجرای بازار، خرده‌فروش بر مبنای پیش‌بینی شرایط بازار شامل قیمت برق و میزان انرژی قابل عرضه، اقدام به انعقاد قراردادهای پیش‌فروش برق می‌کند. بنابراین عبارت $\sum_{t \in T} (l_f \lambda^F d_t - C_t^C)$ در تابع هدف توصیف کننده سطح اول برنامه‌ریزی تصادفی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تصمیمات مرحله اول مستقل از سناریوهای پیش‌بینی شده (ω) می‌باشند، به همین دلیل به آن‌ها تصمیمات مستقل گفته می‌شود.

۲-۳-۳- تصمیمات سطح دوم

تصمیمات سطح دوم شامل مجموعه تصمیماتی می‌شود که پس از تحقق کمیت‌های تصادفی مسئله گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، پس از انعقاد قرارداد پیش‌فروش برق بین خرده‌فروش و مصرف‌کنندگان،

درواقع ترکیبی از دو روش قیمت‌گذاری ثابت و بازارهای زمان حقیقی است. تحت این نوع قیمت‌گذاری مصرف‌کننده می‌تواند انرژی الکتریکی را هم در قیمت ثابت از طریق قراردادهای پیش‌خرید برق (بلوک) و هم تحت قیمت‌گذاری ساعتی از طریق بازارهای زمان حقیقی (شاخص) خریداری نماید. بلوک توان تحت قیمت ثابت به مصرف‌کننده عرضه می‌شود و برای مصرفی بیش از بلوک تعیین شده مصرف‌کننده بر اساس قیمت ساعتی بازار عمده‌فروشی هزینه مربوط به انرژی مصرفی خود را پرداخت می‌نماید. بدین‌منظور در این مقاله، مصرف‌کنندگان می‌توانند انرژی مورد نیاز خود را از دو طریق: (الف) قراردادهای پیش‌خرید؛ (ب) بازارهای زمان‌واقعی خریداری کنند.

قابل ذکر است که استفاده از قراردادهای پیش‌خرید برق برای مصرف‌کنندگانی که دارای میزان مصرف از پیش تعیین شده می‌باشند، مناسب بوده و به دلیل مشخص بودن قیمت برق از ریسک بسیار پایینی برخوردار است. از طرف دیگر، مصرف‌کنندگان با مقدار مصرف متغیر و نیز مصرف‌کنندگانی که تمایل به ریسک‌پذیری بالا در محیط بازار را دارند اقدام به خرید برق از بازارهای زمان‌واقعی می‌کنند.

۳-۵-۱- قراردادهای پیش‌خرید

قرارداد پیش‌خرید قرارداد التزام‌آوری برای خرید و یا فروش مقدار ثابتی از انرژی الکتریکی در قیمت از پیش تعیین شده و برای مدت‌زمان معینی است. مصرف‌کنندگان در این مرحله با عقد قرارداد پیش‌خرید برق می‌توانند تمام یا بخشی از انرژی موردنیاز خود را تأمین کنند. علاوه بر آن، مصرف‌کننده در این مقاله قادر است بخشی از نیاز خود را با شرکت در بازارهای زمان‌واقعی تأمین کند. با فرض این که NF تعداد قراردادهای در دسترس، $P_j^c(MW)$ سطح قرارداد Z ام و λ_j^c قیمت Z امین قرارداد پیش‌خرید باشد، می‌توان هزینه ناشی از قراردادهای پیش‌خرید را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$C^c = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{NF} P_j^c \cdot \lambda_j^c \quad (7)$$

قراردادهای پیش‌خرید معمولاً در سطوح معینی مبادله می‌شوند.

در نتیجه، مقادیر ممکن برای P_j^c را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$P_j^c \in \{0, \Delta P_j^c, 2\Delta P_j^c, 3\Delta P_j^c, \dots, m_j^c \Delta P_j^c\} \quad (8)$$

که ΔP_j^c اندازه بلوک مرتبط با قرارداد Z ام و m_j^c تعداد سطوح هر قرارداد پیش‌خرید می‌باشد.

علاوه بر آن، به‌منظور ایجاد یک رابطه بین سقف مصرف در قیمت ثابت (بلوک‌های انرژی) و قیمت فروش از رابطه زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$fI(\lambda) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} e^{-(1/2)(\frac{t-\mu}{\sigma})^2} dt \quad (9)$$

که در آن، λ قیمت برق، μ متوسط قیمت و σ انحراف معیار قیمت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرمول فوق بیان‌گر یک رابطه غیرخطی بین قیمت برق و سقف مصرف است که اساساً با ذات مسئله

متغیرهای تصادفی مسئله شامل قیمت برق و میزان انرژی تولیدی بادی و خورشیدی در لحظه اجرای بازار محقق می‌شوند. در این هنگام تصمیمات مربوط به سطح دوم گرفته می‌شود که شامل تصمیم‌گیری در خصوص خرید (فروش) کمبود (مازاد) انرژی از بازار زمان‌واقعی و نیروگاه‌های بادی و خورشیدی است. در تابع هدف، عبارت اول $[(P_t^P(\omega) - P_t^S(\omega)) \times \lambda_t^P(\omega)]$ و عبارت دوم $[-P_t^W(\omega)\lambda^W(\omega) - P_t^{su}(\omega)\lambda^{su}(\omega)]$ بیان‌گر تصمیمات سطح دوم می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این تصمیمات به سناریوهای پیش‌بینی شده، (ω) وابسته می‌باشند، به همین دلیل به آن‌ها تصمیمات وابسته نیز گفته می‌شود.

۳-۴-۱- قیود مسئله بهینه‌سازی

۳-۴-۱-۱- تعادل انرژی در بازار

در هر ساعت از زمان مورد بررسی و در هر سناریو، انرژی مصرف‌شده توسط مصرف‌کنندگان باید با انرژی خریداری شده از بازار لحظه‌ای، قرارداد پیش‌خرید و انرژی باد و خورشید خریداری شده، برابر باشد:

$$P_t^P(\omega) - P_t^S(\omega) = l_t + (l_t - l_f) \times E \times \frac{(\lambda_t(\omega) - \lambda_0)}{\lambda_0} - P_t^W(\omega) - P_t^{su}(\omega) - \sum_{NF} P^c \quad (4)$$

عبارت سمت چپ رابطه فوق، $P_t^P(\omega) - P_t^S(\omega)$ بیان‌گر توان خالص مبادله شده در بازار است. اگر این عبارت مثبت باشد، خرده‌فروش از بازار زمان‌واقعی انرژی خریداری کرده و اگر منفی باشد به معنای فروش انرژی توسط خرده‌فروش در بازار است. اولین عبارت سمت راست معادله، $l_t + (l_t - l_f) \times E \times \frac{(\lambda_t(\omega) - \lambda_0)}{\lambda_0}$ انرژی مصرفی توسط مصرف‌کنندگان، $P_t^W(\omega)$ و $P_t^{su}(\omega)$ به ترتیب انرژی تولیدشده توسط نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و عبارت چهارم، $\sum_{NF} P^c$ بیان‌گر انرژی خریداری شده توسط قراردادهای پیش‌فروش است. NF تعداد قراردادهای پیش‌فروش و P^c سطح توان هر قرارداد است.

۳-۴-۲- محدودیت توان تولیدی بادی و خورشیدی

با توجه به این که نیروگاه‌های تجدیدپذیر در این مقاله به‌عنوان منابع اصلی تولیدکننده توان در نظر گرفته شده‌اند، توان تولیدی پیش‌بینی شده باید در محدوده توان قابل تولید نیروگاه از نظر فنی باشد:

$$\underline{P^W(i)} \leq P_t^W(i) \leq \overline{P^W(i)} ; \forall t \in T \quad (5)$$

$$\underline{P^{su}(i)} \leq P_t^{su}(i) \leq \overline{P^{su}(i)} ; \forall t \in T \quad (6)$$

که در آن، $\underline{P^{su}}$ و $\overline{P^{su}}$ حداکثر و حداقل توان تولید نیروگاه خورشیدی و $\underline{P^W}$ و $\overline{P^W}$ حداکثر و حداقل توان تولید نیروگاه بادی و شاخص i اندیس نیروگاه می‌باشد.

