-- Iranian Journal of Economic Research----------
Volume 28, Issue 97, Winter 2024, 191-238
ijer.atu.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22054/ijer.2022.68510.1113

ATU PRESS

Original Research Received: 16/6/2022 Revised: 3/9/2022 Accepted: 23/10/2022 ISSN: 1726-0728 eISSN:2476-6445

Simultaneous Bidding in Competitive Electricity and Energy Exchange Markets: The Case of a Thermal Power Station Based on Net Profit Value

Mehrnoosh Khaji — Ph.D. Student in Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Maghsoud Amiri * — Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Mohammad Taghi Taghavifard — Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Abstract

The present study aimed to develop a model for determining an optimal bidding strategy for electricity producers, including the recommended selling price and the amount of electricity to be offered for participation in both the competitive electricity market and the energy exchange market. Hourly bids are suggested for the electricity market, while a monthly package, comprising peak load, medium load, low load, and base load, is proposed for the exchange market. By modeling a self-scheduling problem, the study aimed to develop optimal power production plans that maximize net profit over a one-month period. The research approach involved mathematical modeling using mixed-integer non-linear programming, which was performed in Lingo software and then validated in terms of effectiveness through an application to the case of a thermal power station. Relying on fuzzy necessity, credibility, and possibility, the research presented a robust model against the uncertainty of price with an adjustable level of

∗ Corresponding Author: amiri@atu.ac.ir
How to Cite: Khaji, M., Amiri, M., Taghavifard, M. T. (2024). Simultaneous Bidding in Competitive Electricity and Energy Exchange Markets: The Case of a Thermal Power Station Based on Net Profit Value. *Iranian Journal of Economic Research*, *28* (97), 191-238.

robustness. Sensitivity analysis and the simulation approach were used to validate the performance of the model, demonstrating that the optimal response from the robust model, compared to the deterministic model, can maintain its efficiency in the face of fluctuations in the parameter of price uncertainty. Furthermore, the findings indicated that offering a base load package on the energy exchange market can yield a higher net profit value for the producer. Finally, the fuzzy interest rate and decision-making based on fuzzy goals were also examined.

1. Introduction

In recent years, researchers have directed their attention toward robust optimization in markets with uniform pricing systems. However, the application of robust methods in pay-as-bid systems remains unexplored. Therefore, a notable research gap exists, specifically in the robust optimization of pay-as-bid systems in the Iranian electricity market. Moreover, with the establishment of the energy exchange market in Iran, the simultaneous bidding, in both the energy exchange market and the day-ahead electricity market, has surfaced as a significant gap in existing research literature. In this respect, the present study contributes to relevant research by addressing existing gaps while considering the specific needs of the Iranian electricity market. The study tried to model the self-scheduling problem of an electricity producer to determine an optimal and robust strategy. Employing fuzzy theory to address the uncertainty of the market clearing price parameter, the model can protect the producer from electricity price uncertainty in the market, as well as foster a more secure environment for participation in competitive electricity markets.

2. Materials and Methods

As an applied and developmental research, the present study aimed to develop robust optimization models for bidding in the electricity market. This descriptive¬analytical study examined, described, and explained uncertainty in decision-making, employing a fuzzy approach to tackle uncertainty. The research involved the mathematical modeling of the problem of determining the bidding strategy for electricity producers, presented as mixed-integer programming. First, the variables and parameters of the modeling process were introduced, followed by presenting the problem formulation. Subsequently, the implementation and its procedural steps were performed in the Lingo software to validate the effectiveness of the proposed model by applying it to the case of a thermal power station.

3.Results and Discussion

The research proposed a model designed to address bidding challenges encountered by a price-taker electricity producer. The model centers on optimizing simultaneous monthly bidding in both the day-ahead electricity market and the energy exchange market. The objective is to optimally allocate the producer«s capacity between these two markets to maximize profit. To handle the uncertainty of electricity prices, a robust method is employed, necessitating estimates of the next day«s market price and the energy exchange price for the upcoming month. The proposed model underwent testing across various modes, including base load, off-peak load, medium load, and peak load packages. The results revealed that the producer«s profit is maximized when offering the base load package to the energy exchange market, followed by the medium load package. Peak and off-peak packages ranked third with equal values. Therefore, it is recommended for producers seeking participation in the energy exchange market to consider offering a base load package.

4. Conclusion

The present research employed a robust fuzzy technique to deal with the volatility of electricity market prices, allowing decision-makers to make firm decisions with an adjustable level of robustness. The results of the proposed method indicated that the possibility criterion adopts an optimistic stance towards the settlement price, thus suggesting prices at higher levels than the necessity and credibility criteria. This criterion is suitable only when market signals indicate a potential price increase. In contrast, the necessity criterion adopts a cautious approach, showing robustness even at low confidence levels. This approach is well-suited for risk-averse decision-makers and scenarios where market signals point towards a potential price reduction.

Keywords: Bidding Strategy, Self-Scheduling Problem, Electricity Market, Energy Exchange Market, Uncertainty, Theory of Fuzzy Possibility and Necessity

JEL Classification: C61, D40.

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱

ISSN:۱۷۲۶-۰۷۲۸

eISSN:۲۴۷۶-۶۴۴۵

-- پژوهش‌های اقتصادی ایران ---------

دوره ۲۸، شماره ۹۷، زمستان ۱۴۰۲، ۱۹۱-۲۳۸

ijer.atu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22054/ijer.2022.68510.1113

پیشنهاددهی همزمان در بازارهای رقابتی برق و بورس انرژی برای یک نیروگاه حرارتی براساس ارزش فعلی خالص سود

مهرنوش خاجی دانشجوی دکتری رشته مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

مقصود امیری* استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

محمدتقی تقوی‌فرد استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

چکیده

هدف این پژوهش، ارائه مدلی به منظور تعیین استراتژی بهینه پیشنهاددهی از سوی تولیدکننده انرژی الکتریکی، شامل قیمت پیشنهادی فروش و مقدار انرژی الکتریکی قابل عرضه جهت شرکت در بازار رقابتی برق و بازار بورس انرژی است. پیشنهاد فروش به بازار بورس به‌صورت ارائه بسته‌های یک ماهه کم‌باری، میان‌باری، اوج بار و بار پایه است. با بهینه‌سازی مدل ارائه شده، مقدار بهینه تولید انرژی الکتریکی جهت شرکت همزمان در بازارهای برق و بورس و تخصیص بهینه ظرفیت تولید بین این دو بازار در راستای بیشینه‌سازی ارزش فعلی سود و با توجه به عدم قطعیت قیمت بازار، برای بازه‌ای یک ماهه محاسبه شده است. رویکرد پژوهش، مدل‌سازی ریاضی است که به‌صورت برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح، ارائه و در نرم‌افزار لینگو اجرا و جهت بررسی کارایی، بر روی یک نیروگاه برق حرارتی پیاده‌سازی شده است. در این پژوهش با استفاده از معیارهای امکان، الزام و اعتبار فازی، مدلی استوار در برابر عدم قطعیت قیمت با قابلیت تنظیم سطح اطمینان ارائه شده است. اعتبارسنجی و عملکرد مدل با رویکردهای تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی، مورد تأیید قرار گرفت و نشان داده شد که پاسخ بهینه حاصل از مدل استوار نسبت به مدل قطعی در مواجهه با نوسانات پارامتر عدم قطعیت قیمت می‌تواند بهینگی خود را حفظ نماید. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد که ارائه بسته بار پایه در بورس انرژی، بیشترین سود را عاید تولیدکننده خواهد کرد. در انتها نیز نرخ بهره فازی و نحوه تصمیم‌گیری براساس آرمان فازی مورد بررسی قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: استراتژی پیشنهاددهی، مسئله خودبرنامه‌ریزی، بازار انرژی الکتریکی، بازار بورس انرژی، عدم قطعیت، امکان و الزام فازی

طبقه‌بندی JEL: C61 ،D40

* نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه ۸۰ میلادی در اکثر کشورهای توسعه‌یافته، به منظور ایجاد زمینه رقابت منصفانه و بهبود کارایی اقتصادی، ساختار نوینی در صنعت برق شکل گرفت که تجدید ساختار[1] در صنعت برق نامیده شد. هدف این تجدید ساختار، ایجاد بازارهای برق به‌صورت عمده‌فروشی و خرده‌فروشی به منظور خرید و فروش آزاد برق بین عرضه‌کنندگان و مصرف‌کنندگان بود. تجدید ساختار سبب شد که ساختار صنعت برق از حالت انحصاری به حالت رقابتی تبدیل شود. این امر موجب شکل‌گیری مسائل جدیدی در این حوزه شده، به‌طوری‌که مسائل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی در این صنعت را به‌طورکامل دگرگون کرده است (رحیمی، ۱۳۹۵). در محیط بازار رقابتی، فروشندگان برق برای تعیین یک استراتژی پیشنهاددهی[2] باید علاوه بر سوددهی بالا به استواری[3] آن نیز توجه کنند. ارائه یک استراتژی استوار از آن‌ها در برابر عدم قطعیت قیمت محافظت می‌کند؛ بدین صورت که اگر مقدار واقعی قیمت، متفاوت با مقدار پیش‌بینی شده آن محقق شود، استراتژی انتخابی همچنان مطلوب باقی بماند. ازاین‌رو مسئله پیشنهاددهی تولیدکننده در بازار برق از این جهت که هم باید محدودیت‌های فنی واحد تولیدی و هم عدم قطعیت قیمت بازار را مورد توجه قرار دهد، یک مسئله سخت و پیچیده خواهد بود. بنابراین، تولیدکننده باید روش‌های بهینه‌سازی را در پیش بگیرد که این پیچیدگی‌ها را مورد توجه قرار دهد (وطنی و همکاران، ۲۰۱۸).

بهینه‌سازی استوار در بازار با نظام پرداخت یکسان[4]، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است ولی در نظام پرداخت براساس پیشنهاد[5]، تاکنون از روش‌های استوار استفاده نشده است. ازاین‌رو یکی از خلأهای تحقیقاتی در این حوزه که باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد، بهینه‌سازی استوار در نظام پرداخت براساس پیشنهاد است که در بازار برق ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، پس از شکل‌گیری بورس انرژی در ایران و فراهم شدن امکان معاملات برق در بورس، پیشنهاددهی همزمان در بورس انرژی و بازار روز بعد برق، موضوع بسیار مهم دیگری است که در ادبیات تحقیق مغفول

1. Restructuring
2. Bidding Strategy
3. Robustness
4. Uniform Pricing or Pay as Market Clearing Price
5. Pay as Bid

مانده است. در این راستا، مقاله حاضر با هدف غنی‌سازی پژوهش‌های مرتبط با این مسئله و پر نمودن بخشی از خلأهای پژوهش‌های موجود و متناسب با نیازهای بازار برق ایران ارائه شده است. در این پژوهش، مسئله خودبرنامه‌ریزی[1] تولیدکننده برق جهت تعیین استراتژی بهینه و استوار برای اولین بار با تکیه بر تئوری فازی و مفاهیم الزام[2] و امکان[3] جهت مواجهه با عدم قطعیت پارامتر قیمت تسویه بازار[4] مدل‌سازی شده است. ازاین‌رو در این پژوهش به دنبال ارائه روشی هستیم که بتواند در جهت بهبود رفتار تولیدکنندگان و افزایش کارایی بازار رقابتی برق در کشور راهگشا باشد. هدف از ارائه این مدل، تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده در بازار برق و بورس انرژی است که شامل ارائه قیمت و برنامه‌ریزی تولید بهینه می‌باشد، به‌طوری‌که این استراتژی از تولیدکننده در برابر عدم قطعیت قیمت برق در بازار محافظت نموده و محیط ایمن‌تری را برای شرکت در بازارهای رقابتی برق فراهم آورد.

در ادامه، این مقاله شامل بخش‌های مرور ادبیات، تبیین مدل پیشنهادی، حل مثال عددی، بحث و نتیجه‌گیری است. در بخش مرور ادبیات، ابتدا به بررسی ابعاد مختلف مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی در بازار برق و بورس انرژی پرداخته شده و در ادامه مهم‌ترین فعالیت‌های پژوهشی صورت‌گرفته مرتبط با مسئله مورد بررسی، مرور شده است. سپس در بخش تبیین به تشریح مدل پیشنهادی پرداخته شده که شامل ارائه مدلی برای حل مسأله خودبرنامه‌ریزی جهت محاسبه مقادیر بهینه تولید انرژی الکتریکی در هر ساعت برای ارائه به بازارهای برق و بورس انرژی است. در بخش مثال عددی، نمونه‌ای از مسئله با استفاده از داده‌های واقعی بازار برق ایران مدل‌سازی شده و با استفاده از نرم‌افزار لینگو[5] ورژن ۱۸ پیاده‌سازی شده است. در نهایت، تشریح یافته‌های تحقیق و بحث پیرامون آن در بخش بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Self Scheduling
2. Necessity
3. Possibility
4. Market Clearing Price
5. Lingo

۲. چارچوب نظری پژوهش

در این بخش ابتدا با مرور ادبیات به معرفی مفاهیم اصلی موضوع پژوهش پرداخته می‌شود و سپس با مرور پیشینه پژوهش، به بررسی و تحلیل تحقیقات مرتبط پرداخته و مسائل مطرح شده در این حوزه از تحقیق را از ابعاد مختلف همراه با روش‌های پیشنهادی برای حل این مسائل بررسی می‌کنیم. ازاین‌رو ابتدا با توجه به اینکه تحقیق پیش‌رو در فضای بازار رقابتی برق تعریف شده است، ابتدا با تبیین تجدید ساختار در صنعت برق به معرفی این بازار و همچنین قوانین و مقررات آن و مفاهیم حراج در بازار برق، قیمت تسویه بازار و نظام‌های پرداخت می‌پردازیم و زمینه را برای معرفی مسئله خودبرنامه‌ریزی و استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده انرژی الکتریکی فراهم می‌کنیم. برخی از مفاهیم به‌کاربرده شده در مقاله در بخش پیوست ارائه شده است.

با تجدید ساختار در صنعت برق و ایجاد بازار رقابتی، قیمت برق با تعامل بین عرضه‌کنندگان و تقاضاکنندگان بازار تعیین می‌شود. ساختار بازار برق در ایران، مدل آژانس خرید و حراج یک‌طرفه است و همه شرکت‌کنندگان، اعم از فروشندگان و خریداران موظف به خرید و فروش از طریق بازار برق هستند. لازم است فروشندگان سه روز قبل از اجرای بازار، قیمت‌ها و مقادیر انرژی الکتریکی پیشنهادی خود را برای هر ساعت به‌صورت جداگانه به بهره‌بردار بازار ارائه دهند. با توجه به مکانیزم حراج یک‌طرفه در بازار ایران، خریداران برق فقط میزان تقاضای خود را اعلام می‌دارند و پیشنهاد قیمت نمی‌دهند. در نهایت بهره‌بردار سیستم با تسویه عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی، قیمت نهایی بازار که قیمت تسویه نامیده می‌شود را تعیین می‌کند. در بازارهای با مکانیسم پرداخت یکسان، به همه برندگان در حراج بدون در نظر گرفتن قیمت پیشنهادی آن‌ها، قیمت تسویه بازار پرداخت می‌شود اما در بازارهای با مکانیسم پرداخت، براساس پیشنهاد به برندگان حراج، همان قیمت پیشنهادی خودشان پرداخت می‌شود (مشیری و همکاران، ۱۳۹۸).