۳-۵-۲- روش قیمت‌گذاری شاخص و بلوک

در این مقاله، روش قیمت‌گذاری شاخص و بلوک^۷ جهت عرضه انرژی به مصرف‌کنندگان در بازار خرده‌فروشی پیشنهاد شده است. این روش

قطعیت‌ها و تنظیم قراردادهای پیش‌فروش برق در مرحله اول، بازار خرده‌فروشی به مرحله اجرا گذاشته شده و مقدار واقعی متغیرهای تصادفی، شامل قیمت برق، میزان توان بادی و خورشیدی، محقق می‌شود. در این هنگام شرکت‌کنندگان بازار، مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان، بسته به میزان انحراف مدل پیش‌بینی شده از مقدار واقعی محقق شده آن، اقدام به انجام فعالیت در خصوص بهینه‌سازی سود و کمینه‌سازی هزینه (ریسک) خواهند کرد. فعالیت‌های مذکور در قالب تصمیمات سطح دوم برنامه‌ریزی تصادفی لحاظ شده‌اند، به طوری که شرکت‌کنندگان بازار را قادر می‌سازد تا فرصت‌های ایجاد شده در بازار را مدیریت نمایند. بدین منظور، دو آنالیز ریسک و حساسیت از دیدگاه مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان پیشنهاد شده که در ادامه معرفی خواهند شد.

۳-۶- مدیریت ریسک و هزینه در بازار خرده‌فروشی

در این بخش به بیان دو روش پیشنهادی در خصوص مدیریت ریسک و هزینه در محیط بازار خرده‌فروشی پرداخته می‌شود. مطالعات ارائه شده در این بخش به گونه‌ای طرح شده‌اند تا شرکت‌کنندگان بازار را قادر به مدیریت فعالیت‌های خود در بازار نمایند.

۳-۶-۱- کش‌سانی بار و حساسیت تقاضا

در این مقاله فرض می‌شود که مصرف‌کننده نسبت به قیمت پیشنهادی توسط خرده‌فروش که با λ نشان داده می‌شود حساس است. به بیان دیگر اگر قیمت پیشنهادی خرده‌فروش برای قراردادهای پیش‌فروش برق زیاد باشد، مصرف‌کننده میزان خرید خود از قراردادهای پیش‌فروش را کاهش داده و سهم بیشتری از نیاز خود به انرژی را تحت قیمت‌گذاری زمان واقعی خریداری خواهد نمود. در مقابل با کاهش قیمت پیشنهادی خرده‌فروش در قراردادهای پیش‌فروش، مصرف‌کنندگان سهم بیشتری از انرژی مورد نیاز خود را از این قراردادها تأمین می‌کنند. در واقع کش‌سانی بار، واکنش مصرف‌کننده را نسبت به افزایش یا کاهش قیمت برق در بازار نشان می‌دهد که این واکنش به صورت افزایش یا کاهش میزان خرید از بازار برق خواهد بود. به این خاصیت، کش‌سانی بار و به پارامتر توصیف‌کننده این رابطه، ضریب حساسیت تقاضا نسبت به قیمت برق گفته می‌شود. بنابراین، ضریب حساسیت تقاضا نسبت به قیمت برق، ارتباط بین قیمت برق و میزان تقاضای انرژی توسط مصرف‌کنندگان را بیان می‌کند که بر طبق [۹] به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$E = \frac{\Delta D}{\frac{D}{\Delta \pi}} \quad (15)$$

که در آن، E ضریب حساسیت تقاضا نسبت به قیمت برق، D میزان تقاضا و π قیمت است. بر طبق این خاصیت، در هر بازه زمانی که قیمت برق افزایش (کاهش) یابد میزان انرژی خریداری شده از بازار کاهش (افزایش) می‌یابد.

برنامه‌ریزی دوسطحی خطی در تضاد است، لذا مدل غیرخطی فوق به نمودار چندپله‌ای با ۱۵۰ پله در این مقاله تبدیل شده است. برای خطی سازی این نمودار، مطابق شکل ۳ هر بازه قیمت فروش برق $[\lambda_{i-1}^F, \lambda_i^F]$ به یک سطح از انرژی $\bar{\lambda}_i^F$ که مصرف‌کننده مایل به خرید در قیمت ثابت است؛ اختصاص یافته است. بیان ریاضی نمودار چندپله‌ای به صورت زیر است:

$$l_f = \sum_{i=1}^{n_l} \bar{\lambda}_i^F v(i) \quad (10)$$

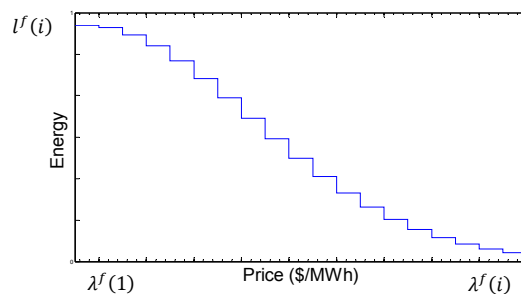
$$\lambda^f = \sum_{i=1}^{n_l} \lambda^f(i) \quad (11)$$

$$\bar{\lambda}^f(i-1)v(i) \leq \lambda^f(i) \leq \bar{\lambda}^f(i)v(i) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_l} v(i) = 1 \quad (13)$$

$$v(i) \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n_l$$

که در آن، $l(i)$ سطح بار در پله i ، $\lambda^f(i)$ قیمت برق پله i ، $v(i)$ متغیر باینری کمکی و n_l تعداد پله‌های نمودار می‌باشد.



شکل ۳: نمودار چندپله‌ای قیمت برق-انرژی مسئله خرده‌فروش

۳-۵-۲- بازارهای زمان واقعی

خرده‌فروش می‌تواند با شرکت در بازار زمان واقعی بخشی از نیاز خود به انرژی را مرتفع سازد. همچنین در صورتی که انرژی حاصل از باد، خورشید و قرارداد پیش‌فروش بیش از مصرف مشتریان خرده‌فروش باشد، می‌تواند این مازاد انرژی را در بازار زمان واقعی به فروش برساند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، قیمت بازار زمان واقعی برای خرده‌فروش نامعلوم بوده و به عنوان یک فرآیند تصادفی مدل می‌شود. این فرآیند تصادفی با استفاده از سناریوهای مختلف $\{\lambda_1^P(\omega), \dots, \lambda_{N_T}^P(\omega)\}$ ، $\forall \omega \in \Omega$ به نمایش در خواهند آمد. خرید و فروش از بازار زمان واقعی به ترتیب با $P_t^P(\omega)$ و $P_t^S(\omega)$ نشان داده می‌شوند. بنابراین هزینه خالص مبادله در بازار لحظه‌ای به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$(P_t^P(\omega) - P_t^S(\omega)) \times \lambda_t^P(\omega); \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega \quad (14)$$

اگر حاصل عبارت فوق مثبت باشد بدان معنی است که خرده‌فروش از بازار لحظه‌ای انرژی خریداری می‌کند و اگر حاصل رابطه مذکور منفی باشد یعنی خرده‌فروش انرژی مازاد خود را در بازار لحظه‌ای به فروش می‌رساند.

در بخش‌های پیشین فعالیت‌ها و تصمیم‌گیری‌های سطح اول برنامه‌ریزی تصادفی تشریح شده‌اند. پس از پایان مدل‌سازی عدم

متغیر کمکی $\eta(\omega)$ برابر تفاوت ζ و سود خرده‌فروش در سناریوی ω است به شرطی که این تفاوت بزرگ‌تر از صفر باشد، بنابراین داریم:

$$\eta(\omega) = [\zeta - P_r(\omega)] \geq 0 \quad (۲۰)$$

در عبارات فوق، $P_r(\omega)$ سود خرده‌فروش در سناریو ω ، $\pi(\omega)$ احتمال رخداد سناریو ω و $\text{Prob}(\cdot)$ بیان‌گر احتمال می‌باشد.

به‌طور کلی در برنامه‌ریزی تصادفی، همان‌طور که در عبارت پنجم تابع هدف، $\left(\zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \eta(\omega)\right)$ ، نیز مشخص است، شاخص CVaR را با یک ضریب $\beta \in [0, \infty)$ در تابع هدف قرار می‌دهند. این ضریب بیزاری از ریسک^۹ نامیده می‌شود. ضریب بیزاری از ریسک نشان‌دهنده مقدار مصالحه بین سود مورد انتظار و میزان ریسک‌پذیری خرده‌فروش است. اگر $\beta = 0$ باشد، عبارت ریسک در تابع هدف در نظر گرفته نشده و مسئله تبدیل به مسئله ریسک خنثی^۹ می‌شود. هرچقدر β افزایش یابد، عبارت سود مورد انتظار نسبت به عبارت ریسک دارای اهمیت کمتری خواهد شد. به‌عبارت دیگر، با افزایش ضریب بیزاری از ریسک در تابع هدف، خرده‌فروش با احتیاط بیشتری نسبت به انعقاد قرارداد پیش‌فروش و خریدوفروش از بازار زمان‌واقعی می‌پردازد. در حالت حدی $\beta \rightarrow \infty$ نیز خرده‌فروش به یک بازیگر بیزار از ریسک^{۱۰} تبدیل خواهد شد.

۳-۷- سود خرده‌فروش در بازار

سود خرده‌فروش برابر با سود حاصل از فروش انرژی در قیمت ثابت و زمان واقعی به مصرف‌کننده و همچنین هزینه خالص در بازار زمان‌واقعی (سود ناشی از فروش انرژی و یا هزینه ناشی از خرید انرژی) با کسر هزینه‌ها است که شامل خرید انرژی حاصل از باد و خورشید و همچنین قراردادهای پیش‌خرید است. سود قطعی خرده‌فروش به مقدار واقعی فرآیندهای تصادفی (انرژی باد و خورشید و قیمت) وابسته است. بنابراین، سود خرده‌فروش در کلیه سناریوها به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_r(\omega) = \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \sum_{t \in T} \left(\left(P_t^s(\omega) - P_t^p(\omega) \right) + \left(l_t - l_f \right) \times \left(1 + E \times \left(\frac{\lambda_t(\omega) - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \right) \times \lambda_t(\omega) - P_t^w(\omega) \lambda^w(\omega) - P_t^{su}(\omega) \lambda^{su}(\omega) \right) + \sum_{t \in T} (l_f \lambda^f d_t - C_t^c) \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق، λ^f و l_f به‌ترتیب قیمت انرژی و بار پیش‌بینی شده، d_t طول زمانی مصرف بار (ساعت) و C_t^c هزینه قرارداد پیش‌فروش در مقطع زمانی t و $\lambda^w(\omega)$ و $\lambda^{su}(\omega)$ به‌ترتیب بیان‌گر قیمت انرژی بادی و خورشیدی در سناریو ω می‌باشند.

۳-۸- تولید سناریو

در برنامه‌ریزی تصادفی فرآیندهای تصادفی را می‌توان با استفاده از روش‌های تولید سناریو مدل کرد. مسئله برنامه‌ریزی تصادفی با

به‌منظور نشان دادن پاسخ در کوتاه‌مدت، تابع حساسیت تقاضا در هر ساعت باید مجدداً محاسبه شود. بدین‌منظور از قیمت مرجع و بار مرجع برای هر ساعت استفاده می‌شود. بار مرجع برابر با بار پیش‌بینی شده در هر ساعت است. قیمت مرجع نیز، برای تمام ساعات یکسان در نظر گرفته شده و برابر با متوسط وزنی انرژی در کل دوره مورد بررسی، بدون در نظر گرفتن پاسخ تقاضا است:

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{t \in T} \lambda_t P_t}{P_0} = \frac{\sum_{t \in T} \lambda_t P_t}{\sum_{t \in T} P_t} \quad (۱۶)$$

به‌طوری‌که λ_0 و P_0 به‌ترتیب نشانگر قیمت مرجع و بار مرجع، P_t و λ_t بیان‌گر میزان توان و قیمت برق در زمان t می‌باشند. پارامتر T نیز بازه زمانی برنامه‌ریزی مسئله خرده‌فروشی بوده که در این مقاله یک ماه در نظر گرفته شده است.

رابطه زیر سود ناشی از فروش انرژی تحت قیمت‌گذاری زمان‌واقعی را با در نظر گرفتن حساسیت مصرف‌کننده نشان می‌دهد:

$$(l_t - l_f) \times \left(1 + E \times \left(\frac{\lambda_t(\omega) - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \right) \times \lambda_t(\omega) \quad (۱۷)$$

که در آن، E حساسیت مصرف‌کننده و l_t و l_f به‌ترتیب بار مصرف‌کننده در هر ساعت و میزان بار پیش‌بینی شده می‌باشند.

۳-۶-۲- مطالعات ریسک در بازار خرده‌فروشی

در این مقاله به‌منظور مطالعه تأثیر ریسک بر سود و زیان خرده‌فروشان از شاخص "ارزش در معرض ریسک مشروط" (CVaR) استفاده شده است. از نظر ریاضی، ارزش در معرض ریسک مشروط با سطح اطمینان α ، $\text{CVaR}_{1-\alpha}$ ، معادل سود مورد انتظار $(1-\alpha) \times 100\%$ بدترین سناریوها است (بدترین سناریوها معادل سناریوهایی است که کمترین سود را دارند). به‌عنوان مثال اگر سطح اطمینان (α) را برابر 0.95 در نظر بگیریم، آنگاه ارزش در معرض ریسک مشروط $\text{CVaR}_{0.05}$ ، برابر با سود مورد انتظار 5% بدترین سناریوهاست. از دیدگاه استدلالی، هدف اصلی از مطالعه ارزش در معرض ریسک مشروط، تعیین حداکثر زیان در شرایط نامطلوب است و این یعنی پاسخ به این سؤال که در بدترین حالت ممکن، حداکثر زبانی که خرده‌فروش متحمل خواهد شد، چقدر خواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن شاخص ارزش در معرض ریسک مشروط با سطح اطمینان α در تابع هدف، می‌توان به بهینه‌سازی اقدامات خرده‌فروش در بازار با توجه به میزان سود مورد انتظار و درجه قابل قبول ریسک‌پذیری توسط خرده‌فروش پرداخت.

با توجه به ملاحظات فوق، شاخص CVaR در مطالعه خرده‌فروشی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۳، ۲۴]:

$$\text{CVaR}_{1-\alpha} = \max_{\zeta, \eta(\omega)} \zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \eta(\omega) \quad (۱۸)$$

که در آن، ζ متغیری است که مقدار بهینه آن برابر بیشترین سود خرده‌فروش (با در نظر گرفتن ریسک) است؛ به‌شرط آن‌که احتمال این‌که سود خرده‌فروش کوچک‌تر و یا مساوی ζ باشد کمتر از $1-\alpha$ باشد. به بیان ریاضی داریم:

$$\zeta_{\text{optimum}} = \max(P_r(\omega)) | [\text{Prob}(P_r(\omega) \leq \zeta) \leq 1 - \alpha] \quad (۱۹)$$

آماري پایه بوده که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی SAS می‌توان تحلیل‌های مختلفی از جمله تغییر، مدیریت، تحلیل و بازیابی داده‌ها را از میان حجم عظیمی از داده‌های ورودی انجام داد.