در بازار برق، تولیدکنندگان برق باید با ارزیابی توانمندی‌های رقابتی خود و سایر عرضه‌کنندگان و همچنین بررسی محیط، اقدام به برنامه‌ریزی برای شرکت در بازار برق نمایند و با شناخت دقیق بازار، برای کلیه ساعات روز بعد قیمت پیشنهادی فروش انرژی تولیدی خود را ارائه دهند. مهم‌ترین مسئله پیش روی تولیدکنندگان برق تعیین استراتژی

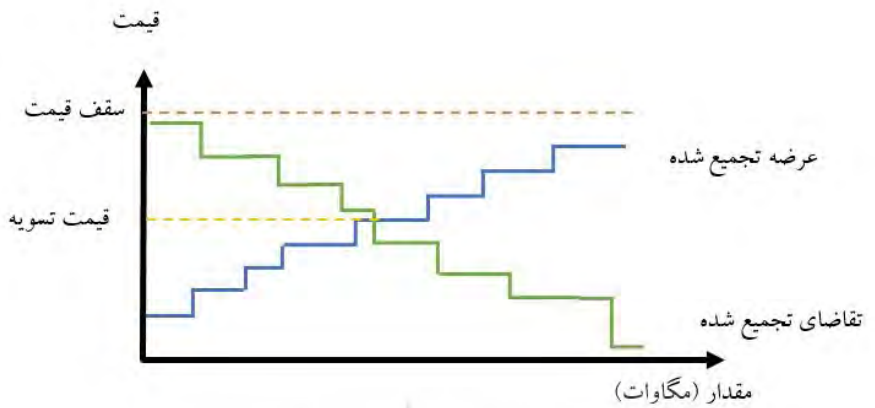
قیمت‌دهی بهینه است زیرا در این بازار رقابتی، پیشنهادهای بیش از حد گران‌قیمت موجب عدم موفقیت در بازار و پیشنهادهای بیش از حد ارزان‌قیمت منجر به سود از دست‌رفته می‌گردد (آیین، ۱۳۹۳).

گام‌های شرکت در بازار روز بعد و تسویه آن به شرح زیر است:

- تولیدکنندگان برق برای شرکت در بازار برق پیشنهاد فروش و عرضه خود را برای مقادیر پیشنهادی انرژی الکتریکی و با قیمت‌های پیشنهادی برای هر یک از ۲۴ بازه (یا ۴۸ بازه) به بهره‌بردار ارائه می‌دهند. بهره‌بردار پیشنهادهای رسیده از تولیدکنندگان را براساس قیمت به‌صورت صعودی مرتب کرده و یک منحنی عرضه به‌دست می‌آورد که قیمت پیشنهادی بازیگران را برحسب مقدار تجمعی پیشنهاد نشان می‌دهد. این منحنی در شکل ۱ به‌صورت پلکانی صعودی و به رنگ آبی دیده می‌شود. (جلیلوندنژاد، ۱۳۹۵)
- خریداران و خرده‌فروشان نیز پیشنهادهای خرید خود شامل مقدار و قیمت را به بهره‌بردار ارائه می‌دهند. این منحنی در شکل ۱ به‌صورت پلکانی نزولی و به رنگ سبز دیده می‌شود. بهره‌بردار با مرتب کردن آن‌ها به ترتیب کاهش قیمت، منحنی تقاضای بازار را استخراج می‌کند.

قیمت تسویه بازار از محل برخورد منحنی‌های عرضه و تقاضای بازار که نقطه تعادل بازار را نشان می‌دهد، به‌دست می‌آید. این نقطه در شکل ۱ دیده می‌شود. در سمت عرضه، همه پیشنهادهای فروش که قیمت شان کمتر از قیمت تسویه است، پذیرفته می‌شوند و شرکت‌های تولید براساس مقدار پیشنهادهای پذیرفته شده‌شان در هر بازه زمانی اقدام به تولید می‌کنند. به‌طور مشابه، در سمت تقاضا همه پیشنهادهای خرید که قیمت‌شان بیش از قیمت تسویه است نیز پذیرفته شده و مقدار انرژی مجاز برای برداشت از سیستم به خریداران اطلاع داده می‌شود.

شکل ۱. فرایند تسویه بازار روز بعد در بازار دوطرفه



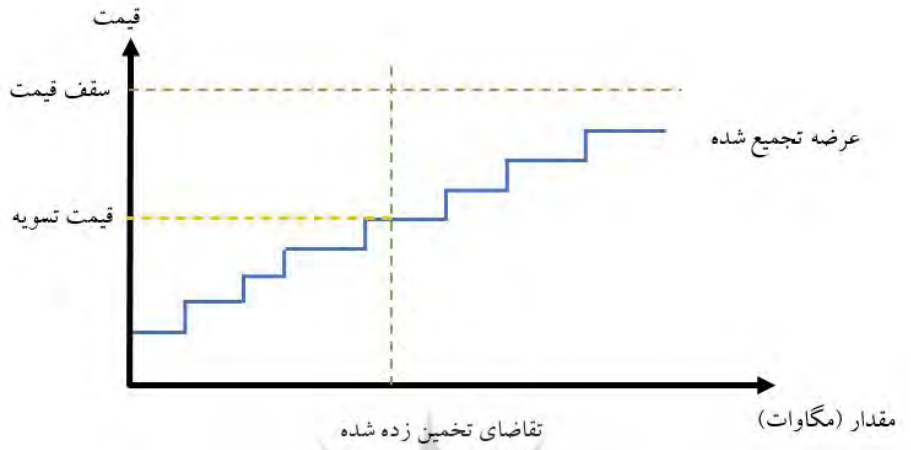
مأخذ: جلیلوند نژاد

روش فوق مربوط به مناقصه‌های دوطرفه[1] است که پیشنهاددهی توسط فروشندگان و خریداران به‌طور همزمان انجام می‌شود اما در بسیاری موارد، مناقصه به‌صورت یک‌طرفه انجام می‌شود که دلیلش، برق کالایی با کشش قیمتی بسیار پایین است؛ به این معنی که مصرف آن انعطاف‌پذیری بسیار کمی نسبت به قیمت دارد. ازاین‌رو در برخی بازارها منحنی تقاضا و پیشنهادهای سمت تقاضا وجود ندارد و بهره‌بردار بازار برای انتخاب پیشنهادهای فروش از مقدار بار پیش‌بینی شده تقاضا برای تقاطع با منحنی عرضه و تشکیل نقطه تعادل استفاده می‌کند. به بیان دیگر، منحنی تقاضا خطی عمودی در مقدار بار تخمین زده شده است. این نوع مناقصه، مناقصه یک‌طرفه نامیده می‌شود و در شکل ۲ نمایش داده شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Double-Side

شکل ۲. فرایند تسویه بازار روز بعد در بازار یک‌طرفه



مأخذ: جلیلوند نژاد

قیمت تسویه بازار، بیانگر قیمت یک مگاوات ساعت اضافی انرژی الکتریکی است؛ به همین دلیل قیمت حدی سیستم[1] نیز نامیده می‌شود.

۲-۱. مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی

مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی شامل مراحل: الف- انتخاب بازارهای انرژی الکتریکی مورد نظر برای عرضه انرژی الکتریکی، ب- تخمین قیمت تسویه بازار و ج- مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی و استراتژی پیشنهاددهی است.

الف- بازارهای انرژی الکتریکی

بازارهای برق براساس تبادلات انرژی می‌تواند به سه دسته تقسیم شود که عبارتند از: بازار مبتنی بر سیستم حوضچه[2]، بازار مبتنی بر تبادلات دوجانبه[3] و بورس انرژی.

بازار مبتنی بر سیستم حوضچه: حوضچه بازاری است که در آن یک نهاد دولتی یا نیمه‌دولتی از طرف تقاضاکنندگان برق به خرید از بازار می‌پردازد. در بازار مبتنی بر حوضچه

1. System Marginal Price
2. Pool Based Market
3. Bilateral Contract

تنها خریدار بازار با دریافت و بررسی پیشنهادهای قیمت فروشندگان و با شروع از پایین‌ترین قیمت پیشنهادی، انرژی الکتریکی از فروشندگان خریداری می‌کند.

بازار مبتنی بر تبادلات دوجانبه: در این بازار، هر یک از خریداران و فروشندگان می‌توانند به‌صورت خصوصی با یکدیگر وارد مذاکره شده و بر سر قیمت با هم به توافق برسند.

مبادلات در بورس: بورس نوعی بازار است که در آن یک نهاد تجاری از طرف دولت یا از طرف خریداران و فروشندگان به منظور مدیریت کردن مبادلات بورس تشکیل می‌شود که رفتار آن مانند یک بازار سهام است. عرضه‌کنندگان پیشنهادهای خود و تقاضاکنندگان نیز نیازهای خود را به نهاد برگزارکننده بورس ارائه می‌دهند. قیمت تمامی مبادلات توان الکتریکی که در آن لحظه انجام می‌شود در اختیار تمامی شرکت‌کنندگان بورس قرار داده می‌شود.

تضادی میان بهره‌گیری از این سه نوع بازار وجود ندارد و حضور همزمان در این سه نوع بازار بلامانع و حتی معمول است.

۲-۲. سازوکار بورس انرژی در ایران

بورس ابزاری است برای رقابت شفاف و قانونی عرضه و تقاضا در نظام اقتصادی آزاد که برای بازیگران بازار مزایای متعددی دارد که می‌توان به مواردی از جمله تعیین قیمت‌ها به‌صورت شفاف و امکان اطلاع همه بازیگران از فرایند کشف قیمت، اطمینان از انجام تعهدات و امنیت در معاملات، تأمین سریع مالی، مدیریت و کنترل ریسک اشاره کرد (راعی و کرمی، ۱۳۹۳). بعد از شکل‌گیری بازار برق در ایران، اقدام دیگر برای ایجاد رقابت بیشتر در این صنعت، راه‌اندازی بورس انرژی در سال ۱۳۹۲ با محوریت معاملات برق بود. راه‌اندازی بورس انرژی ایران متناسب با استانداردهای جهانی در جهت کاستن از میزان معاملات روزانه در بازار برق، همواره برای صنعت برق اهمیت فراوانی داشته است؛ زیرا یکی از مسائلی که در بازار برق ایران وجود دارد، پرداخت‌های معاملات بازار روز بعد برق به نیروگاه‌هاست که بیش از یک سال به طول می‌انجامد. از طرف دیگر، به علت تفاوت زیاد بین قیمت تمام‌شده انرژی الکتریکی و بهای فروش آن در بازار روز بعد برق، امکان پرداخت هزینه تولید به نیروگاه‌ها در قالب پیشنهادهای پذیرفته شده میسر نمی‌شود و به این ترتیب از

توان مالی صنعت برق به‌شدت کاسته می‌شود (رجبی، ۱۳۹۸). ازاین‌رو نیروگاه‌ها تمایل دارند که بخشی از برق تولیدی خود را در بورس انرژی که از جریان مالی نقدی برخوردار است به فروش رسانند. در بورس انرژی معاملات برق به‌صورت قراردادهای سلف موازی استاندارد انجام می‌شود. وجه قرارداد سلف موازی استاندارد باید حین معامله و طبق زمان‌بندی مشخص شده در قرارداد پرداخت و دارایی پایه در رسید تحویل شود (راعی و کرمی، ۱۳۹۳). دوره معاملاتی این قرارداد از روز بازگشایی نماد تا سه روز قبل از آغاز دوره تحویل و سررسید آن سه روز پس از پایان دوره تحویل است. قراردادهای سلف برق رایج در ایران از نظر دوره تحویل شامل قراردادهای روزانه، هفتگی، ماهیانه و فصلی است (رجبی، ۱۳۹۸). قراردادهای سلف موازی استاندارد به‌سرعت در حال افزایش است و انتظار می‌رود بخش بزرگی از معاملات در آینده از این طریق انجام شده و تا حدود زیادی مشکلات نقدینگی صنعت برق ایران برطرف گردد (کیانوند و فرزین‌وش، ۱۳۹۴).

ب- تخمین قیمت تسویه بازار

پیش‌بینی قیمت برق از ابزارهای اساسی و حیاتی برای بازیگران بازار برق است که عدم دقت در آن می‌تواند منجر به کاهش سود و افزایش ریسک شود (Itaba, S. & Mori, H., 2017). یکی از ویژگی‌های بازار برق، نوسانات شدید قیمت برق است زیرا این قیمت تحت تأثیر عوامل متعدد و گوناگونی قرار دارد که پیش‌بینی دقیق و نقطه‌ای آن را بسیار پیچیده و دشوار کرده است. از این‌رو پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت برق به دلیل محدودیت‌های ذاتی بسیار بی‌ثبات و پرخطا بوده و به همین دلیل در سال‌های اخیر برای کاربردهایی مانند مدیریت ریسک و یا مسئله پیشنهاددهی روش پیش‌بینی بازه‌ای، مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است (نظری فارسانی، ۱۳۹۸). پیش‌بینی بازه‌ای می‌تواند در ارزیابی ریسک ناشی از تصمیمات اخذ شده توسط بازیگران بازار مورد استفاده قرار گیرد و امکان ارزیابی عدم قطعیت‌های آینده و همچنین امکان پیشنهاددهی مطلوب‌تر و با ریسک کم‌تر را فراهم کند.

ج- مسئله خودبرنامه‌ریزی و استراتژی پیشنهاددهی

برای شرکت در بازار برق، هر تولیدکننده باید با در نظر گرفتن سطح معینی از عدم قطعیت در پیش‌بینی‌هایش، اقدام به خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی خود با هدف بیشینه نمودن

سود کند. مهم‌ترین عاملی که باعث پیچیده شدن مسئله خودبرنامه‌ریزی می‌شود، وجود عدم قطعیت در داده‌ها به‌ویژه قیمت‌های روز بعد است (جلیلوندنژاد ، ۱۳۹۵). عامل دیگری که سبب پیچیده شدن مسئله خودبرنامه‌ریزی می‌شود، محدودیت‌های فنی واحدهای تولیدی اعم از حداکثر و حداقل ظرفیت تولید هر واحد و زمان‌های خاموشی و فعالیت آنها و نرخ افزایش و کاهش تولید در هر ساعت است. در نهایت حل مسئله خودبرنامه‌ریزی برای تولید استراتژی پیشنهاددهی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. پیشینه تجربی پژوهش

با توجه به مفاهیمی که در بخش قبل بیان شد، در ادامه به بررسی مهم‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته از سوی محققین مختلف پرداخته شده است که به دو روش کلی برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار انجام گرفته است.

یزدانی‌نژاد و امجدی (۲۰۱۷) در تحقیقی مسئله خودبرنامه‌ریزی را با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی سناریومحور با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و شدت وزش باد در توربین‌های بادی برای تولیدکننده برق جهت شرکت در بازار روز بعد مورد بررسی قرار داده‌اند و از معیار ارزش در معرض خطر شرطی[1] برای اندازه‌گیری ریسک مدل استفاده کرده‌اند.

خالویی و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی با رویکرد ترکیبی احتمالی- امکانی و با معیار ارزش در معرض خطر شرطی به حل مسئله خودبرنامه‌ریزی پرداخته‌اند و عدم قطعیت‌هایی مثل قیمت، شدت وزش باد، امکان خروج اضطراری و فراخوانی برای رزرو را با روش فازی و سناریوپردازی مدنظر قرار داده‌اند.

گروهی و انصاری (۲۰۲۰) برای مسئله خودبرنامه‌ریزی میان‌مدت با بهره‌گیری از روش‌های الگوریتم ژنتیک و تصمیم‌گیری فازی به توسعه مدلی دوهدفه با رویکرد تصادفی پرداخته‌اند که به‌طور همزمان بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه را با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های قیمت و شدت وزش باد مدنظر قرار می‌دهد.