(۳) تشخیص نارسایی: در این مرحله، تشخیص نارسایی برای سنجش درستی مدل فرضی در مرحله اول انجام می‌شود. این مرحله اساساً شامل امتحان کردن مدل ارائه شده در مرحله اول است. مدل‌های ارائه‌شده بایستی شرایط مدنظر طراح سیستم را برآورده نماید. این شرایط، به‌عنوان نمونه، شامل شرایط نویز سفید (متوسط صفر و واریانس ثابت) یا برخی توابع توزیع احتمالی در مورد بعضی متغیرهای تصادفی خاص است. بدیهی است شناخت خصوصیات متغیر تصادفی تحت مطالعه و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن سهم مهمی در تولید سناریوهای مناسب ایفا می‌کند.

۳-۸-۲- روش مونت کارلو

روش مونت کارلو متداول‌ترین روش در تولید سناریو جهت شبیه‌سازی توربین‌های بادی است. در این روش با استفاده از یک دنباله اعداد تصادفی با توزیع مشخص به تولید یک سری نمونه تجربی پرداخته می‌شود. در روش مونت کارلو برای تولید تصادفی سرعت باد جهت ایجاد سناریو، ابتدا اعداد تصادفی R با توزیع یکنواخت در بازه $[0-1]$ تولید می‌شوند. سپس با استفاده از روابط متوسط و واریانس سرعت $[31]$ سرعت‌های مختلف باد تولید شده و با استفاده از نمودار توان-سرعت توربین، سرعت باد به توان تولیدی تبدیل می‌شود. با تولید کافی اعداد تصادفی سناریوهای مختلف به‌دست می‌آید. در این مقاله نرم‌افزار MATLAB به‌منظور شبیه‌سازی روش مونت کارلو استفاده شده است. با توجه به این‌که توزیع ویبول به‌خوبی بیان‌گر عدم قطعیت‌های مرتبط با انرژی بادی در طبیعت است، لذا استفاده از روش مونت کارلو با توزیع تصادفی ویبول در این مقاله برای شبیه‌سازی عدم قطعیت انرژی بادی استفاده شده است. با این‌وجود، هیچ محدودیتی در استفاده از روش ARIMA برای شبیه‌سازی انرژی بادی وجود ندارد.

۳-۸-۳- کاهش سناریو به روش فاصله کانترویج

سناریوهای تولید شده در برنامه‌ریزی تصادفی که به‌دستی نشان دهنده عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری باشند عموماً از نظر ابعاد بسیار بزرگ هستند و باعث زمان‌بر بودن مسئله بهینه‌سازی می‌شوند. به‌منظور فائق آمدن بر این مسئله، با استفاده از روش کاهش سناریو، تعداد سناریوها کاهش می‌یابد درحالی‌که خصوصیات اصلی مدل سناریو همچنان حفظ می‌شود. در این مقاله از روش فاصله احتمال کانترویج به‌عنوان الگوریتم کاهش سناریو استفاده شده است. می‌توان نشان داد که جواب بهینه مسئله ساده شده با استفاده از فاصله احتمال کانترویج به مقدار بهینه مسئله اصلی نزدیک خواهد بود. فاصله کانترویج در الگوریتم کاهش سناریو به‌صورت زیر تعریف می‌شود $[32-34]$:

$$D_K(Q, Q') = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} \min_{\omega' \in \Omega'} c(\omega, \omega') \quad (22)$$

متغیرهای پیوسته در بهترین حالت می‌تواند تنها برای مسائل کوچک به‌کار رود، در حقیقت تعیین یک جواب ممکن در این‌گونه مسائل اغلب غیرممکن است. به همین دلیل استفاده از مجموعه متناهی از متغیرهای تصادفی گسسته در مسائل واقعی و کاربردی تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت اجتناب‌ناپذیر است. بدین‌منظور، روش‌های تولید سناریو با متغیرهای تصادفی گسسته در این مقاله در نظر گرفته شده‌اند. روش‌های متفاوتی برای تولید سناریو جهت مدل‌سازی متغیرهای تصادفی پیوسته و گسسته وجود دارند. در این مقاله از مدل ARIMA $[25, 26]$ مبتنی بر سری‌های زمانی $[27, 26]$ جهت تولید سناریوی قیمت برق و انرژی خورشیدی و از روش مونت کارلو برای تولید سناریوهای انرژی بادی استفاده شده است.

روش ARIMA با استفاده از اطلاعات گذشته متغیر تصادفی (سری‌های زمانی) اقدام به تخمین پارامتر می‌پردازد. بنابراین در این روش به اطلاعات گذشته متغیر تصادفی نیاز خواهیم داشت. در روش مونت کارلو، با استفاده از یک دنباله اعداد تصادفی با توزیع مشخص به تولید یک سری نمونه تجربی می‌پردازیم. با توجه به این‌که توزیع ویبول^{۱۱} به‌خوبی بیان‌گر عدم قطعیت‌های مرتبط با انرژی بادی در طبیعت است، لذا استفاده از روش مونت کارلو با توزیع تصادفی ویبول در این مقاله برای شبیه‌سازی عدم قطعیت انرژی بادی استفاده شده است. با این‌وجود، هیچ محدودیتی در استفاده از روش ARIMA برای شبیه‌سازی انرژی بادی وجود ندارد $[28]$.

۳-۸-۱- روش ARIMA مبتنی بر سری‌های زمانی

مدل‌های ARIMA روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر مدل‌های سری‌های زمانی هستند $[25-27]$. در این روش پیش‌بینی مقادیر در آینده بر پایه مشاهدات قبلی و اطلاعات گذشته متغیر تصادفی صورت می‌گیرد که عبارت سری‌های زمانی به این امر اشاره دارد. در این روش تولید سناریو در سه مرحله متوالی صورت می‌پذیرد:

(۱) مدل‌سازی سیستم: در این مرحله مدل کلی ARIMA برای پیش‌بینی متغیر تصادفی انتخاب می‌شود. این انتخاب بر اساس خصوصیات متغیر تصادفی تحت مطالعه انجام می‌گردد. در این مرحله شناخت خصوصیات متغیر تصادفی و تهیه اطلاعات از مشاهدات و تجربیات قبلی آن، یک امتیاز مهم به حساب می‌آید. مدل به‌دست‌آمده در این مرحله دارای پارامترهایی است که تعیین آن‌ها نیازمند گام بعدی خواهد بود.

(۲) تخمین پارامترها: بعد از مشخص شدن مدل، پارامترهای آن باید تخمین زده شوند. روش‌های مختلفی مانند روش حداکثر کردن درست‌نمایی^{۱۲}، کوچک‌ترین مربع غیرشرطی^{۱۳} و کوچک‌ترین مربع شرطی^{۱۴} وجود دارند $[29]$. به‌منظور تخمین پارامترها در این مقاله نرم‌افزار SAS^{۱۵} مورد استفاده قرار گرفته است $[30]$. این نرم‌افزار، یک نرم‌افزار مدیریت داده برای تحلیل‌های آماری و انجام مطالعات پیش‌بینی و تخمین پارامتر در محیط پایگاه داده است. ورودی این نرم‌افزار اطلاعات

۴- اجرای مسئله خرده‌فروشی در بازار

با توجه به مطالب ذکر شده و مدل ارائه شده در بخش‌های قبل، در این بخش به ارائه نتایج عددی حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی پرداخته خواهد شد. خرده‌فروش در نظر گرفته شده در این مقاله، خرده‌فروش کوچکی است که نمی‌تواند تأثیری بر روی بازار عمده‌فروشی و قیمت تعیین شده در بازار داشته باشد و در نتیجه پذیرنده قیمت محسوب می‌شود.