1. CVaR

جیائو[1] و همکاران (۲۰۱۹) با ارائه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی با قابلیت تنظیم سطح ریسک در بازار روز بعد به بررسی عدم قطعیت قیمت و شدت وزش باد با رویکردی ریسک‌گریز پرداختند.

پرورش و محتوی‌پور (۱۳۹۵) مسئله استراتژی قیمت‌دهی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت با بهینه‌سازی تصادفی و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر سیاه‌چاله مورد بررسی قرار داده‌اند.

اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷) با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی و سناریوپردازی به مسئله خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده برق برای شرکت همزمان در بازار روز بعد انرژی الکتریکی و رزرو با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و خروج اضطراری ژنراتور پرداختند.

بهینه‌سازی استوار از رویکردهای جدید مواجهه با عدم قطعیت است که به‌تازگی در پژوهش‌های حوزه عدم قطعیت مورد توجه و اقبال قرار گرفته است. قابلیت استفاده از بهینه‌سازی استوار در شرایطی که اطلاعات توزیع آماری از عامل عدم قطعیت وجود ندارد، از مزیت‌های این روش محسوب می‌شود. بهینه‌سازی استوار همچنین به مدل‌هایی با پیچیدگی محاسباتی کمتر منجر می‌شود که سبب تسهیل دستیابی به جواب بهینه قطعی (در مقابل جواب‌های بهینه محلی) می‌شود.

صیاد نوجوان و همکاران[2] (۲۰۱۷) مسئله استراتژی پیشنهاددهی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و تقاضای انرژی الکتریکی با رویکرد استوار مورد بررسی قرار دادند.

نجفی و همکاران[3] (۲۰۲۲) با استفاده همزمان از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی و بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت قیمت و شدت وزش باد به حل مسئله خودبرنامه‌ریزی پرداختند.

جباری و همکاران[4] (۲۰۱۹) با روش بهینه‌سازی استوار و رویکردی ریسک‌گریز که دارای قابلیت تنظیم سطح استواری برای مواجهه با عدم قطعیت قیمت است، مسئله خودبرنامه‌ریزی را به‌گونه‌ای طراحی نمودند که عدم قطعیت را به‌صورت بازه‌ای مدنظر قرار می‌دهد.

---

1. Jiao, P. H., et al.
2. Nojavan, S., et al.
3. Najafi, A., et al.
4. Jabari, F., et al.

وطنی و همکاران[1] (۲۰۱۸) با بررسی رویکردهای استوار مسئله خودبرنامه‌ریزی، روش‌های بهینه‌سازی استوار موجود در ادبیات تحقیق شامل روش‌های استوار جعبه‌ای، بیضوی، چندوجهی، جعبه‌ای- بیضوی و جعبه‌ای- چندوجهی را به‌علاوه روش شکاف اطلاعات و برنامه‌ریزی تصادفی بازطراحی کرده و به مقایسه عملکرد آنها پرداختند. قابلیت تنظیم سطح استواری مطلوب از ویژگی روش‌های استوار است که در این تحقیق مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

یزدانی‌نژاد و همکاران[2] (۲۰۲۰) مسئله خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی مجازی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و با روشی استوار و با استفاده از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعات با دو رویکرد ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز مورد بررسی قرار دادند.

صیاد نوجوان و همکاران (۲۰۱۹) مسئله تأمین انرژی الکتریکی خرده‌فروش برق را با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت به‌صورت بازه‌ای با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای حالت‌های ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز بررسی کردند.

صیاد نوجوان و کاظم زارع[3] (۲۰۱۸) مسئله پیشنهاددهی قیمت در بازار روز بعد را برای خرده‌فروش برق با لحاظ عدم قطعیت قیمت با بهینه‌سازی بازه‌ای دوهدفه و رویکردی استوار مورد بررسی قرار دادند.

در تحقیق رجبی مشهدی و خراسانی[4] (۲۰۱۳) برای پیشنهاددهی توأم انرژی و رزرو در بازار، تابع چگالی احتمال توأم انرژی و رزرو قیمت‌های پیشنهادی پذیرفته شده حدی[5] مورد استفاده قرار گرفته که این توابع چگالی احتمال از داده‌های تاریخی مربوط به پذیرش و یا رد پیشنهادهای قیمت در گذشته، به‌دست می‌آید.

تحقیق مازی و همکاران[6] (۲۰۱۸) به پیشنهاددهی قیمت ¬ مقدار در بازارهای روز بعد و تعادل‌بخشی می‌پردازد.

1. Vatani, B., et al.
2. Yazdaninejad, M., et al.
3. Nojavan, S., & Zare, K.
4. Mashhadi, H. R., & Khorasani, J.
5. Energy & Reserve Marginal Accepted Bidding Prices
6. Mazzi, N., et al.

در تحقیقی که توسط خراسانی و همکاران[1] (۲۰۱۸) انجام شده، به مکانیسم پیشنهاددهی در حراج به شیوه پرداخت براساس پیشنهاد پرداخته شده است.

جلیلوندنژاد (۱۳۹۵) یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله خودبرنامه‌ریزی جهت شرکت در بازار روز بعد انرژی و ارائه پیشنهاد معرفی کردند. در این مدل پارامترهای عدم قطعیت که همان قیمت تسویه در هر یک از ۲۴ ساعت شبانه‌روز است، به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شده و همبستگی بین آنها لحاظ گردیده تا این امکان فراهم شود که با حذف نقاط ناهمبسته و به عبارتی نقاط ناممکن از مجموعه عدم قطعیت، بدون کاهش استواری، بهینگی افزایش یابد. خلاصه بررسی ادبیات موضوع در جدول ۱ به‌صورت مقایسه‌ای ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه پیشینه تجربی

مدل‌سازی عدم قطعیت	نوع بازار	نوع مسئله	معیار ریسک	رویکرد عدم قطعیت	پارامترهای عدم قطعیت	مرجع
	بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه	MILP	بدترین حالت	روباست+ تئوری شکاف اطلاعات	قیمت+ میزان باد	Najafi, et al., 2022
سناریو	بازار روز بعد	MILP	---	تصادفی	قیمت+ خروج اضطراری	Esmaeily, et al., 2017
بازه	بازار روز بعد	MINLP	بودجه عدم قطعیت	استوار	قیمت+ تقاضا+ توان تولیدی	Jabari, et al, 2019
بازه	بازار روز بعد	MILP+ MINLP	+بودجه عدم قطعیت CVaR	استوار/ تصادفی/ تئوری شکاف اطلاعاتی	قیمت	Vatani, et al., 2018

1. Khorasani, J., et al.

ادامه **جدول ۱.** خلاصه پیشینه تجربی

مدل‌سازی عدم قطعیت	نوع بازار	نوع مسئله	معیار ریسک	رویکرد عدم قطعیت	پارامترهای عدم قطعیت	مرجع
سناریو	بازار روز بعد	MILP	CVaR	تصادفی	قیمت+ تقاضا+ میزان باد	Yazdaninejad, Amjady, 2016
سناریو و اعداد فازی	بازار روز بعد	MINLP	CVaR	تصادفی+ امکانی	قیمت+میزان باد+ خروج اضطراری	Khaloie, ea al., 2019
سناریو	بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه	MILP	CVaR	تصادفی	قیمت+ میزان باد+ میزان سوخت	Goroohi, Ansari, 2020
بازه‌ای	بازار روز بعد	MINLP	رویکرد ریسک‌گریز و ریسک‌پذیر	تئوری شکاف اطلاعاتی	قیمت+ میزان باد+ تقاضا	Yazdaninejad, et al, 2019
بازه‌ای+ سناریو	بازار روز بعد	MILP	بودجه عدم قطعیت	استوار	قیمت+ تقاضا	Nojavan, et al., 2017
بازه‌ای	بازار روز بعد	MIP		بهینه‌سازی بازه‌ای	قیمت	Nojavan, Zare, 2018
بازه‌ای	بازار روز بعد و قراردادهای دوجانبه	MIP	بودجه عدم قطعیت	استوار	قیمت	Nojavan, et al., 2019
توزیع گاوسی	بازار روز بعد	الگوریتم ژنتیک	قابلیت تنظیم سطح ریسک	تصادفی	قیمت+ میزان باد	Jiao, et al., 2019
بازه‌ای	بازار روز بعد	MILP	روشی استوار	بهینه‌سازی بازه‌ای	قیمت	Nojavan, Zare, 2018
توزیع نرمال	بازار روز بعد	فرا ابتکاری	---	تصادفی	قیمت	Parvaresh, et al., 2017
بازه‌ای	بازار روز بعد	MILP	بودجه عدم قطعیت	استوار	قیمت	Jalilvandnejad, et al., 2016
فازی	بازار روز بعد و بورس	MILP	معیارهای امکان و الزام فازی	استوار	قیمت	مقاله حاضر

مأخذ: مرور ادبیات پژوهش توسط نویسندگان

همان‌طور که در جدول ۱ نمایش داده شده است، جایگاه مدل ارائه شده در این مقاله در مقایسه با سایر تحقیقات صورت گرفته، تبیین شده است.

٤. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش کمی پیش‌رو، پژوهشی کاربردی و توسعه‌ای است که به دنبال توسعه مدل‌های بهینه‌سازی استوار پیشنهاددهی در بازار برق است که در مواجهه با عدم قطعیت، رویکردی فازی دارد. با توجه به اینکه این پژوهش به دنبال بررسی عدم قطعیت و تشریح و تبیین آن در تصمیم‌گیری است، در زمره پژوهش‌های توصیفی – تحلیلی به شمار می‌رود و فاقد جامعه و نمونه آماری است. روش‌ها و ابزار گردآوری اطلاعات در این تحقیق شامل مطالعات کتابخانه‌ای، مراجعه به مقاله‌ها و منابع علمی در حوزه موضوع تحقیق و استفاده از گزارش‌ها و پایگاه‌های داده سازمان‌های ذی‌ربط است. رویکرد پژوهش، مدل‌سازی ریاضی مسئله تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده برق است که به‌صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه می‌شود. ابتدا متغیرها و پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی معرفی و سپس فرموله‌بندی مسئله ارائه می‌شود و در نهایت در نرم‌افزار لینگو پیاده‌سازی و مراحل آن جهت بررسی کارایی مدل پیشنهادی بر روی یک مورد مطالعاتی در یک نیروگاه برق حرارتی، انجام می‌گیرد.

٤-١. تبیین مدل پیشنهادی

در این بخش به تشریح مدل پیشنهادی برای مسئله پیشنهاددهی یک تولیدکننده قیمت‌پذیر برق پرداخته شده است که به برنامه‌ریزی میان‌مدت و بهینه‌سازی پیشنهاددهی در بازار روز بعد انرژی الکتریکی و به‌طور همزمان در بورس انرژی در بازه یک ماهه می‌پردازد تا با تخصیص بهینه ظرفیت تولیدی خود به هر یک از این دو بازار، به بیشینه‌سازی سود خود بپردازد. ازاین‌رو می‌بایست تخمینی از قیمت بازار روز بعد و قیمت در بورس انرژی برای یک بازه یک ماهه در دسترس باشد. پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته و به شیوه‌های متنوعی به پیش‌بینی قیمت برق پرداخته شده است. ازآنجاکه در پژوهش حاضر تمرکز بر پیش‌بینی قیمت نیست، از داده‌های قیمت سایت مدیریت شبکه که شامل متوسط قیمت در هر ساعت و بیشترین و کمترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار است، استفاده شده و بدین ترتیب بازه عدم قطعیت مورد نظر به‌صورت یک عدد فازی مثلثی شکل گرفته است.

در بازار برق با مکانیسم پرداخت براساس پیشنهاد، تولیدکننده برق برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی با تخمین قیمت تسویه بازار برای هر ساعت از هر روز ($\widetilde{p_{m_{d,t}}}$) باید ابتدا قیمت فروش خود را برای پیشنهاد به بازار ($p_{d,t}$) تعیین کند و سپس مقادیر انرژی الکتریکی تولیدی را در یک فرایند بهینه‌سازی مشخص کند. در این پژوهش قیمت تسویه ($\widetilde{p_{m_{d,t}}}$) به‌صورت یک عدد فازی مثلثی تعریف می‌شود، به‌طوری‌که مقدار تخمینی قیمت برق معادل σ_2 و حداکثر و حداقل مقدار ممکن آن به ترتیب معاد لσ_3 و σ_1 است (رابطه (۱)).

$$\widetilde{p_{m_{d,t}}} = (\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3) \quad (۱)$$

برای پیشنهاددهی در بازار روز بعد برای ساعت t از روز d، قیمت پیشنهادی ($p_{d,t}$) باید از قیمت تسویه بازار که به‌صورت $\widetilde{p_{m_{d,t}}}$ تخمین زده شده، کوچکتر باشد تا پیشنهاد قیمت $p_{d,t}$ در بازار برق پذیرفته شود. کوچکتر بودن قیمت پیشنهادی ($p_{d,t}$) از قیمت تسویه تخمینی ($\widetilde{p_{m_{d,t}}}$) یک نامساوی غیرقطعی تلقی می‌شود که می‌تواند در سطوح اطمینان مختلفی محقق شود. با استفاده از قواعد منطق فازی و با فرض اینکه بخواهیم این نامساوی غیرقطعی در سطح اطمینان π تحقق یابد، آن را به‌صورت رابطه (۲) نمایش می‌دهیم.

$$p_{d,t} \leq_{\pi} \widetilde{p_{m_{d,t}}} \quad (۲)$$

معیار امکان[1] فازی از جمله قواعدی است که برای فازی‌زدایی و قطعی‌سازی روابط فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابر قواعد منطق فازی، درجه تحقق رابطه فازی با معیار امکان و در سطح اطمینان π به شکل ر ابطه (۳) تعریف می‌شود (دهقان، ۱۳۹۹).

$$\text{pos}\{ p_{d,t} \leq \widetilde{p_{m_{d,t}}}\} \geq \pi \quad (۳)$$
$$0 \leq \pi \leq 1$$

معیار امکان به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\text{Pos}\{p_{d,t} \leq \widetilde{p_{m_{d,t}}}\} = \begin{cases} 1 & , \text{if } \rho_t \leq \sigma_2 \\ \frac{\sigma_3 - \rho_t}{\sigma_3 - \sigma_2} & , \text{if } \sigma_2 \leq \rho_t \leq \sigma_3 \\ 0 & , \text{if } \rho_t \geq \sigma_3 \end{cases} \quad (۴)$$

براساس رابطه (۴)، برای محاسبه قیمت پیشنهادی به بازار ($p_{d,t}$) مناسب در سطح اطمینان π از رابطه (۵) و (۶) استفاده می‌شود.

$$\text{possibility}\{ \widetilde{p_{m_{d,t}}} \geq p_{d,t} \} \geq \pi \Rightarrow \left(\frac{\sigma_3 - p_{d,t}}{\sigma_3 - \sigma_2}\right) \geq \pi \quad (۵)$$

1. Possibility

$$\Rightarrow p_{d,t} \leq \sigma_3 - \pi(\sigma_3 - \sigma_2) \qquad (۶)$$

به این ترتیب، نامساوی رابطه (۲) با استفاده از معیار امکان فازی به رابطه (۶) تبدیل می‌شود.