نتایج عددی به دست آمده حاصل مطالعه عددی در یک بازار فرضی بر پایه داده‌های قیمت و بار بازار PJM^{۱۶} در سال ۲۰۰۸ است [۳۷]. در این مدل خرده‌فروش برای مدت یک ماه آینده می‌بایست شرایط خرید و فروش انرژی را مشخص نماید. به منظور تأمین انرژی مورد نیاز خود خرده‌فروش با گزینه‌های قرارداد پیش‌خرید، بازار زمان واقعی و قرارداد ظرفیت با تولیدکننده انرژی باد و خورشید روبرو است. همچنین به منظور فروش انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده، خرده‌فروش وارد قرارداد یک‌ماهه بر اساس قیمت‌گذاری شاخص و بلوک با مصرف‌کننده می‌شود. در ادامه به ارائه و بررسی نتایج عددی حاصل پرداخته خواهد شد.

۴-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت بار

خرده‌فروش برای تعیین انرژی مورد نیاز خود می‌بایست از میزان مصرف مشتریان خود در طول ماه اطلاع داشته باشد. به همین منظور از مدل ARIMA برای پیش‌بینی بار مصرف‌کننده طبق رابطه زیر استفاده شده است:

$$(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4) \times (1 - \phi_{23} B^{23} - \phi_{24} B^{24} - \phi_{25} B^{25} - \phi_{26} B^{26} - \phi_{48} B^{48} - \phi_{72} B^{72} - \phi_{96} B^{96} - \phi_{120} B^{120} - \phi_{144} B^{144}) \times (1 - \phi_{168} B^{168} - \phi_{336} B^{336}) I_t = (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3) \times (1 - \theta_{24} B^{24} - \theta_{48} B^{48} - \theta_{72} B^{72} - \theta_{96} B^{96}) \varepsilon_t \quad (26)$$

پارامتر ε_t عبارت خطا در زمان t است که دارای خاصیت نویز سفید است ($\varepsilon_t \sim N(0, \sigma)$). از این ترم در روش آریمای جهت تخمین پارامتر و تشخیص نارسایی استفاده می‌شود. پارامترهای مدل فوق با استفاده از نرم‌افزار SAS تخمین زده شده‌اند. این پارامترها در جدول ۱ آورده شده‌اند. با استفاده از داده‌های مربوط به سال ۲۰۰۸ بازار PJM [۳۷] پیش‌بینی بار در ماه می صورت پذیرفته است. بدین منظور از داده‌های تاریخی ۴ ماه گذشته بهره گرفته شده است.

۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت انرژی خورشیدی

برای مدل‌سازی عدم قطعیت انرژی خورشیدی نیز از داده‌های ایالت تگزاس سال ۲۰۰۰ مربوط به سایت Persidio [۳۸] استفاده شده است. روابط زیر عدم قطعیت انرژی خورشیدی را با استفاده از مدل ARIMA بیان می‌کند:

$$(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2) \times (1 - \phi_{12} B^{12} - \phi_{24} B^{24}) \times (1 - B^{12}) P_t^{su} = (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3) \varepsilon_t \quad (27)$$

که در آن، $\omega \in \Omega$ و $\omega' \in \Omega_s$ به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه سناریوهای اولیه و کاهش یافته و Q و Q' به ترتیب توزیع‌های مربوط به این دو مجموعه سناریو می‌باشند.

در روش کانتروویچ، شاخص تصمیم‌گیری در مورد حذف یک سناریو فاصله کانتروویچ است. طبق تعریف فوق، شاخص فاصله کانتروویچ برابر حاصل ضرب فاصله سناریو کاندید حذف شدن تا هریک از سناریوهای دیگر، در احتمال وقوع سناریو کاندید حذف است. علت ضرب نمودن فاصله دو سناریو در احتمال وقوع آن این است که ممکن است فاصله بین دو سناریو کوچک باشد اما به دلیل احتمال بالای وقوع سناریو، حذف آن تأثیر زیادی بر روی نتایج مطالعات داشته باشد. اگر فاصله کانتروویچ دو سناریو از حد معینی کوچک‌تر باشد به این معناست که این دو سناریو بسیار شبیه به هم بوده و بررسی هم‌زمان آن‌ها سبب افزایش بار محاسباتی برنامه خواهد شد. در این حالت، این دو سناریو با هم ترکیب شده و احتمال وقوع سناریو جدید برابر مجموع احتمال دو سناریو خواهد بود.

۳-۹- توان تولیدی نیروگاه بادی

توان تولیدی نیروگاه‌های بادی تحت تأثیر مستقیم شدت وزش باد است. با در نظر گرفتن سرعت وزش باد و چگالی هوا به عنوان پارامترهای اصلی در تعیین انرژی باد، توان باد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P^{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (W) \quad (23)$$

که در آن، P^{wind} توان موجود در وزش باد با چگالی ρ و سرعت وزش v متر بر ثانیه است. به دلیل محدودیت‌های فنی، حداکثر ۵۹ درصد توان موجود در باد توسط توربین‌های بادی قابل استحصال است. بنابراین توان تولیدی توسط نیروگاه‌های بادی در این مقاله به صورت زیر محاسبه شده است [۳۵]:

$$P^w = 0.59 \times \left(\frac{1}{2} \rho v^3\right) \quad (W/m^2) \quad (24)$$

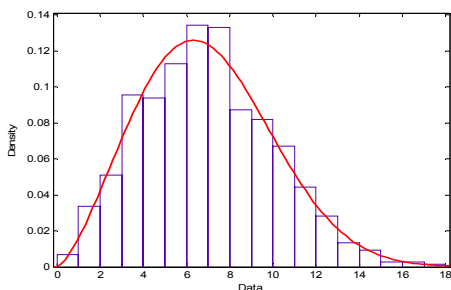
۳-۱۰- توان تولیدی نیروگاه خورشیدی

توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی به طور مستقیم به شدت تابش خورشید بستگی دارد. با این وجود سایر عوامل نظیر دما، شدت وزش باد، موقعیت جغرافیایی و زاویه تابش خورشید نیز سهم زیادی در راندمان سلول‌های خورشیدی ایفا می‌کنند. در این مقاله از رابطه زیر جهت محاسبه انرژی خورشیدی استفاده شده است [۳۶]:

$$P_t^{su}(G_t) = \begin{cases} P_{sn} \times \frac{(G_t)^2}{G_{std} R_c} & 0 < G_t < R_c \\ P_{sn} \times \frac{G_t}{G_{std}} & G_t > R_c \end{cases} \quad (25)$$

که در آن، G_t میزان تابش پیش‌بینی شده خورشید در زمان t ، P_{sn} توان نامی نیروگاه خورشیدی، G_{std} میزان تابش محیط در شرایط استاندارد معادل 1000 W/m^2 و R_c میزان تابش ثابت 150 W/m^2 است.

تابع توزیع Weibull بوده که در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو مبنای مدل‌سازی عدم قطعیت انرژی بادی قرار گرفته است.



شکل ۴: تابع توزیع Weibull جهت مدل‌سازی عدم قطعیت انرژی باد

سرعت باد به‌طور پیوسته در حال تغییر بوده و برای تخمین سرعت باد از روش‌های آماری استفاده می‌شود. تابع چگالی احتمال Weibull به‌طور وسیعی در حوزه مهندسی برای توصیف تغییرات سرعت باد استفاده شده و به شکل زیر توصیف می‌شود [۳۵]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (29)$$

که در رابطه فوق، v سرعت باد، k ضریب شکل و c ضریب مقیاس تابع چگالی احتمال Weibull است. با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو سرعت‌های مختلف باد تولید شده و با استفاده از نمودار توان-سرعت توربین، سرعت باد به توان تولیدی تبدیل می‌شود. با تولید کافی اعداد تصادفی سناریوهای مختلف به‌دست می‌آید.