ازاین‌رو عبارت $\sigma_3 - \pi(\sigma_3 - \sigma_2)$ که یک حد بالا برای مقدار $p_{d,t}$ است را می‌توان به‌عنوان قیمت پیشنهادی به بازار برق در نظر گرفت. π سطح اطمینان میزان تحقق نامساوی فازی است که به انتخاب تولیدکننده تعیین می‌شود، به‌طوری‌که انتخاب مقادیر بزرگ آن همراه با ریسک کم و انتخاب مقادیر کوچک آن همراه با ریسک زیاد خواهد بود. تولیدکننده با پیشنهاد این مقدار به عنوان قیمت فروش نسبت به هر تحقق قیمت تسویه که بالاتر از این مقدار باشد، در سطح اطمینان π ایمن خواهد بود و انتظار دارد که پیشنهادش پذیرفته شود؛ ازاین‌رو سطح اطمینان π به نوعی سطح استواری جواب نسبت به عدم قطعیت است.

معیار امکان، نگاهی خوش‌بینانه به پارامتر عدم قطعیت دارد به‌طوری‌که تحقق پارامتر عدم قطعیت را در نیم‌دامنه راست آن و به ازای انحراف‌های مثبت تعیین می‌کند. برعکس معیار امکان، معیار الزام معیاری سخت‌گیرانه است و نگاهی بدبینانه به تحقق پارامتر عدم قطعیت دارد، به‌طوری‌که تحقق پارامتر عدم قطعیت را در نیم‌دامنه چپ آن و به ازای انحراف‌های منفی تعیین می‌کند. معیار اعتبار در حالتی بین این دو معیار قرار دارد و میانگین دو معیار امکان و الزام است. معیارهای الزام و اعتبار به‌صورت روابط (۷) و (۸) تعریف می‌شوند.

$$\text{Neccesity}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} 1 & ,\text{if } \rho_t \leq \sigma_1 \\ \frac{\sigma_2 - \rho_t}{\sigma_2 - \sigma_1} & ,\text{if } \sigma_1 \leq \rho_t \leq \sigma_2 \\ 0 & ,\text{if } \rho_t \geq \sigma_2 \end{cases} \qquad (۷)$$

$$\text{Credibility}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \left(\frac{1}{2}\right)\text{Neccesity}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} + \left(\frac{1}{2}\right)\text{possibility}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} \qquad (۸)$$

براساس رابطه (۶)، پیشنهاد قیمت براساس معیارهای الزام و اعتبار به‌صورت روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\text{neccesity}\{p_{d,t} \leq \widetilde{p_{m_{d,t}}}\} \geq \pi \Rightarrow p_{d,t} \leq \sigma_2 - \pi(\sigma_2 - \sigma_1) \qquad (۹)$$

$$\text{credibility}\{p_{d,t} \leq \widetilde{p_{m_{d,t}}}\} \geq \pi \Rightarrow p_{d,t} \leq \sigma_2 - (2\pi - 1)(\sigma_2 - \sigma_1) \qquad (۱۰)$$

پس از تعیین قیمت، با استفاده از مدل خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده، مقدار انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار تعیین و به بهره‌بردار بازار برای شرکت در بازار برق ارائه

می‌شود. بدین شکل که مقدار بهینه انرژی الکتریکی ($q_{d,t}$) قابل پیشنهاد به بازار به ازای قیمت پیشنهادی ($p_{d,t}$) مشخص می‌شود.

مشابه آنچه برای قیمت تسویه بازار روز بعد تعریف شد، پارامتر عدم قطعیت قیمت بورس هم به شکل عدد فازی $(\delta_1', \delta_2', \delta_3')$ نمایش داده می‌شود که این مقادیر عدم قطعیت باید برای ساعات کم‌باری، میان‌باری، اوج بار و بار پایه به‌صورت جداگانه تخمین زده شود. پیش‌بینی قیمت بورس برای زمان‌های کم‌باری روی ساعات ۲۴ تا ۷، برای زمان‌های میان‌باری روی ساعات ۸ تا ۱۹، برای زمان‌های اوج بار روی ساعات ۲۰ تا ۲۳ و برای بار پایه روی تمامی‌ساعات تخمین زده می‌شود. قیمت پیشنهادی به بورس براساس معیار امکان برابر با مقدار $\delta_3' - \pi(\delta_3' - \delta_2')$، براساس معیار الزام برابر با مقدار $\delta_2' - \pi(\delta_2' - \delta_1')$ و براساس معیار اعتبار برابر با مقدار $\delta_2' - (2\pi - 1)(\delta_2' - \delta_1')$ محاسبه می‌شود.

جدول ۲. اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها

اندیس‌ها			
t	ساعات شبانه روز	D	روزهای ماه
پارامترها			
u^0	وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد در ابتدای افق برنامه‌ریزی	c_t^{SU}	هزینه هر بار راه‌اندازی
M	عدد خیلی بزرگ	c_t^{SD}	هزینه هر بار توقف
$\rho_{m_{d,t}}$	قیمت تسویه بازار واقعی در ساعت t و روز d	Q^{min}	حداقل توان تولیدی که در صورت فعال بودن واحد نیروگاهی باید حتماً تولید شود
$\widetilde{p_{m_{d,t}}}$	قیمت تسویه بازار تخمینی در ساعت t و روز d	Q^{max}	حداکثر توان تولیدی
$cost_t^{SU}$	کل هزینه راه‌اندازی مجدد در ساعت tام	q_{max}	حداکثر انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار روز بعد در هر ساعت
$cost_t^{SD}$	کل هزینه توقف در ساعت tام	q_{max}'	حداکثر انرژی الکتریکی قابل عرضه به بورس انرژی در هر ساعت (سهمیه هر نیروگاه را مدیریت شبکه تعیین می‌کند)
ρ_{max}	سقف قیمت قابل ارائه به بازار روز بعد	R^{up}	حداکثر نرخ افزایش تولید (مگاوات/ ساعت)

ادامه **جدول ۲**. اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها

پارامترها			
$Q_{d,t}$	مجموع انرژی الکتریکی تولیدی ارائه شده به بازار روز بعد و بورس انرژی	R^{down}	حداکثر نرخ کاهش تولید (مگاوات/ ساعت)
c_0	هزینه ثابت هر ساعت کارکرد واحد	R^{SU}	نرخ افزایش تولید از حالت توقف (مگاوات/ ساعت)
C	متوسط هزینه سوخت به ازای تولید هر مگاوات انرژی الکتریکی (ریال/ مگاوات ساعت)	R^{SD}	نرخ کاهش تولید برای رسیدن به حالت توقف (مگاوات/ ساعت)
متغیرها			
$C(Q_{d,t})$	هزینه تولید در ساعت t و روز d به ازای تولید $Q_{d,t}$	$p_{d,t}$	قیمت پیشنهادی به بازار روز بعد برای روز d و ساعت t
$PV2^b$	ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش بار پایه در بورس انرژی	$\acute{p^b}$	قیمت پیشنهادی برای بار پایه در بورس انرژی
$PV2^l$	ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش در ساعات کم‌باری در بورس انرژی	$\acute{p^l}$	قیمت پیشنهادی برای ساعات کم‌باری در بورس انرژی
$PV2^m$	ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش در ساعات میان‌باری در بورس انرژی	$\acute{p^m}$	قیمت پیشنهادی برای ساعات میان‌باری در بورس انرژی
$PV2^p$	ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش در ساعات اوج بار در بورس انرژی	$\acute{p^p}$	قیمت پیشنهادی برای ساعات اوج بار در بورس انرژی
متغیرهای تصمیم			
$u_{d,t}$	متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه درروز d و ساعت t تولید انجام شود	$\acute{q^l}$	مقدار انرژی الکتریکی پیشنهادی برای ساعات کم‌باری در بورس انرژی
$q_{d,t}$	مقدار انرژی الکتریکی که در روز d و ساعت t و به ازای قیمت فروش $p_{d,t}$ عرضه می‌شود	$\acute{q^m}$	مقدار انرژی الکتریکی پیشنهادی برای ساعات میان‌باری در بورس انرژی
$\acute{q^b}$	مقدار انرژی الکتریکی پیشنهادی برای بار پایه در بورس انرژی	$\acute{q^p}$	مقدار انرژی الکتریکی پیشنهادی برای ساعات اوج بار در بورس انرژی

مأخذ: مدلسازی پژوهش توسط نویسندگان

مدل خودبرنامه‌ریزی میان‌مدت تولیدکننده برق برای شرکت همزمان در بازار روز بعد و بورس انرژی به‌صورت روابط (۱۱) تا (۲۹) است.

$$Max\ NPV= PV1+PV2-PV3 \quad (۱۱)$$

St:

$$PV1= \frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t)}{(1+r)^{\wedge}m} \quad \forall\ t,d \quad (۱۲)$$

$$PV2^b=\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} \acute{p}^b.\acute{q}(d,t) \quad \forall\ t,d \quad (۱۳\ \text{الف})$$

$$\acute{q}(d,t)=\acute{q}^b$$

$$PV2^l=\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{7} \acute{p}^l.\acute{q}(d,t)+\sum_{d=1}^{31} \acute{p}^l.\acute{q}(d,24) \quad \forall\ t,d \quad (۱۳\ \text{ب})$$

$$\acute{q}(d,t)=\acute{q}^l \quad t=1,\dots,7\ \&\ 24$$

$$\acute{q}(d,t)=0 \quad t=8,\dots,23$$

$$PV2^m=\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=8}^{19} \acute{p}^m.\acute{q}(d,t) \quad \forall\ t,d \quad (۱۳\ \text{ج})$$

$$\acute{q}(d,t)=\acute{q}^m \quad t=8,\dots,19$$

$$\acute{q}(d,t)=0 \quad t=1,\dots,7\ \&\ 20,\dots,24$$

$$PV2^p=\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=20}^{23} \acute{p}^p.\acute{q}(d,t) \quad \forall\ t,d \quad (۱۳\ \text{د})$$

$$\acute{q}(d,t)=\acute{q}^p \quad t=20,\dots,23$$

$$\acute{q}(d,t)=0 \quad t=1,\dots,19\ \&\ 24$$

$$PV3=\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt})}{(1+r)^{\wedge}n} \quad \forall\ t,d \quad (۱۴)$$

$$C(Q_{dt})=c_0u_{dt}+c.Q_{dt}+cost_t^{SU}+cost_t^{SD} \quad \forall\ t,d \quad (۱۵)$$

$$Q_{dt}=q(d,t)+\acute{q}(d,t) \quad \forall\ t,d \quad (۱۶)$$

$$Q_{dt}\le Q_{max}.u_{dt} \quad \forall\ t,d \quad (۱۷)$$

$$\acute{q}(d,t)\le \acute{q}_{max}.u_{dt} \quad \forall\ t,d \quad (۱۸)$$

$$q(d,t)\le q_{max}.u_{dt} \quad \forall\ t,d \quad (۱۹)$$

$$cost_{dt}^{SD}\ \ge\ c^{SD}\ (u_{d,t-1}-u_{d,t}) \quad t=2,\dots,N_T\ \forall\ d \quad (۲۰)$$

$$cost_{1,1}^{SU}\ \ge\ c^{SU}\ (u_{1,1}-u^0) \quad (۲۱)$$

$$cost_{d+1,1}^{SU}\ \ge\ c^{SU}\ (u_{d+1,1}-u_{d,24}) \quad (۲۲)$$

$$cost_{1,1}^{SD}\ \ge\ c^{SD}\ (u^0-u_{1,1}) \quad (۲۳)$$

$$cost^{SD}_{d+1,1} \geq c^{SD}\,(u_{d,24} - u_{d+1,1}) \qquad \forall\, d \qquad (۲۴)$$

$$Q_{d,t+1} - Q_{d,t} \leq R^{UP}\,u_t + R^{SU}\,(1 - u_{d,t}) \qquad t=1, \ldots, N_T - 1\ \forall d \qquad (۲۵)$$

$$Q_{d,t} - Q_{d,t+1} \leq R^{down}\,u_{d,t+1} + R^{SD}\,(1 - u_{d,t+1}) \qquad t=1, \ldots, N_T - 1\ \forall d \qquad (۲۶)$$

$$u(d,t),\ \epsilon\ \{0,1\} \qquad \forall\, t,d \qquad (۲۷)$$

$$P(d,t) = \sigma_2\,(d,t) - (2\pi - 1) * (\sigma_2\,(d,t) - \sigma_1\,(d,t)) \qquad \forall\, t,d \qquad (۲۸)$$

$$\acute{p} = \delta_2 - (2\pi - 1) * (\delta_3 - \delta_2) \qquad (۲۹)$$

رابطه (۱۱) تابع هدف مسئله و معادل ارزش فعلی سود است.

رابطه (۱۲) ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش انرژی الکتریکی در بازار روز بعد انرژی است که بعد از m ماه از معامله و تحویل فیزیکی انرژی تعهدشده، به تولیدکننده پرداخت می‌شود.

روابط (۱۳ الف) تا (۱۳ د) ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش در بورس انرژی است که همزمان با عقد قرارداد در همان ابتدای افق برنامه‌ریزی تسویه می‌شود. رابطه (۱۳ الف) مربوط به استراتژی بار پایه، رابطه (۱۳ ب) مربوط به استراتژی کم‌باری، رابطه (۱۳ ج) مربوط به استراتژی میان‌باری و رابطه (۱۳ د) مربوط به استراتژی اوج بار است. یادآوری می‌شود که در هر بار اجرای مدل، فقط یکی از روابط (۱۳ الف) تا (۱۳ د) فعال است.

رابطه (۱۴) ارزش فعلی هزینه تولید کل انرژی الکتریکی معامله شده در بازار روز بعد و بورس انرژی است که پس از n ماه از ابتدای افق برنامه‌ریزی تسویه می‌شود.

رابطه (۱۵) بیانگر هزینه تولید است. این هزینه شامل هزینه ثابت، هزینه سوخت و هزینه‌های روشن و خاموش کردن نیروگاه در ساعت و روز مورد نظر است.

رابطه (۱۶) بیان می‌کند کل انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه برابر مجموع انرژی الکتریکی معامله شده در بازار روز بعد و بورس انرژی است.

رابطه (۱۷) نشان می‌دهد مقدار تولید در هر ساعت نباید از ظرفیت مجاز نیروگاه تخطی کند. در صورت روشن بودن نیروگاه در ساعت t (u(t)=۱)، مجاز به تولید حداکثر ظرفیت نیروگاه در آن ساعت است.

به همین شکل روابط (۱۸) و (۱۹) محدوده مجاز برای ارائه انرژی الکتریکی به بازار روز بعد و بورس انرژی را نشان می‌دهند ($q_{\acute{m}ax}$ ماکزیمم سهمیه مجاز نیروگاه برای ارائه به بورس انرژی در هر ساعت است).

روابط (۲۰) تا (۲۴) مربوط به هزینه روشن و خاموش شدن نیروگاه است.

روابط (۲۵) و (۲۶) مربوط به نرخ افزایش یا کاهش تولید و نرخ توقف و راه‌اندازی واحد در هر ساعت است.

رابطه (۲۷) متغیر صفر و یک است که وضعیت روشن یا خاموش بودن نیروگاه را نشان می‌دهد.

روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب قیمت پیشنهادی به بازار روز بعد و بورس انرژی براساس معیار امکان هستند.

برای ارزیابی اعتبار مدل فوق از شیوه تحلیل حساسیت استفاده شده است. به این صورت که با افزایش یا کاهش در یک پارامتر به شرط ثابت ماندن بقیه پارامترها، درصورتی‌که تغییرات در رفتار متغیرهای خروجی براساس ادبیات پژوهش و یا نظر افراد خبره منطقی باشد، اعتبار مدل مورد تأیید است. با توجه به اینکه با تغییر در مقدار پارامترهایی مانند هزینه تولید، حداقل و حداکثر توان تولید، هزینه هر بار روشن و خاموش شدن، وضعیت روشن یا خاموش بودن اولیه نیروگاه، قیمت‌های تسویه و قیمت‌های پیشنهادی فروش، خروجی‌های مدل رفتار منطقی از خود نشان دادند، اعتبار مدل مورد تأیید قرار گرفت.