۴-۵- قرارداد پیش خرید

در این مقاله دو قرارداد پیش‌خرید جهت تأمین بخشی از نیاز خرده‌فروش در نظر گرفته شده است. این قراردادها در طول مدت ماه و برای تمام ساعات اعمال می‌شوند. قراردادهای پیش‌خرید در بلوک‌های ۱۰ MW مبادله می‌شوند. جدول ۲ میزان قراردادهای پیش‌خرید و قیمت آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲: قراردادهای پیش‌خرید

قرارداد	قیمت (S/MWh)	توان (MW)
شماره ۱	۲۷	۸۰
شماره ۲	۳۰	۱۲۰

۴-۶- تولید سناریو

به‌منظور مدل کردن عدم قطعیت برای قیمت در ابتدا ۲۵۰ سناریو تولید شد. سپس با استفاده از روش کاهش سناریو، تعداد سناریوها به ۱۰۰ سناریو کاهش یافت. تعداد سناریوهای تولیدشده جهت تخمین بار در ابتدا ۵۰ سناریو بود که با اعمال روش کانترویچ به ۱۰ سناریو کاهش یافت. همچنین برای مدل‌سازی عدم قطعیت مربوط به انرژی حاصل از باد با استفاده از روش مونت کارلو در ابتدا حدود ۱۰۰۰

جدول ۱: پارامترهای تخمین‌زده‌شده توسط مدل ARIMA

پارامتر	مقدار تخمینی	پارامتر	مقدار تخمینی
Φ_1	۰/۴۶۸	Φ_{120}	۰/۴۱۸
Φ_2	-۰/۸۳۱	Φ_{144}	-۰/۳۳۲
Φ_3	-۰/۳۱۶	Φ_{168}	۰/۵۴۸
Φ_4	-۰/۰۵۷	Φ_{236}	۰/۳۲۳
Φ_{23}	۰/۰۴۱	θ_1	-۰/۹۶۹
Φ_{24}	-۰/۴۵۹	θ_2	-۰/۰۱۵
Φ_{25}	۰/۰۳۹	θ_3	۰/۰۴۹
Φ_{26}	۰/۰۲۵	θ_{24}	-۰/۸۱۹
Φ_{48}	۰/۲۶۱	θ_{48}	-۰/۱۱۷
Φ_{72}	-۰/۲۰۵	θ_{72}	-۰/۵۳۶
Φ_{96}	-۰/۲۵۸	θ_{96}	۰/۷۴۶
Φ_1	۱۵۰۱۹۳	θ_1	۰/۳۳۴۴۲
Φ_2	-۰/۷۰۱۳۸	θ_2	-۰/۱۱۷۷۱
Φ_{12}	-۰/۴۹۲۷۸	θ_3	-۰/۰۴۵۰۱
Φ_{24}	-۰/۲۶۴۸۳		
Φ_1	۰/۵۹۱۶۹	Φ_{48}	۰/۶۶۹۰۷
Φ_2	-۰/۸۷۸۳۲	Φ_{72}	-۰/۰۷۶۱۶
Φ_3	-۰/۴۵۵۷۹	Φ_{96}	۰/۰۱۳۸۲
Φ_4	-۰/۰۴۳۴۴	Φ_{120}	۰/۰۰۹۵
Φ_{24}	۰/۳۰۶۵	Φ_{144}	۰/۰۴۸۲۹
Φ_{25}	۰/۰۰۵	Φ_{168}	-۰/۸۷۳۲
Φ_{236}	۰/۰۳۲۰۲	θ_{48}	۰/۶۶۱۲۶
θ_2	-۰/۷۷۳۰۹	θ_{168}	۰/۸۲۶۰۴
θ_{24}	۰/۱۳۳۲۲		

۴-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار برق

برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار زمان‌واقعی، مانند پیش‌بینی بار از داده‌های بازار PJM استفاده شده است. بر این اساس، مدل ARIMA عدم قطعیت قیمت برق را به فرم زیر بیان می‌کند:

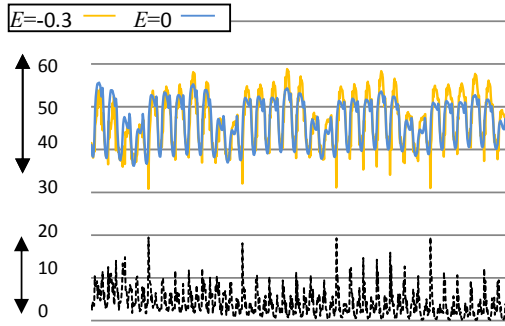
$$(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4) \times (1 - \phi_{24} B^{24} - \phi_{25} B^{25} - \phi_{48} B^{48} - \phi_{72} B^{72} - \phi_{96} B^{96} - \phi_{120} B^{120} - \phi_{144} B^{144}) \times (1 - \theta_{168} B^{168} - \theta_{336} B^{336}) \ln \lambda_t = (1 - \theta_2 B^2) \times (1 - \theta_{24} B^{24} - \theta_{48} B^{48}) (1 - \theta_{168} B^{168}) \varepsilon_t \quad (28)$$

پارامترهای مدل عدم قطعیت بار، انرژی خورشیدی و قیمت برق با استفاده از نرم‌افزار SAS تخمین زده شده و به ترتیب در جدول ۱ بیان شده‌اند.

۴-۴- عدم قطعیت انرژی بادی

برای مدل‌سازی عدم قطعیت مرتبط با انرژی بادی از روش مونت کارلو استفاده شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده سرعت باد بر اساس

مصرف‌کننده، مصرف در ساعاتی که قیمت انرژی بالا است کاهش یافته و از نیاز خرده‌فروش برای خرید از بازار زمان‌واقعی در ساعاتی که قیمت انرژی زیاد است کاسته می‌شود. باید توجه نمود که افزایش CVaR در شکل ۶ نشان‌دهنده کاهش ریسک‌پذیری خرده‌فروش بوده و سود مورد انتظار با افزایش بی‌زاری از ریسک کاهش می‌یابد.



شکل ۵: رابطه متقابل حساسیت تقاضا، سطح تقاضا و قیمت برق

قیمت فروش انرژی در حالت قیمت ثابت (قراردادهای پیش‌فروش) برای ضرایب مختلف β در شکل ۷ نشان داده شده است. خرده‌فروش برای مقابله با ریسک دو گزینه افزایش قیمت و استفاده از قراردادهای پیش‌خرید را در اختیار دارد. با افزایش β قیمت فروش انرژی و همچنین میزان استفاده از قراردادهای پیش‌خرید همان‌طور که در جدول ۳ نیز نشان داده شد افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود در $\beta = 10$ قیمت فروش نسبت به $\beta = 1$ افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان در میزان قراردادهای پیش‌خرید جستجو نمود. همان‌طور که در جدول ۳ آمده است، در $\beta = 10$ میزان حجم قرارداد پیش‌خرید نسبت به $\beta = 1$ افزایش می‌یابد، در نتیجه خرده‌فروش در خرید انرژی با ریسک کمتری مواجه می‌شود و با کاهش قیمت فروش، میزان فروش انرژی در قیمت ثابت را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن با افزایش β قیمت فروش انرژی با افزایش مواجه می‌شود.