هر تولیدکننده انرژی الکتریکی برای برنامه‌ریزی میان‌مدت یک ماهه جهت شرکت در بورس انرژی می‌تواند بسته‌های انرژی الکتریکی کم‌باری، میان‌باری و اوج بار را به ترتیب برای ساعات کم‌باری، ساعات میان‌باری و ساعات اوج بار و یا بسته بار پایه را برای تمام ساعات شبانه روز پیشنهاد دهد. منظور از بسته‌های انرژی، حجم مشخصی از بار الکتریکی است که با قیمت مشخص برای ساعات مشخص در یک ماه توسط تولیدکننده به بورس انرژی ارائه می‌شود. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی با فرض اینکه ارائه هر یک از این بسته‌های پیشنهادی به مثابه یک استراتژی پیش روی تولیدکننده است، تعیین می‌کند که کدام یک از استراتژی‌های کم‌باری، میان‌باری، اوج بار و یا بار پایه، سود بیشتری برای تولیدکننده به همراه خواهد داشت. همچنین تعیین می‌کند چه مقدار انرژی الکتریکی تولید و چه مقدار از این انرژی تولیدی در بازار روز بعد و چه مقدار از آن در بورس انرژی به فروش رسد.

با توجه به وجود دو متغیر فازی قیمت بازار روز بعد و قیمت برق در بورس انرژی، تابع هدف مسئله به فرم عدد فازی است که این مقدار فازی با آلفاکات زدن روی قیمت‌های فازی و محاسبه مقدار تابع هدف مسئله به ازای هر آلفاکات به شکل یک عدد فازی مثلثی

ترسیم می‌شود. با در نظر گرفتن اینکه بازه عدم قطعیت قیمت بازار روز بعد به‌صورت عدد فازی $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ است، آلفاکات‌های چپ و راست روی این بازه به ترتیب با روابط (۳۰) و (۳۱) محاسبه می‌شود.

$$Left\ alfacut:\ P(d,t)=\alpha^*\sigma_2(d,t)+(1-\alpha)^*\sigma_1(d,t) \quad (۳۰)$$

$$Right\ alfacut:\ P(d,t)=\alpha^*\sigma_2(d,t)+(1-\alpha)^*\sigma_3(d,t) \quad (۳۱)$$

به همین نحو آلفاکات‌های چپ و راست روی بازه عدم قطعیت قیمت فازی بورس انرژی هم به ترتیب با روابط (۳۲) و (۳۳) محاسبه می‌شود.

$$Left\ alfacut:\ \acute{p}=\alpha^*\acute{\delta}_2+(1-\alpha)^*\acute{\delta}_1 \quad (۳۲)$$

$$Right\ alfacut:\ \acute{p}=\alpha^*\acute{\delta}_2+(1-\alpha)^*\acute{\delta}_3 \quad (۳۳)$$

برای محاسبه آلفاکات‌های چپ تابع هدف از روابط (۳۰) و (۳۱) و برای محاسبه آلفاکات‌های راست تابع هدف از روابط (۳۲) و (۳۳) استفاده می‌شود.

٤-۲. محاسبه ارزش فعلی خالص با نرخ بهره فازی

نرخ بهره و به تبع آن نرخ تنزیل، یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر عملکرد بازار سرمایه و از مهم‌ترین ابزارهای کنترلی در اقتصاد است. اقتصادهای پیشرفته دنیا به‌شدت تحت تأثیر نرخ‌های بهره قرار داشته و به‌سرعت به تغییرات آن واکنش نشان می‌دهند. تغییرات نرخ بهره همواره مورد توجه سیاست‌گذاران اقتصادی بوده و می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر تصمیم‌گیری عاملان اقتصادی داشته باشد (کازرونی و همکاران، ۱۳۹۵). در اقتصاد ایران از نرخ بهره به سبب تغییر در سیاست‌های مختلف دولت‌ها در زمینه نرخ بازدهی سرمایه و سود، اطلاع دقیقی در دسترس نیست و به همین جهت متغیری پنهان است زیرا سیاست‌های دستوری دولت‌های مختلف بر نرخ سوددهی نظام بانکی و اوراق مشارکت اثرگذار است و این دو عامل نمی‌توانند معیار مناسبی برای نرخ بهره تعادلی باشند. ازاین‌رو می‌توان با تخمین فازی نرخ بهره یا نرخ تنزیل، ارزش فعلی خالص را به‌صورت فازی مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

برای محاسبه ارزش فعلی خالص از رابطه (۳۴) استفاده می‌شود.

$$NPV=\frac{incom}{(1+r)\hat{}m} - \frac{cost}{(1+r)\hat{}n} \quad (۳۴)$$

m تعداد ماه‌های محقق شدن درآمدها و n تعداد ماه‌های پرداخت هزینه‌ها از زمان فعلی است. با فرض اینکه نرخ بهره فازی به‌صورت $\tilde{r} = (r^L, \bar{r}, r^R)$ تعریف شده باشد ارزش فعلی خالص فازی به‌صورت روابط (۳۵) تا (۴۱) محاسبه می‌شود.

$$1+\tilde{r} = (1+r^L, 1+\bar{r}, 1+r^R) \quad (۳۵)$$

$$\frac{1}{1+\tilde{r}} = \left(\frac{1}{1+r^R}, \frac{1}{1+\bar{r}}, \frac{1}{1+r^L}\right) \quad (۳۶)$$

$$\frac{1}{(1+\tilde{r})^i} = \left[\frac{1}{(1+\bar{r})^i} - \left(\frac{1}{1+\bar{r}} - \frac{1}{1+r^R}\right)*\frac{i}{(1+\bar{r})^{i-1}}\right. \quad , \quad (۳۷)$$
$$\left.\frac{1}{(1+\bar{r})^i}, \frac{1}{(1+\bar{r})^i} + \left(\frac{1}{1+r^L} - \frac{1}{1+\bar{r}}\right)*\frac{i}{(1+\bar{r})^{i-1}}\right]$$

$$\widetilde{NPV} = \widetilde{PV1} + PV2^p - \widetilde{PV3} \quad (۳۸)$$

$$\widetilde{PV1} = \frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t)}{(1+\tilde{r})^{\wedge}m} =$$
$$\left[\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t)}{(1+\bar{r})^m} - \left(\frac{1}{1+\bar{r}} - \frac{1}{1+r^R}\right)*\frac{m*(\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t))}{(1+\bar{r})^{m-1}}\right. \quad , \quad (۳۹)$$
$$\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t)}{(1+\bar{r})^m} \quad ,$$
$$\left.\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t)}{(1+\bar{r})^m} + \left(\frac{1}{1+r^L} - \frac{1}{1+\bar{r}}\right)*\frac{m*(\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} p(d,t).q(d,t))}{(1+\bar{r})^{m-1}}\right]$$

$$PV2^b = \sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} \acute{p}^b.\acute{q}(d,t) \quad (۴۰)$$

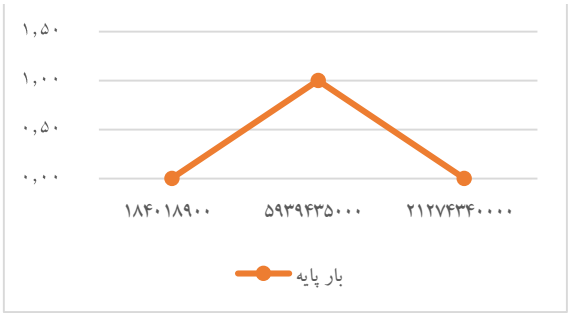
$$\widetilde{PV3} = \frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt})}{(1+\tilde{r})^{\wedge}n} =$$
$$\left[\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt})}{(1+\bar{r})^n} - \left(\frac{1}{1+\bar{r}} - \frac{1}{1+r^R}\right)*\frac{n*(\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt}))}{(1+\bar{r})^{m-1}}\right. \quad , \quad (۴۱)$$
$$\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt})}{(1+\bar{r})^n} \quad ,$$
$$\left.\frac{\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt})}{(1+\bar{r})^n} + \left(\frac{1}{1+r^L} - \frac{1}{1+\bar{r}}\right)*\frac{n*(\sum_{d=1}^{31}\sum_{t=1}^{24} C(Q_{dt}))}{(1+\bar{r})^{n-1}}\right]$$

رابطه (۴۰) ارزش فعلی درآمد فروش در بورس انرژی برای بسته بار پایه است.

٤-۳. مثال عددی

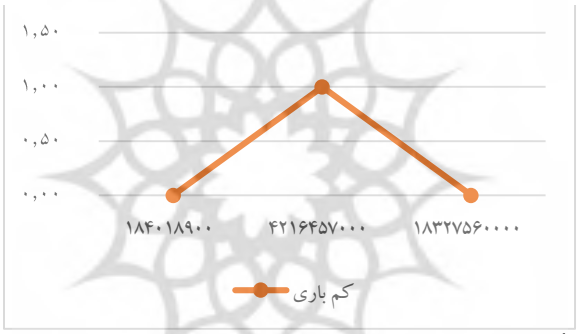
مسئله طرح شده در این مقاله براساس ویژگی‌های یک نیروگاه‌های حرارتی ارائه شده و مورد مطالعه یک واحد گازی است که از توربین‌های زیمنس V94.2 استفاده می‌کند و از توربین‌های پرکاربرد در ایران است. با محاسبه آلفاکات‌های چپ و راست تابع هدف در هر یک از استراتژی‌های کم‌باری، میان‌باری، اوج بار و بار پایه نمودارهای فازی مطابق شکل‌های ۳ تا ۶ محاسبه شده است.

شکل ۳. نمودار فازی تابع هدف سود در استراتژی عرضه بار پایه در بورس انرژی



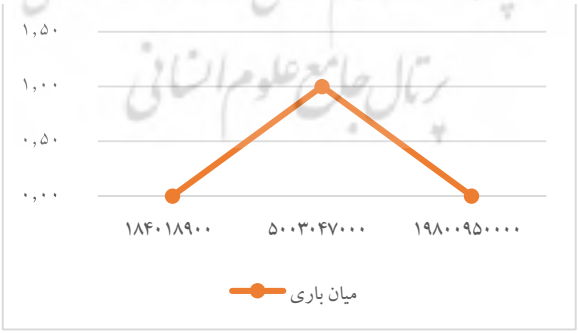
مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ٤. نمودار فازی تابع هدف سود در استراتژی عرضه در ساعات کم‌باری در بورس انرژی



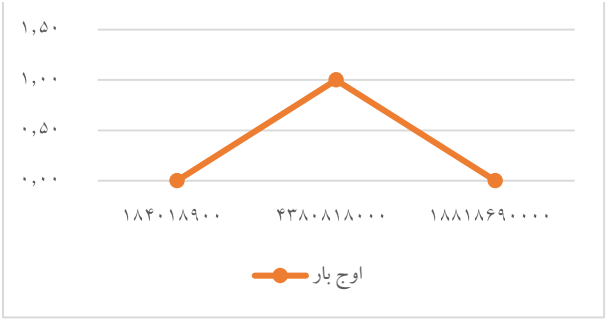
مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۵. نمودار فازی تابع هدف سود در استراتژی عرضه در ساعات میان‌باری در بورس انرژی



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ٦. نمودار فازی تابع هدف سود در استراتژی عرضه در ساعات اوج باری در بورس انرژی



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۷. مقایسه استراتژی‌های چهارگانه (بار پایه > میان‌باری > اوج بار=کم‌باری)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جهت مقایسه استراتژی‌های چهارگانه فوق از روش مقایسه اعداد فازی استفاده می‌شود. مقایسه اعداد فازی فوق نشان می‌دهد که با عرضه بسته بار پایه، بزرگترین مقدار سود و با عرضه بسته اوج بار و کم‌باری، کمترین مقدار سود حاصل می‌شود.

حال با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) که جهت قطعی‌سازی بازه عدم قطعیت براساس معیارهای امکان، الزام و اعتبار در سطح اطمینان π طراحی شده، در سطوح مختلف اطمینان،

مدل پیشنهادی برای بسته بار پایه و میان‌باری که بیشترین سود را داشتند، اجرا شد. نتایج در جداول ۳ تا ۵ ارائه و نمودار آنها در شکل‌های ۸ و ۹ ترسیم شده است.

جدول ۳. ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف با معیار امکان

ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف π با معیار امکان (ریال)				
بار پایه		میان باری		Π
NPV	مقدار ارائه به بورس	NPV	مقدار ارائه به بورس	
۲۱۲۷٤۳٤۰۰۰۰	۸۰	۱۹۸۰۰۹۵۰۰۰۰	۸۰	۰
۱۹۷٤۰۸۵۰۰۰۰	۸۰	۱۸۳۲۱۱٦۰۰۰۰	۸۰	۰/۱
۱٦٦۷۳۸۷۰۰۰۰	۸۰	۱۵۳٦۱۵۸۰۰۰۰	۸۰	۰/۳
۱۳٦۰٦۸۹۰۰۰۰	۸۰	۱۲٤۰۲۰۰۰۰۰۰	۸۰	۰/۵
۱۰۵۳۹۹۱۰۰۰۰	۸۰	۹٤٤۲٤۱۹۰۰۰	۸۰	۰/۷
۷٤۷۲۹۲۵۰۰۰	۸۰	٦٤۸۲۸۳۸۰۰۰	۸۰	۰/۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ٤. ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف با معیار اعتبار

ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف π با معیار اعتبار (ریال)				
بار پایه		میان باری		Π
NPV	مقدار ارائه به بورس	NPV	مقدار ارائه به بورس	
۱۲۸۱۲۷۹۰۰۰۰	۸۰	۱۱٦۳٦۲۵۰۰۰۰	۸۰	۰
۱۱٤۳۸۱۲۰۰۰۰	۸۰	۱۰۳۰۹٦۱۰۰۰۰	۸۰	۰/۱
۸٦۸۸۷۷۵۰۰۰	۸۰	۷٦۵٦۳۲۹۰۰۰	۸۰	۰/۳
۵۹۳۹٤۳۵۰۰۰	۸۰	۵۰۰۳۰٤۷۰۰۰	۸۰	۰/۵
۳۱۹۰۲۱٦۰۰۰	۸۰	۲۳۵۳٤۵۱۰۰۰	۰	۰/۷
۷۱۲۰۷۸۵۰۰	۸۰	۷۱۲۰۷۸۵۰۰	۰	۰/۹

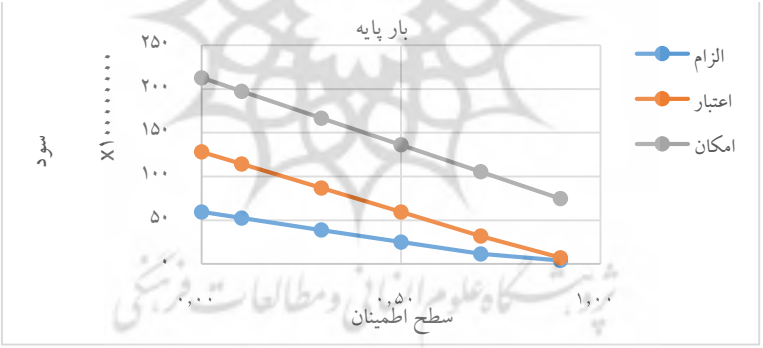
مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۵. ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف با معیار الزام

ارزش فعلی خالص سود در سطوح اطمینان مختلف π با معیار الزام (ریال)				
Π	میان باری		بار پایه	
	مقدار ارائه به بورس	NPV	مقدار ارائه به بورس	NPV
۰	۸۰	۵۰۰۳۰۴۷۰۰۰	۸۰	۵۹۳۹۴۳۵۰۰۰
۰/۱	۸۰	۴۳۳۹۷۲۷۰۰۰	۸۰	۵۲۵۲۱۰۰۰۰۰
۰/۳	۸۰	۳۰۱۳۰۸۶۰۰۰	۸۰	۳۸۷۷۴۳۰۰۰۰
۰/۵	۰	۱۹۰۴۹۴۸۰۰۰	۸۰	۲۵۰۶۴۹۹۰۰۰
۰/۷	۰	۱۰۳۸۰۹۵۰۰۰	۸۰	۱۱۵۹۸۹۹۰۰۰
۰/۹	۰	۴۱۲۲۳۴۱۰۰	۰	۴۱۲۲۳۴۱۰۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

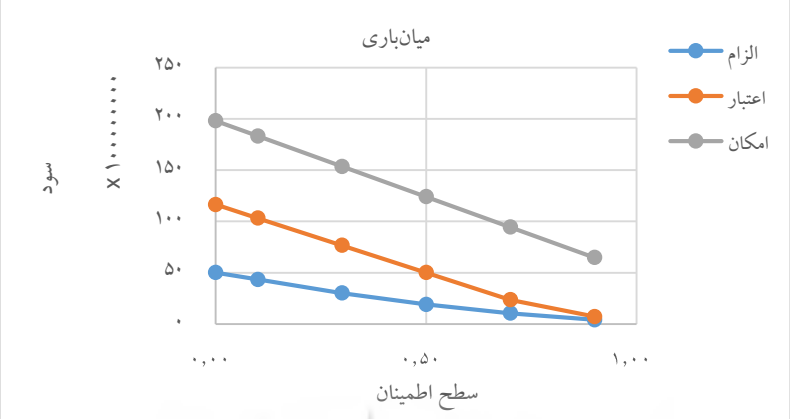
شکل ۸. نمودار سود در سطوح اطمینان مختلف برای بار پایه



مأخذ: یافته‌های پژوهش

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۹. نمودار سود در سطوح اطمینان مختلف برای میان‌باری



مأخذ: یافته‌های پژوهش

٤-٤. بررسی استواری مدل پیشنهادی

تنظیم سطح استواری برای پارامترهای غیر قطعی بدین معنی است که پارامترهای مدل بهینه‌سازی استوار به گونه‌ای تنظیم شوند که برای تمامی حالات غیر قطعی، در صورت نوسان در محدوده سطح استواری، پاسخ بهینه همچنان موجه و بهینه باقی بماند. برای بررسی استواری مدل پیشنهادی، یک بار مسئله در حالت قطعی و با در نظر گرفتن مقدار اسمی متغیرهای عدم قطعیت (σ_2 و δ_2) و بار دیگر در سطوح مختلف نوسان از مقدار اسمی و با مدل استوار پیشنهادی حل شده و نتایج مقایسه می‌شوند. ازاین‌رو، جهت سنجش استواری مدل پیشنهادی در شرایط واقعی، از شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی به معنای محقق‌سازی وقوع پارامترهای غیرقطعی است که به منظور ارزیابی کیفیت جواب‌ها در بهینه‌سازی استوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب که با تولید تعداد زیادی مقادیر تصادفی در بازه‌هایی که از رابطه (۴۲) به‌دست می‌آید، مدل به دفعات اجرا و رفتار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$[\sigma_2 - \xi^*(\sigma_2 - \sigma_1)\ ,\ \sigma_2 + \xi^*(\sigma_3 - \sigma_2)] \qquad 0 \le \xi \le 1 \qquad (۴۲)$$

با شبیه‌سازی رفتار متغیر عدم قطعیت که قیمت تسویه بازار است، در بازه‌های نوسان مختلف از مقدار اسمی (رابطه (۴۲))، به تعداد زیاد عدد تصادفی تولید می‌شود که هر یک

در حکم مقدار تحقق‌یافته قیمت تسویه بازار در شرایط واقعی است. سپس با مقایسه قیمت پیشنهادی در هر ساعت با مقدار تحقق‌یافته قیمت تسویه که به شیوه شبیه‌سازی فوق به‌دست آمد، در صورتی‌که قیمت پیشنهادی به بازار کمتر از مقدار تحقق‌یافته قیمت تسویه بازار باشد، قیمت پیشنهادی پذیرفته شده و در غیر این‌صورت رد شده فرض می‌شود. با محاسبه متوسط تعداد ساعاتی که قیمت ارائه شده به بازار در آن ساعات رد شده فرض می‌شود، میزان استواری روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هر چه این عدد کوچکتر باشد، استواری روش پیشنهادی در بازه نوسان مربوطه بیشتر خواهد بود. نتایج این شبیه‌سازی در جداول ۶ تا ۸ و به ازای معیارهای امکان، الزام و اعتبار نشان داده شده است.

جدول ٦. متوسط تعداد پیشنهادهای رد شده در نوسانات مختلف قیمت تسویه (معیار اعتبار)

	درصد نوسانات از مقدار اسمی با معیار اعتبار								
سطوح اطمینان	٪۱۰	٪۲۰	٪۳۰	٪٤۰	٪۵۰	٪٦۰	٪۷۰	٪۸۰	٪۹۰
π =۰/٦	۰	۰	۳	٤/۳۵	۵/۱۵	۵/۸	٦/٤۵	٦/۵	۷
π =۰/۷	۰	۰	۰	۰	۱/۷	۲/۹۵	۳/۹	٤/۷۵	٤/۸
π =۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۳	۲/۱۵	۲/۹
π =۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۱۷
مدل قطعی	۹/۱۷	۹	۹/۲۷	۹	۸/۸	۹/۱۳	۸/٦	۹/۰۵	۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۷. متوسط تعداد پیشنهادهای رد شده در نوسانات مختلف قیمت تسویه (معیار امکان)

	درصد نوسانات از مقدار اسمی با معیار امکان								
سطوح اطمینان	٪۱۰	٪۲۰	٪۳۰	٪٤۰	٪۵۰	٪٦۰	٪۷۰	٪۸۰	٪۹۰
π =۰/۹	۲٤	۱٦/۵۷	۱۳/۹۵	۱۲/٦۷	۱۲/۲۱	۱٤/۵۹	۱۲/۰٦	۱۱/۱۳	۱۱/۰۳
مدل قطعی	۹/۱۷	۹	۹/۲۷	۹	۸/۸	۹/۱۳	۸/٦	۹/۰۵	۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۸. متوسط تعداد پیشنهادهای رد شده در نوسانات مختلف قیمت تسویه (معیار الزام)

	درصد نوسانات از مقدار اسمی با معیار الزام							
سطوح اطمینان	٪۱۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۴۰	٪۵۰	٪۶۰	٪۷۰	٪۸۰
π =۰/۱	۰	٤/٨١	٦/١٩	٦/٧٨	٧/٢٢	٧	٧/٢٧	٨/٤٢
π =۰/۲	۰	۰	۳	٤/٢٧	٥/٧٢	٥/٧٢	٦/٣٧	٦/٢١
π =۰/۳	۰	۰	۰	٢/٠٦	٣/٦٣	٤/٥٥	٤/٩٦	٥/٧
π =۰/٤	۰	۰	۰	۰	١/٩	٣/٠٤	٣/٥	٣/٩
π =۰/٥	۰	۰	۰	۰	۰	١/٣٧	٢/٤٤	٣/٥٢
π =۰/٦	۰	۰	۰	۰	۰	۰	١	٢/٢٢
π =۰/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	١/١٣
مدل قطعی	۹/۱۷	۹	۹/۲۷	۹	۸/۸	۹/۱۳	۸/٦	۹/۰٥

مأخذ: یافته‌های پژوهش

مطابق جدول ۶، با به‌کارگیری معیار اعتبار در سطح اطمینان ۰/۶ و به ازای ۲۰ درصد نوسان از مقدار اسمی، به‌طور متوسط قیمت پیشنهادی مدل در همه ساعات در بازار پذیرفته شده است اما به ازای ۳۰ درصد نوسان از مقدار اسمی، به‌طور متوسط در ۳ ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز، قیمت پیشنهادی مدل در بازار رد شده است و در ۲۱ ساعت دیگر قیمت پیشنهادی ارائه شده توسط مدل، در بازار پذیرفته شده است. با افزیش سطح اطمینان، مدل به ازای نوسانات بیشتری مقاومت می‌کند و با کاهش ریسک، سود کمتری نیز عاید تولیدکننده می‌شود. همچنین، در صورت حل کردن مسئله به‌صورت قطعی (در نظر گرفتن σ_2 در حکم قیمت تسویه بازار) به‌طور متوسط در ۹ ساعت از ۲۴ ساعت پیشنهاد قیمت در بازار رد می‌شود.

از این رو طبق نتایج شبیه‌سازی، استواری مدل نسبت به تغییرات متغیر عدم قطعیت بدین صورت است که مدل در سطح اطمینان ۰/۶ تا نوسانات ۲۰ درصد، در سطح اطمینان ۰/۷ تا نوسانات ۴۰ درصد، در سطح اطمینان ۰/۸ تا نوسانات ۵۰ درصد و در سطح اطمینان ۰/۹ تا نوسانات ۸۰ درصد می‌تواند تاب‌آوری داشته باشد. درصورتی‌که طبق نتایج شبیه‌سازی، مدل قطعی به ازای کلیه نوسانات دارای عملکردی نامناسب خواهد بود. ازاین‌رو مدل پیشنهادی متناسب با سطوح اطمینان مختلف خود، به درجات مختلفی از استواری رسیده است. جدول ۷ نشان می‌دهد که معیار امکان، رویکردی بسیار خوش‌بینانه نسبت به قیمت تسویه دارد و

ازاین‌رو در قیمت‌دهی به بازار، قیمت‌ها را در سطوح بالاتری پیشنهاد داده است. بنابراین معیار امکان برای شرایطی که سیگنال‌های افزایش قیمت از بازار دریافت می‌شود، مناسب است. جدول ۸ نشان می‌دهد که معیار الزام رویکردی بسیار محتاطانه داشته، به‌طوری‌که در سطوح اطمینان پایین هم استواری مناسبی از خود نشان می‌دهد. پس این رویکرد برای تصمیم‌گیرندگان بسیار ریسک‌گریز و همچنین شرایطی که سیگنال‌های کاهش قیمت از بازار دریافت می‌شود، مناسب است.

٤-٥. نرخ تنزیل غیرقطعی

با توجه به اینکه نرخ تنزیل می‌تواند متغیری غیرقطعی باشد، تغییرات آن می‌تواند مقدار ارزش فعلی سود را تحت تأثیر قرار دهد. جدول ۹ نشان می‌دهد با در نظر گرفتن نرخ‌های تنزیل مختلف، مقادیر انرژی الکتریکی قابل ارائه و ارزش فعلی سود چگونه تغییر می‌یابد.

جدول ۹. ارزش فعلی سود با نرخ‌های تنزیل مختلف در سطح اطمینان ۰/۷= π با معیار اعتبار

	بار پایه	اوج بار	میان‌باری	کم‌باری	(نرخ تنزیل)
ارزش فعلی سود	٤٣٥٤٠٨٥٠٠٠	٤٣٥٤٠٨٥٠٠٠	٤٣٥٤٠٨٥٠٠٠	٤٣٥٤٠٨٥٠٠٠	٪۱۰
مقدار ارائه به بورس	۰	۰	۰	۰	
ارزش فعلی سود	٣٦٨٧٤١٦٠٠٠	٣٥٤٥٣٣٠٠٠	٣٥٤٥٣٣٠٠٠	٣٥٤٥٣٣٠٠٠	٪۱۵
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۰	۰	
ارزش فعلی سود	٣٤٠٥٨٣٢٠٠٠	٢٨٧٥٤٨٠٠٠٠	٢٨٧٥٤٨٠٠٠٠	٢٨٧٥٤٨٠٠٠٠	٪۲۰
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۰	۰	
ارزش فعلی سود	٣١٩٠٢١٦٠٠٠	٢٣٥٣٤٥١٠٠٠	٢٣٥٣٤٥١٠٠٠	٢٣٥٣٤٥١٠٠٠	٪۲۵
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۰	۰	
ارزش فعلی سود	٢٩٠٦٣٠٦٠٠٠	١٦٥٧٠٢٧٠٠٠	١٧٢٧٧٢٣٠٠٠	١٦٥٧٠٢٧٠٠٠	٪۳۰
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۸۰	۰	

ادامه **جدول ۹**. ارزش فعلی سود با نرخ‌های تنزیل مختلف در سطح اطمینان ۰/۷= π با معیار اعتبار

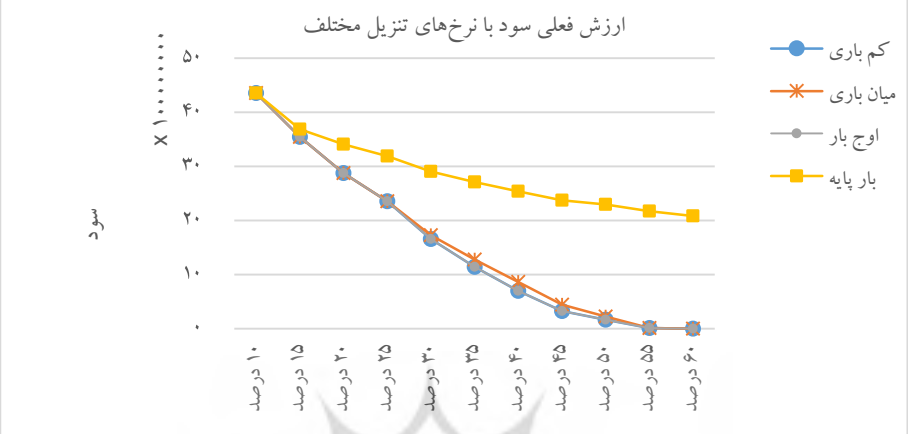
	بار پایه	اوج بار	میان‌باری	کم‌باری	(نرخ تنزیل)
ارزش فعلی سود	۲۷۱۰۰۲۱۰۰۰	۱۱٤۱۱۸٦۰۰۰	۱۲۷٦٦۰۱۰۰۰	۱۱٤۱۱۸٦۰۰۰	٪۳۵
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۸۰	۰	
ارزش فعلی سود	۲۵۳۹۱۲٤۰۰۰	٦۹۹۷۸۷۱۰۰	۸٦۳۹۳۸۸۰۰	٦۹۹۷۸۷۱۰۰	٪٤۰
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۸۰	۰	
ارزش فعلی سود	۲۳۷٤۸۸۹۰۰۰	۳۲۵۲۵۵۸۰۰	٤٤۲٤۵۹۸۰۰	۳۲۵۲۵۵۸۰۰	٪٤۵
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۸۰	۰	
ارزش فعلی سود	۲۲۹٦۰٦۸۰۰۰	۱٦٦۱٤۲۹۰۰	۲۲۷۲۲۳۰۰۰	۱٦٦۱٤۲۹۰۰	٪۵۰
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۸۰	۰	
ارزش فعلی سود	۲۱۷۰۹٤٦۰۰۰	۱۱٤۹٤۸۵۰	۱۱٤۹٤۸۵۰	۱۱٤۹٤۸۵۰	٪۵۵
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۰	۰	
ارزش فعلی سود	۲۰۸۵۱۹۰۰۰۰	۰	۰	۰	٪٦۰
مقدار ارائه به بورس	۸۰	۰	۰	۰	

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در شکل ۱۰ کاهش قابل ملاحظه ارزش فعلی سود با افزایش نرخ تنزیل نشان داده شده است.