جدول ۳: انرژی خریداری‌شده در قراردادهای مختلف

β	$E=-0.1$		$E=-0.2$		$E=-0.3$	
	قرارداد		قرارداد		قرارداد	
	۱	۲	۱	۲	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۷۵	۸۰	۰	۸۰	۰	۸۰	۰
۱۰	۸۰	۰	۸۰	۱۰	۸۰	۳۰

شکل ۸ قیمت فروش انرژی را برای ضرایب حساسیت تقاضای متفاوت نشان می‌دهد. با افزایش β قیمت فروش انرژی به مصرف‌کننده در قیمت ثابت (قراردادهای پیش‌فروش) افزایش می‌یابد. علاوه بر آن،

سناریو در نظر گرفته شد که پس از اعمال روش کاهش سناریو کانترویچ تعداد سناریوها به ۲۵۰ سناریو کاهش یافت. همچنین برای انرژی حاصل از خورشید نیز ۲ سناریو تولید شده است. باید توجه نمود که تعداد کل سناریوها برابر حاصل ضرب تعداد سناریوها یعنی $2 \times 100 \times 10 \times 250 = 50000$ سناریو است. همچنین احتمال هر سناریو برابر با حاصل ضرب احتمال سناریوهای کاهش یافته قیمت در احتمال سناریوهای باد و خورشید است و مجموع آن برابر با یک خواهد بود. علاوه بر آن، برای حساسیت بار در کوتاه‌مدت طبق مقاله [۳۹] حساسیت از -0.3 تا -0.1 در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج عددی و شبیه‌سازی

مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دوسطی مربوط به خرده‌فروش با استفاده از حل‌کننده CPLEX 12 و در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است. سطح اطمینان منظور شده در مدل ارزش در معرض ریسک مشروط (CVaR) $\alpha = 0.95$ در نظر گرفته شده و مسئله برای پارامترهای مختلف ریسک (β) حل گردیده است.

شکل ۵ نشان‌دهنده اثر حساسیت تقاضا بر روی بار مصرف‌کننده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود؛ با افزایش قیمت، میزان تقاضای انرژی کاهش یافته و با کاهش قیمت نیز تقاضای انرژی افزایش می‌یابد. شکل مذکور برای دو ضریب حساسیت تقاضای صفر و -0.3 و یک سناریوی قیمت نشان داده شده است.

جدول ۳ نشان‌دهنده میزان انرژی خریداری‌شده توسط خرده‌فروش در ارتباط با قراردادهای پیش‌خرید و برای ضرایب بی‌زاری از ریسک (β) و ضرایب حساسیت تقاضای (E) مختلف است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بی‌زاری از ریسک (افزایش β) میزان خرید انرژی مصرف‌کنندگان از قراردادهای پیش‌خرید افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش حساسیت تقاضا نیز میزان خرید انرژی از قراردادهای پیش‌فروش بیشتر می‌شود. این امر بیان‌کننده این حقیقت است که با افزایش هم‌زمان این دو ضریب، در واقع مصرف‌کنندگان و خرده‌فروش تمایل کمتری به تحمل سناریوهای پر ریسک در بازار داشته و سعی دارند با خرید و فروش انرژی تحت قراردادهای پیش‌فروش با قیمت ثابت، ریسک ناشی از خرید و فروش برق در بازار را به حداقل برسانند. از طرف دیگر، در این حالت با افزایش حجم قراردادهای پیش‌فروش، حجم خرید انرژی از بازارهای زمان‌واقعی کاهش می‌یابد.

شکل ۶ نشان‌دهنده سود مورد انتظار بر حسب CVaR برای ضرایب ریسک‌گریزی مختلف (β) و در ضرایب حساسیت تقاضای مختلف (E) است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش β و افزایش ریسک‌گریزی خرده‌فروش از میزان سود مورد انتظار کاسته می‌شود. شکل مذکور که نشان‌دهنده سود مورد انتظار در حساسیت‌های متفاوت نیز است بیان‌گر این حقیقت است که با افزایش حساسیت تقاضای مصرف‌کنندگان، سود خرده‌فروش نیز با افزایش روبرو می‌شود. دلیل این افزایش سود آن است که با افزایش حساسیت

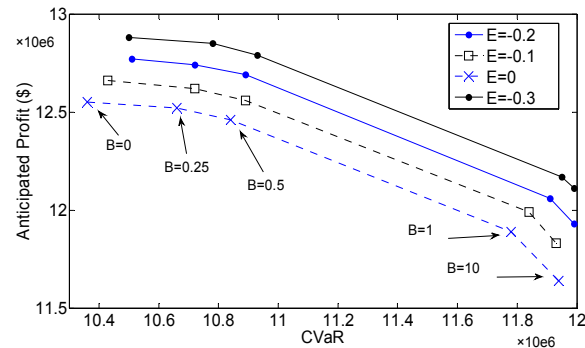
تهیه انرژی الکتریکی جهت فروش به مصرف‌کننده با سه عدم قطعیت، قیمت بازار لحظه‌ای، تولید انرژی باد و تولید انرژی خورشیدی روبرو است. استفاده از مدل ARIMA و سری‌های زمانی این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان عدم قطعیت‌های موجود در مسئله را با تولید سناریوهای متفاوت مدل نمود که از این دیدگاه برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت برق و انرژی خورشیدی استفاده شده است. علاوه بر آن، عدم قطعیت مرتبط با انرژی بادی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده است. پس از تولید سناریوهای لازم، تعداد سناریوها توسط روش فاصله احتمالی کانتروویچ کاهش پیدا نموده است. خرید انرژی توسط خرده‌فروش از منابع بادی و خورشیدی بوده و فروش انرژی الکتریکی به صورت قرارداد یک‌ماهه که تلفیقی از قیمت‌گذاری ثابت و زمان‌واقعی است، است. با استفاده از مدل ارائه‌شده نشان داده شد که با در نظر گرفتن افزایش ریسک، خرده‌فروش با کاهش سود خود به افزایش سهم قیمت‌گذاری زمان واقعی در قراردادها خود با مصرف‌کننده اقدام می‌نماید. مدل ارائه‌شده در این مسئله خرده‌فروش و مصرف‌کننده را قادر می‌سازد تا با شرکت در بازار و استفاده از قراردادهای مختلف میزان سود و ریسک خود را مدیریت کنند. هرچند این پژوهش سعی در ارائه روشی کامل در خصوص مباحث مرتبط با خرده‌فروشی در بازار برق دارد، اما مدل برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی که در این مقاله در نظر گرفته شد را می‌توان گسترش داد و برنامه‌ریزی تصادفی را چندمرحله‌ای در نظر گرفت که در آن تصمیمات مرتبط با خرید انرژی از بازار لحظه‌ای قبل از مشخص شدن قیمت اتخاذ شوند. همچنین می‌توان رقابت در بازار بین خرده‌فروش‌ها را با استفاده از تئوری بازی‌ها نیز در مسئله مدل نمود. علاوه بر آن، در نظر گرفتن بازاری متشکل از چندین خرده‌فروش نیز می‌تواند ایده مناسبی جهت انجام مطالعات آینده در این حوزه باشد.

پیوست

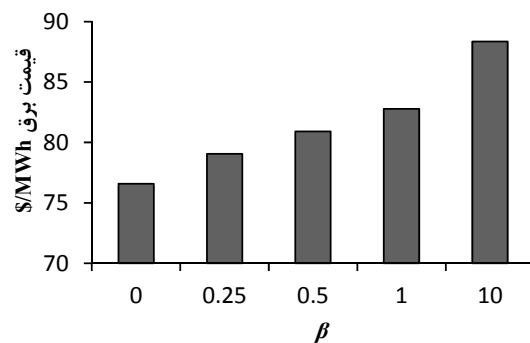
جدول واژگان تخصصی استفاده شده در مقاله به شرح زیر است:

مخفف واژه تخصصی	معادل واژه به انگلیسی	معادل واژه به فارسی
ARIMA	Auto regressive integrated moving average	آریمای
	Real time market	بازار زمان واقعی
CVaR	Conditional value at risk	ارزش در معرض ریسک مشروط
	Kantorovich distance	فاصله کانتروویچ
	Demand elasticity	کشسانی بار
SAS	Statistical analysis system	نرم‌افزار آنالیز آماری
PJM market	Pennsylvania-New Jersey-Maryland market	شبکه بهره‌برداری ناحیه‌ای ایالات متحده
	Weibull	تابع توزیع ویبول
	Monte Carlo	روش شبیه‌سازی مونت کارلو

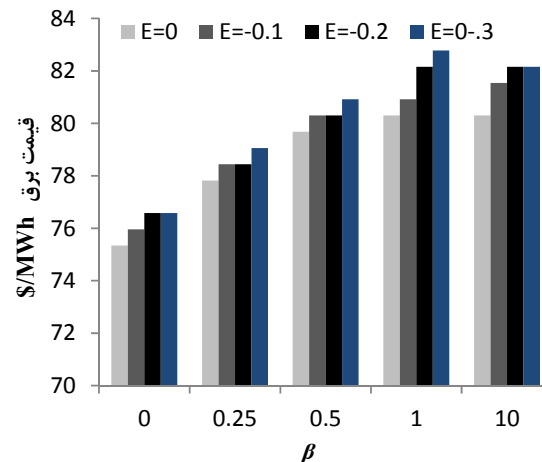
با افزایش β ریسک‌پذیری خرده‌فروش کاهش یافته و با افزایش قیمت، به سمت فروش بیشتر انرژی در قیمت زمان واقعی گام برمی‌دارد. از طرف دیگر با افزایش حساسیت ریسک خرده‌فروش کاهش پیدا می‌نماید (مشابه زمانی که β افزایش می‌یابد) و خرده‌فروش بیزار از ریسک با افزایش قیمت به سمت افزایش فروش انرژی در قیمت زمان واقعی حرکت می‌کند.