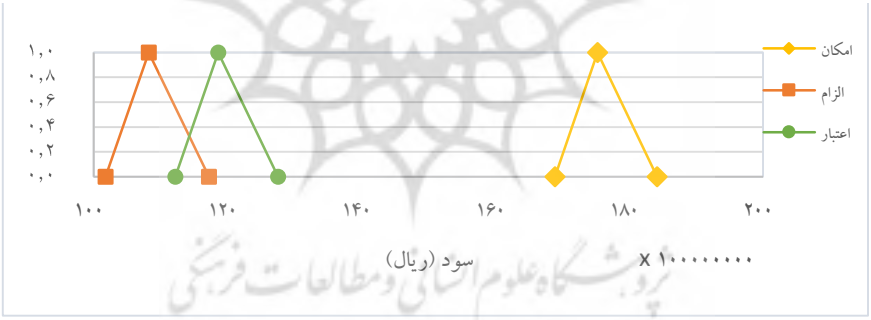
برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ تنزیل، به جای مقدار قطعی آن می‌توانیم از مقدار فازی استفاده کنیم. با فرض اینکه مقدار فازی نرخ تنزیل (۶۰٪، ۳۵٪، ۲۰٪) = $\tilde{r}$ باشد مقادیر فازی سود متناسب با آن بنابر روابط (۳۵) تا (۴۱) و در سطح اطمینان ۰/۷ محاسبه و در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

شکل ۱۰. نمودار ارزش فعلی خالص با نرخ‌های تنزیل مختلف در سطح اطمینان ۰/۷ (کم‌باری منطبق با اوج)



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۱۱. ارزش فعلی سود فازی با معیارهای امکان، اعتبار و الزام

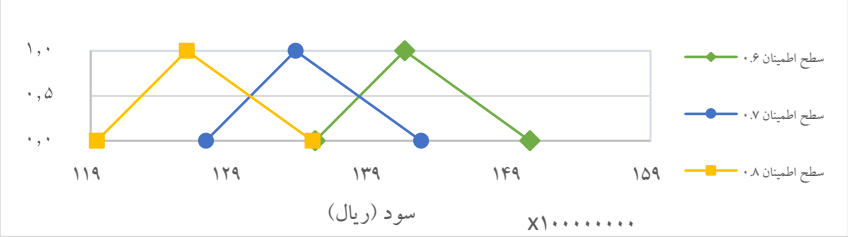


مأخذ: یافته‌های پژوهش

مقدار فازی سود بر مبنای نرخ تنزیل فازی در حالت بار پایه با معیار اعتبار در سطوح اطمینان ۰/۶ تا ۰/۸ در شکل ۱۲ ترسیم شده است.

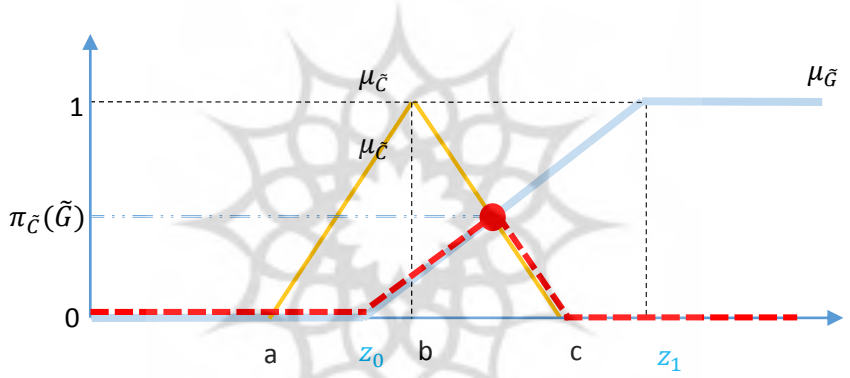
چنانچه از تصمیم‌گیرنده خواسته شود آرمان خود را در مورد سود مطلوب بیان کند، شرایط بهتری برای تصمیم‌گیری فراهم می‌شود. تابع عضویت سود فازی و آرمان فازی ($\tilde{G}$) در شکل ۱۳ ترسیم شده است.

شکل ۱۲. ارزش فعلی سود فازی با معیار اعتبار با نرخ تنزیل فازی در حالت بار پایه در سطوح اطمینان مختلف



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۱۳. درجه امکان تابع هدف فازی $\tilde{C}$ تحت آرمان فازی $\tilde{G}$



مأخذ: یافته‌های پژوهش

$\mu_{\tilde{G}}$ تابع عضویت آرمان فازی است که به‌صورت رابطه (۴۳) تعریف می‌شود. z_0 و z_1 مقادیری از تابع هدف هستند که به ازای آنها درجه این تابع عضویت، به ترتیب ۰ و ۱ است. درجه امکان برای اینکه تابع هدف مسأله تحت آرمان فازی $\tilde{G}$ برقرار باشد به‌صورت رابطه (۴۴) است.

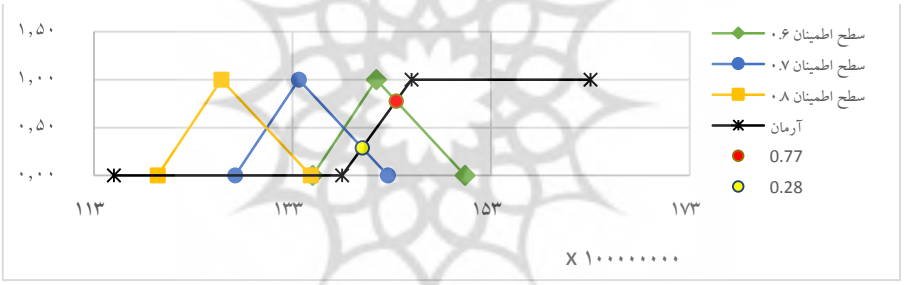
$$\mu_{\tilde{G}}(y) = \begin{cases} 0 & if\ y \le z_0 \\ \frac{y-z_0}{z_1-z_0} & if\ z_0 \le y \le z_1 \\ 1 & if\ y \ge z_1 \end{cases} \qquad (۴۳)$$

$$\pi_{\tilde{C}}(\tilde{G}) = sup_y\{min(\mu_{\tilde{C}}(y), \mu_{\tilde{G}}(y))\} \qquad (۴۴)$$

در نمودارهای (الف) تا (ج) شکل ۱۴ حالت‌های مختلفی از آرمان در نظر گرفته شده است. در شکل (الف) بر مبنای مقدار آرمان تعریف شده، سود در سطح اطمینان ۰/۸ هیچ مطلوبیتی برای تصمیم گیرنده ندارد، درصورتی که در سطح اطمینان ۰/۷ به مقدار ۰/۲۸ و در سطح اطمینان ۰/۶ به مقدار ۰/۷۷ مطلوبیت خواهد داشت. در شکل (ب) نیز بر مبنای مقدار آرمان در نظر گرفته شده، مطلوبیت سود در سطح اطمینان ۰/۸ به مقدار ۰/۵۶، در سطح اطمینان ۰/۷ به مقدار ۰/۹۳ و در سطح اطمینان ۰/۶ به مقدار ۱ خواهد بود. در شکل (ج) نیز بر مبنای مقدار آرمان در نظر گرفته شده، مطلوبیت سود در سطح اطمینان ۰/۸ به مقدار ۰/۳۸، در سطح اطمینان ۰/۷ به مقدار ۰/۶۳ و در سطح اطمینان ۰/۶ به مقدار ۰/۸۸ خواهد بود.

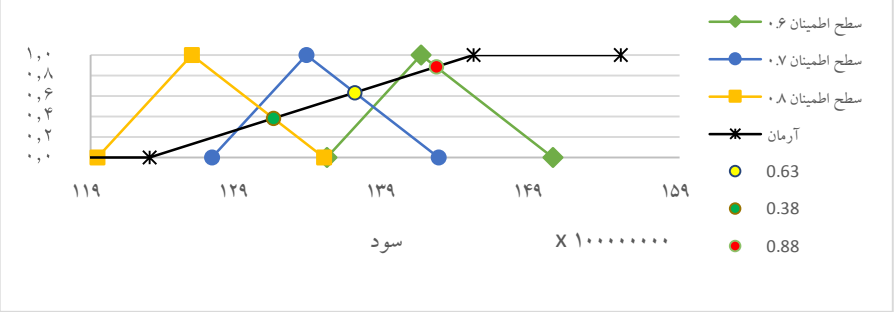
شکل ۱٤. آرمان‌های فازی

(الف)



(ب)

(ج)



مأخذ: یافته‌های پژوهش

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت ارائه مدلی برای پیشنهاددهی همزمان تولیدکننده برق در بازار روز بعد و بورس انرژی، از روشی استوار در مواجهه با پارامتر عدم قطعیت قیمت برق استفاده شده است. مدل پیشنهادی در حالت‌های ارائه بسته‌های بار پایه، کم‌باری، میان‌باری و اوج بار مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که سود تولیدکننده در صورت ارائه بسته بار پایه به بورس انرژی بیشترین مقدار را خواهد داشت و پس از آن بسته میان‌باری قرار دارد. بسته‌های اوج و کم‌باری نیز با مقادیر برابر در جایگاه سوم رتبه‌بندی قرار گرفتند. در نتیجه در صورت تمایل تولیدکننده به شرکت در بورس انرژی، ارائه بسته بار پایه توصیه می‌شود.

نتایج به‌کارگیری روش شبیه‌سازی نشان داد که معیار امکان، رویکردی بسیار خوش‌بینانه نسبت به قیمت تسویه دارد و ازاین‌رو در قیمت‌دهی به بازار، قیمت‌ها را در سطوح بالاتری نسبت به معیارهای الزام و اعتبار پیشنهاد کرده است. بنابراین معیار امکان فقط برای شرایطی که سیگنال‌های افزایش قیمت از بازار دریافت می‌شود مناسب خواهد بود. برعکس معیار امکان، معیار الزام رویکردی بسیار محتاطانه داشته به‌طوری‌که در سطوح اطمینان پایین هم استواری مناسبی از خود نشان می‌دهد. لذا این رویکرد برای تصمیم‌گیرندگان بسیار ریسک‌گریز و همچنین شرایطی که سیگنال‌های کاهش قیمت از بازار دریافت می‌شود مناسب است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد قیمت‌های پیشنهادی با معیار الزام و در سطح اطمینان ۰/۷ در صورت وقوع نوسان ۷۰ درصدی از مقدار اسمی قیمت تسویه هم مورد پذیرش قرار می‌گیرد. در سطح اطمینان ۰/۶ تا نوسان ۶۰ درصد و در سطح اطمینان ۰/۵ تا

نوسان ۵۰ درصد، قیمت‌های پیشنهادی همچنان می‌توانند مورد پذیرش قرارگیرند. به همین ترتیب با کاهش سطح اطمینان، مقاومت در برابر نوسانات بیشتر به تدریج کاهش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی حاصل از به‌کارگیری معیار اعتبار نیز نشان داد که پیشنهاددهی قیمت با این معیار در سطح اطمینان ۰/۹ تا نوسان ۸۰ درصدی از مقدار اسمی، مقاوم است. به همین ترتیب در سطح اطمینان ۰/۸ تا نوسان ۶۰ درصدی و در سطح اطمینان ۰/۷ تا نوسان ۴۰ درصدی و در سطح اطمینان ۰/۶ تا نوسان ۲۰ درصدی مقاوم است. با توجه به آنچه بیان شد معیار اعتبار در سطوح اطمینان بالای ۰/۶ نسبت به معیارهای امکان و الزام از نظر بهینگی جواب و استواری از عملکرد مناسبی برخوردار است.

در نهایت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ تنزیل و تعریف نرخ تنزیل فازی، رفتار ارزش فعلی سود به شکل یک عدد فازی محاسبه گردید و سود فازی تحت مقادیر مختلف آرمان فازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بر مبنای میزان آرمانی که تصمیم‌گیرنده برای سود مطلوب خود در نظر می‌گیرد، میزان مطلوبیت سود فازی در هر سطح اطمینان متغیر و به‌طورکامل متناسب با مقدار آرمان خواهد بود. همان‌طور که مشاهده شد سود حاصل شده در سطح اطمینان ۰/۷ می‌تواند متناسب با مقادیر آرمان فازی، مطلوبیتی با مقادیر ۰/۲۸، ۰/۶۳ و ۰/۹۳ داشته باشد.

این پژوهش، تنها به تصمیم‌گیری برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی و بورس انرژی پرداخته است. تولیدکنندگان می‌توانند انرژی الکتریکی تولیدی خود را همزمان با بازار روز بعد در بازار رزرو، بازار تنظیم و یا بازار میان‌روزی انرژی الکتریکی نیز به فروش برسانند و یا از طریق قراردادهای دوجانبه بلندمدت با مشتریان وارد معامله شوند که هر یک از این مبادلات، ملاحظات، عدم قطعیت‌ها و قوانین خاص خود را دارد که باید در مدل‌سازی مورد ملاحظه قرار گیرد تا در قالب یک مدل واحد کلیه تصمیمات حوزه‌های مختلف به‌صورت یک‌جا اتخاذ گردد. لذا پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند برای تحقیقات آتی، جهت توسعه تحقیق حاضر، قراردادهای دوجانبه و یا بازارهای رزرو، تنظیم و یا میان‌روزی انرژی الکتریکی را نیز در کنار بازار روز بعد مورد بررسی قرار دهند. همچنین در این تحقیق مکانیسم پرداخت براساس پیشنهاد مورد بررسی قرار گرفته است، لذا علاقه‌مندان می‌توانند در تحقیقات آتی، مکانیسم پرداخت یکسان را نیز با روش پیشنهاد شده، مورد بررسی قرار دهند.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

ORCID

Mehrnoosh Khaji https://orcid.org/ 0009-0004-5883-3862
Maghsoud Amiri https://orcid.org/0000-0002-0650-2584
Mohammad Taghi Taghavifard https://orcid.org/ 0000-0002-4212-2079

منابع

آیین، مرتضی. (۱۳۹۳). *تصمیم‌گیری تولیدکنندگان انرژی در حضور عدم قطعیت بازارهای برق*. رساله دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

پرورش، مهدی و محتوی‌پور، سیدسعید. (۱۳۹۵). *یک استراتژی جدید به منظور پیشنهاد بهینه قیمت برق برای شرکت‌های تولیدکننده*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان.

جلیلوندنژاد، امیر. (۱۳۹۵). *ارائه مدلی استوار برای مدیریت فروش برق در بازار رقابتی*. رساله دکتری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

دهقان، احسان. (۱۳۹۹). *ارائه یک مدل ریاضی در برنامه‌ریزی تولید و مسیریابی حمل و نقل یکپارچه در زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت*. رساله دکتری، دانشگاه سمنان.

راعی، رضا و کرمی، حسین. (۱۳۹۳). بررسی پتانسیل‌های بالقوه بورس انرژی در اجرای سیاست‌های اقتصاد مقاومتی و شفافیت اطلاعات بازار سرمایه. *دانش سرمایه‌گذاری*، ۴(۱۳)، ۱۶۷-۱۹۴.

رجبی، عباس. (۱۳۹۸). *تحلیلی بر وضعیت معاملات بخش برق در بورس انرژی کشور*. معاونت پژوهش‌های زیر بنایی و امور تولیدی دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن.

رحیمی، سلمان. (۱۳۹۵). *مدل‌سازی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق در بازار ایران به کمک ترکیب شبکه‌های عصبی- فازی با الگوریتم بهینه ازدحام ذرات. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.*

کازرونی، علیرضا، کیانی، پویان و مظفری، زانا. (۱۳۹۵). برآورد نرخ بهره در ایران با استفاده از منطق فازی. *دانش مالی تحلیل اوراق بهادار*، ۹(۳۰)، ۷۷-۹۳.