شکل ۶: سود مورد انتظار برحسب شاخص‌های مختلف ریسک



شکل ۷: قیمت فروش انرژی در حالت قیمت ثابت



شکل ۸: قیمت فروش برق در ضرایب حساسیت تقاضای مختلف

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله از روش برنامه‌ریزی تصادفی با محدودیت ریسک، با هدف حداکثرسازی سود خرده‌فروش استفاده شده است. خرده‌فروش برای

مراجعه

- [18] S.A. Gabriel, A.J. Conejo, M.A. Plazas, and S. Balakrishnan, "Optimal price and quantity determination for retail electric power contracts," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 21, no. 1, pp. 180-187, 2006.
- [19] I. Horowitz, and C.K. Woo, "Designing Pareto-superior demand-response rate options," *Energy (Oxford)*, vol. 31, no. 6-7, pp. 1040-1051, 2006.
- [20] J.M. Yusta, I.J. Ramirez-Rosado, J.A. Dominguez-Navarro, and J.M. Perez-Vidal, "Optimal electricity price calculation model for retailers in a deregulated market," *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, vol. 27, pp. 437-447, 2005.
- [21] S. Zhu, Y. Zhang, and A.A. Chowdhury, "Capacity credit of wind generation based on minimum resource adequacy procurement," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, pp. 730-735, 2012.
- [22] B. Kroposki, P.K. Sen, and K. Malmedal, "Selection of distribution feeders for implementing distributed generation and renewable energy applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2825-2834, 2013.
- [23] R. Rockafellar, and S. Uryasev, "Optimization of conditional value-at-risk," *Journal of Risk*, pp. 21-41, 2000.
- [24] R.T. Rockafellar, and S. Uryasev, "Conditional value-at-risk for general loss distributions," *Journal of Banking and Finance*, vol. 26, pp. 1443-1471, 2002.
- [25] S. Huang, and K.R. Shih, "Short-term load forecasting via ARMA model identification including non-Gaussian process considerations," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 18, pp. 673-679, 2003.
- [26] C. Chatfield, *The Analysis Of Time Series: An Introduction*, Chapman & Hall/CRC Publications, 2004.
- [27] G.E.P. Box, G.M. Jenkins, and G.C. Reinsel, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Wiley Publications, 1994.
- [28] P. Chen, T. Pedersen, B. Bak-Jensen, and Z. Chen, "ARIMA-based time series model of stochastic wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 667-676, 2010.
- [29] K. Turkman, M.G. Scotto, and Z.B. Patricia, *Non-Linear Time Series*, Springer Publications, 2014.
- [30] <http://www.sas.com>
- [31] M. Ortiz, J. Rios, and M. Acosta, "Wind generation and power system interaction analysis using probabilistic techniques," *8th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, pp. 12-14, 2008.
- [32] S.T. Rachev, *Probability Metrics and the Stability of Stochastic Model*, Wiley Publications, 1991.
- [33] J.M. Morales, M. Carrion, S. Pineda, and A.J. Conejo, "Scenario reduction for futures market trading in electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 878-888, 2009.
- [34] H. Heitsch, and W. Römisch, "Scenario reduction algorithms in stochastic programming," *Computational Optimization and Applications*, vol. 24, pp. 187-206, 2003.
- [35] A. Rosa, *Fundamental of Renewable Energy Processes*, Elsevier Publications, 2009.
- [36] R.H. Liang, and J.H. Liao, "A Fuzzy-Optimization Approach for Generation Scheduling With Wind and Solar Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1665-1674, 2007.
- [37] <http://www.pjm.com/>
- [38] <http://www.me.utexas.edu/~solarlab/tsrdb/index.html/>
- [39] R. Sioshansi, and W. Short, "Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 516-524, 2009.
- [1] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, Wiley Publications, 2002.
- [2] D.S. Kirschen, and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, Wiley Publications, 2004.
- [3] A. Mohsenian-Rad, and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, 2010.
- [4] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-Álvarez, J.L. Dominguez-García, and B. Tomoiagă, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets," *Applied Energy*, vol. 106, pp. 365-76, 2013.
- [5] M. Marzband, A. Sumper, J. Domínguez-García, and R. Gumara-Ferret, "Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 314-22, 2013.
- [6] M. Marzband, M. Ghadimi, A. Sumper, and J. Domínguez-García, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode," *Applied Energy*, vol. 128, pp. 164-74, 2014.
- [7] M. Shafie-Khah, and J.P.S. Catalao, "A stochastic multi-layer agent-based model to study electricity market participants behavior," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 30, pp. 867-881, 2015.
- [8] S. Kazempour, A.J. Conejo, and C. Ruiz, "Strategic bidding for a large consumer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 848-856, 2015.
- [9] D.S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 18, pp. 520-527, 2003.
- [10] Q. Zhang, and X. Wang, "Hedge contract characterization and risk-constrained electricity procurement," *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1547-1558, 2009.
- [11] J.R. Birge, and F. Louveaux, *Introduction to Stochastic Programming*, Springer Publications, 1997.
- [12] A. Hatami, H. Seifi, and M. Sheik-el-Eslami, "A stochastic-based decision-making framework for an electricity retailer: time-of-use pricing and electricity portfolio optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 1808-1816, 2009.
- [13] C.K. Woo, R.I. Karimov, and I. Horowitz, "Managing electricity procurement cost and risk by a local distribution company," *Energy Policy*, vol. 32, pp. 635-645, 2004.
- [14] C.K. Woo, "Efficient frontiers for electricity procurement by an LDC with multiple purchase options," *Omega*, vol. 34, no. 1, pp. 70-80, 2006.
- [15] M. Carrión, A.J. Conejo, and J.M. Arroyo, "Forward contracting and selling price determination for a retailer," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 22, pp. 2105-2114, 2007.
- [16] M.H. Albadi, and E.F. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, pp. 1989-1996, 2008.
- [17] A.R. Hatami, H. Seifi, and M.K. Sheikh-El-Eslami, "Optimal selling price and energy procurement strategies for a retailer in an electricity market," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 246-254, 2009.

زیرنویس‌ها

- | | |
|--|--|
| ⁹ Risk-neutral | ¹ Auto regressive integrated moving average |
| ¹⁰ Risk-averse | ² Day-ahead market |
| ¹¹ Weibull | ³ Real time |
| ¹² Maximizing likelihood | ⁴ Smart grid |
| ¹³ Unconditional least square | ⁵ Conditional value at risk |
| ¹⁴ Conditional least square | ⁶ Kantorovich distance |
| ¹⁵ Statistical analysis system | ⁷ Block and index pricing mechanism |
| ¹⁶ Pennsylvania-New Jersey-Maryland | ⁸ Risk aversion factor |