کیانوند، مهران و فرزین‌وش، اسدالله. (۱۳۹۴). اثر مبادلات قراردادهای سلف برق در بورس انرژی بر نوسانات قیمت نقدی بازار برق ایران. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۴(۱۶)، ۱۸۱-۲۰۷.
https://doi.org/10.22054/jiee.2015.1897

مشهور، الهه. مقدس تفرشی، مسعود. رحیم زاده، سجاد. (۱۳۸۸). تجدید ساختار و اصول کلی قیمت گذاری برق در محیط رقابتی. انتشارات دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی.

مشیری، سعید، مروت، حبیب، فلاحی، فرهاد، اصغری اسکوئی، محمدرضا و دوستی‌زاده، میثم. (۱۳۹۸). بررسی آثار سیاست‌های افزایش رقابت در بخش عمده‌فروشی برق بر قیمت و ترکیب نیروگاه‌های تولید برق ایران (رهیافت اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل). *پژوهش‌های اقتصادی ایران*، ۲۴(۸۱)، ۱-۴۲. https://doi.org/10.22054/ijer.2019.11685

نظری فارسانی، وحید. (۱۳۹۸)، *ارائه یک روش جدید پیش‌بینی بازه‌ای قیمت برق مبتنی بر یادگیری عمیق*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

References

Aien, M., Rashidinejad, M., Fotuhi-Firuzabad, M. (2015). GENCO«s decision making considering power market uncertainties, Graduate University of Advanced Technology, Energy Department, kerman. [In Persian]

Dehghan, E. (2021). *A mathematical model for integrated production and transport routing planning of closed-loop supply chains under uncertainty*, the Ph.D. degree Graduate, Semnan University, Semnan, Iran. [In Persian]

Esmaeily, A., Ahmadi, A., Raeisi, F., Ahmadi, M. R., Nezhad, A. E., & Janghorbani, M. (2017). Evaluating the effectiveness of mixed-integer linear programming for day-ahead hydro-thermal self-scheduling considering price uncertainty and forced outage rate. *Energy*, *122*, 182-193. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.089

Goroohi Sardou, I., & Ansari, M. (2020). Risk-constrained self-scheduling of a generation company considering natural gas flexibilities for wind energy integration. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *12*(1). 1-14. https://doi.org/10.1063/1.5119863

Itaba, S., & Mori, H. (2017). A fuzzy-preconditioned GRBFN model for electricity price forecasting. *Procedia computer science*, *114*, 441-448. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.010

Jabari, F., Mohammadi-ivatloo, B., & Mohammadpourfard, M. (2019). Robust optimal self-scheduling of potable water and power producers under uncertain electricity prices. *Applied Thermal Engineering*, *162*, 114258. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114258

Jalilvand Nejad, A. (2016). *Developing a robust model to manage power selling in the competitive market*, the Ph.D. degree Graduate, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

Jiao, P. H., Chen, J. J., Qi, B. X., Zhao, Y. L., & Peng, K. (2019). Electricity price driven active distribution network planning considering uncertain wind power and electricity price. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *107*, 422-437. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.12.005

Kazerooni, A., Kiyani, P., & Mozaffari, Z. (2016). Determination of interest rate in Iran by using Fuzzy logic method. *Financial Knowledge of Securities Analysis*, *9*(30), 77-93. [In Persian]

Khaloie, H., Abdollahi, A., Rashidinejad, M., & Siano, P. (2019). Risk-based probabilistic-possibilistic self-scheduling considering high-impact low-probability events uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 110*, 598-612. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.021

Khorasani, J., Monabbati, E., & Rajabi Mashhadi, H. (2018). Designing an optimal linear bid function in a pay-as-bid electricity market. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization, 1*(2), 133-142. https://doi.org/10.22111/ieco.2018.24410.1025

Kianvand, M., & Farzinvash, A. (2015). The effect of electricity forward contracts trading in the energy exchange on the volatility of spot prices in Iran electricity market. *Iranian Energy Economics, 4*(16), 181-207. (In Persian) https://doi.org/10.22054/ijee.2015.1897

Mashhour, E. Tafreshi, M. MRahim zadeh, S. (2009). Restructuring and general principles of electricity pricing in a competitive environment. K. N Toosi University Publications

Mazzi, N., Kazempour, J., & Pinson, P. (2017). Price-taker offering strategy in electricity pay-as-bid markets. *IEEE Transactions on Power Systems, 33*(2), 2175-2183. https://doi.org/ 10.1109/TPWRS.2017.2737322

Moshiri, S., Morovat, H., Fallahi, F., Asghari Oskoei, M. R., & Doustizadeh, M. (2019). The effects of electricity market reform on electricity prices and the power plants« technology mix: an agent-based modelling approach. *Iranian Journal of Economic Research, 24*(81), 1-42. [In Persian] https://doi.org/10.22054/ijer.2019.11685

Najafi, A., Pourakbari-Kasmaei, M., Jasinski, M., Lehtonen, M., & Leonowicz, Z. (2022). A medium-term hybrid IGDT-Robust optimization model for optimal self scheduling of multi-carrier energy systems. *Energy, 238*, 121661. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121661

Nazari Farsani, V. & Sheikh-El-Eslami, M.K. (2019). *A new approach for interval forecasting of electricity price based on deep learning*, the Degree of Master Graduate Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [In Persian]

Nojavan, S., Nourollahi, R., Pashaei-Didani, H., & Zare, K. (2019). Uncertainty-based electricity procurement by retailer using robust optimization approach in the presence of demand response exchange. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 105*, 237-248. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.041

Nojavan, S., & Zare, K. (2018a). Interval optimization-based performance of photovoltaic/wind/FC/electrolyzer/electric vehicles in energy price determination for customers by electricity retailer. *Solar Energy, 171*, 580–592. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.004

Nojavan, S., & Zare, K. (2018b). Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 102*, 401–412. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.013

Nojavan, S., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Robust bidding and offering strategies of electricity retailer under multi-tariff pricing. *Energy Economics, 68*, 359-372. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.10.027

Parvaresh, M., Mohtavi Pour, S.S. (2017). *A new optimal bidding strategy for generation compahies (GENCOS)*, the Degree of Master University of Guilan, Guilan, Iran. (In Persian)

Raei, R. &Karami, H. (2014). Examining the potential of the energy exchange in performance resistive economic policies and transparency in capital market information. *Journal of Investment Knowledge, 4*(13), 167-194. [In Persian]

Rahimi, S., Nazemi, A. & Mamipour, S. (2017). *Modeling and forecasting short-term electricity prices in the Iranian market by using a combination of neural network-fuzzy with particle swarm optimization algorithm*, the Degree of Master Graduate, University of kharazmi, Tehran, Iran. [In Persian]

Rajabi, A. (2019). An analysis of the trading situation of the electricity sector in the country's energy exchange. Vice President of Infrastructure Research and Production Affairs, Office of Energy, Industry and Mining Studies.

Rajabi Mashhadi, H. & Khorasani, J. (2013). Price-takers« bidding strategies in joint energy and spinning reserve pay-as-bid markets. *In Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, *9*(1). 36-43. https://doi.org/20.1001.1.17352827.2013.9.1.1.0

Vatani, B., Chowdhury, B., Dehghan, S. & Amjady, N. (2018). A critical review of robust self-scheduling for generation companies under electricity price uncertainty. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 97*, 428–439. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.035

Yazdaninejad, M., & Amjady, N. (2017). Risk-minimizing stochastic self-scheduling model for microgrid in day-ahead electricity market. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *27*(5). 1-18. https://doi.org/10.1002/etep.2302

Yazdaninejad, M., Amjady, N. & Dehghan, S. (2020). VPP self-scheduling strategy using multi-horizon IGDT, enhanced normalized normal constraint, and bi-directional decision-making approach. *IEEE Transactions on Smart Grid, 11*(4), 3632-3645. https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2962968

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

استناد به این مقاله: خاجی، مهرنوش، امیری، مقصود و تقوی فرد، محمدتقی. (۱۴۰۲). پیشنهاددهی همزمان در بازارهای رقابتی برق و بورس انرژی برای یک نیروگاه حرارتی براساس ارزش فعلی خالص سود. *پژوهش‌های اقتصادی ایران*، ۲۸(۹۷)، ۱۹۱-۲۳۸.

Iranian Journal of Economic Research is licensed under a Creative Commons Attribution.NonCommercial 4.0 International License.

پیوست

حراج در بازار برق

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در صنعت برق یکی از اهداف تجدید ساختار، استفاده از مکانیزم‌های بازار و ایجاد رقابت در جهت افزایش کارایی اقتصادی است. یک بازار مطلوب، بازاری است که در آن رقابت کامل باشد و در آن قیمت‌ها براساس عرضه و تقاضا تعیین شود. به‌طور معمول، بازارهای واقعی، بازار رقابت کامل نیستند ولی به هر حال در آن‌ها هم ارتباط بین عرضه و تقاضا نقش مهمی در تعیین قیمت‌ها دارد. حراج مکانیزمی است برای تعیین قیمت که در آن دو بخش فعال وجود دارد: متصدی حراج و پیشنهاددهندگان حراج. در حراج فروش، فروشنده متصدی حراج است و خریداران پیشنهاد قیمت می‌دهند. در حراج خرید، خریدار متصدی حراج است و فروشندگان، پیشنهاددهنده قیمت هستند. در حراج‌های دوطرفه، فروشندگان و خریداران هر دو، پیشنهاددهنده قیمت هستند و نهاد سومی به عنوان واسطه، متصدی حراج خواهد بود. (مشهور و همکاران، ۱۳۸۸)

با توجه به مدل‌های چهارگانه صنعت برق در بازارهای برق حراج‌های یک‌طرفه و دوطرفه وجود دارند. برای مثال در مدل آژانس خرید، حراج یک‌طرفه و در مدل رقابت عمده‌فروشی، حراج دوطرفه است و در مدل رقابت خرده‌فروشی حراج‌های یک‌طرفه و دوطرفه وجود دارد. از دلایل استفاده از مکانیزم حراج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. پایش قیمت: در بسیاری مواقع، فروشندگان یا خریداران، ارزش یک خدمت یا یک کالا و قیمتی که باید خریده یا فروخته شود را نمی‌دانند. یک حراج وسیله آزمایش بازار برای تعیین قیمت‌های رایج در بازار است.

۲. تعیین برنده: فرایند حراج تعیین می‌کند چه کسی برنده حراج است و می‌تواند کالا یا خدمت مورد نظر را بخرد یا بفروشد.

۳. تعیین مکانیزم پرداخت: میزان پرداختی برنده در فرایند حراج تعیین می‌شود. قوانین حراج به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که از معاملات خاص بین خریداران و فروشندگان معین پیشگیری کرده و همچنین نگذارند برخی بازیگران کنترل بازار را به‌دست گیرند.

قیمت تسویه بازار

در یک بازار رقابتی انرژی، مشابه هر بازار رقابتی دیگر، تعیین قیمت تابع قواعد علم اقتصاد است. در بازارهای برق، حراج می‌تواند با چندین قیمت متمایز یا یک قیمت یکسان انجام شود. در یک حراج رقابتی انرژی، صرف‌نظر از این‌که از یک قیمت ثابت یا از چندین قیمت متمایز استفاده شود، بهایی که خریدار می‌پردازد و همچنین بهایی که فروشنده دریافت می‌کند تابع یک اصل اساسی اقتصاد است. بدین شکل که ارزش‌گذاری محصول از دید تمام خریداران برنده برابر یا بیشتر از قیمت و همچنین هزینه‌های تولید تمام فروشندگان برنده هم کمتر یا مساوی قیمت است. به بیان دیگر، خریدارانی که ارزیابی آنها از ارزش محصول کمتر از قیمت باشد، محصول را نمی‌خرند (خریداران بازنده) و فروشندگانی که هزینه تولید محصول‌شان بیشتر از قیمت باشد، موفق به عرضه محصول خود نمی‌شوند (فروشندگان بازنده).

در اصطلاح صنعت برق، قیمتی که کل تقاضای خریداران برنده را تأمین کند و کل هزینه‌های فروشندگان برنده را بپوشاند، قیمت تسویه بازار نامیده می‌شود. در این قیمت، کل تقاضا یعنی مجموع تقاضاهای خریداران منفرد و کل عرضه یعنی مجموع عرضه فروشندگان منفرد، برابر است که به این امر در اصطلاح اقتصادی تعادل بازار گفته می‌شود و از تطابق منحنی‌های عرضه و تقاضا حاصل می‌شود. در بازارهای یک‌طرفه که به اصطلاح مدل تک‌خریدار نامیده می‌شود، پیشنهادهای سمت تقاضا وجود ندارد و میزان تقاضا را با استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی بار تعیین می‌کنند. در بازارهای یک‌طرفه، واحدهای تولیدی برای تأمین تقاضای پیش‌بینی شده با در نظر گرفتن قیمت‌ها و ظرفیت پیشنهادی‌شان انتخاب و زمان‌بندی می‌شوند (مشهور و همکاران، ۱۳۸۸)

تولیدکنندگان قیمت‌ساز[1] و قیمت‌پذیر[2]

در بازارهای تجدیدساختاریافته، تولیدکنندگان برق تحت دو عنوان قیمت‌ساز و قیمت‌پذیر دسته‌بندی می‌شوند. تولیدکنندگان قیمت‌ساز شامل تولیدکنندگانی می‌شود که میزان مشارکت و قیمت ارائه شده از طرف آنها به بازار در تعیین قیمت تسویه بازار نقش دارد و

1. Price Maker
2. Price Taker

تولیدکنندگانی قیمت‌پذیر شامل تولیدکنندگانی می‌شود که میزان مشارکت و قیمت ارائه شده خود، نقشی در قیمت تسویه بازار ندارد. به‌طور معمول، زمانی تولیدکنندگان نقش مؤثری در تعیین قیمت تسویه خواهند داشت که رقبای زیادی در بازار نداشته باشند و سهم قابل توجهی از انرژی بازار توسط آنها تأمین گردد، به‌طوری‌که حجم و قیمت ارائه شده از طرف آنها در شکل‌گیری تعادل بین عرضه و تقاضا مؤثر باشد. بنابراین دیگر نمی‌توان قیمت تسویه بازار را در رفتار تولیدکننده قیمت‌ساز به عنوان عامل مستقل مورد بررسی قرار داد، زیرا که مقدار آن متأثر از تصمیم تولیدکننده خواهد بود. ازاین‌رو برنامه‌ریزی و ارائه پیشنهاد برای تولیدکنندگان قیمت‌ساز برخلاف تولیدکنندگان قیمت‌پذیر، نمی‌تواند مبتنی بر پیش‌بینی قیمت تسویه بازار باشد. بدین جهت لازم است عوامل تأثیرگذار بر قیمت تسویه یعنی پیشنهادهای رقبا و محدودیت‌های مؤثر بر قیمت همچون خصوصیات شبکه انتقال به‌طور مشخص مورد توجه و بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین عامل ورود عدم قطعیت به این دسته از مسائل، بهینه‌سازی عدم وجود اطلاعات دقیق درخصوص رقبا به‌ویژه پیشنهادهای ارائه شده از طرف آن‌هاست. همچنین عوامل پیش‌بینی نشده در ساختار شبکه همچون قطعی خطوط یا خروج واحدهای دیگر از شبکه و نقش آن در توزیع بار، مواردی هستند که مسأله استراتژی پیشنهاددهی برای تولیدکننده قیمت‌ساز را بیشتر دستخوش عوامل غیرقطعی می‌نمایند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی