University of Sistan and Baluchestan

Public Management Researches

Print ISSN: 2538 - 3418 Online ISSN: 2676 - 7880

Iranian Academy of Management Sciences

A Robust Optimization Approach to Bidding Strategy for Generation Companies in Electricity Competitive Market Using Fuzzy Possibility and Necessity Theory

Mehrnoosh Khaji[1], Maghsoud Amiri[*2], Mohammad Taghi Taghavifard[3]

1. PhD student in Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
2. Professor, Faculty of Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: amiri@atu.ac.ir
3. Professor, Faculty of Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Extended Abstract

Abstract

The main aim of this research is to obtain the optimal bidding and offering curves of electricity generation company (GenCo) to determine the price and the amount of power for offering in day-ahead electricity market based on a step-wise offering approach to maximize the profit. The proposed model has two sections; in the first section, a method is suggested to obtain step-wise price bids, and in the second part, different amounts of offering power for each bidding price to electricity market is determined by modeling a self-scheduling problem. The robust optimization method investigates the effect of market price uncertainty on the optimal profit, in order to reduce the sensitivity of the optimal result to the deviation of uncertain parameter. This paper proposes a robust optimization approach by applying fuzzy methods to achieve the optimal self-scheduling solution. The robust mixed-integer linear programing model is formulated in a robust manner against different levels of the electricity price uncertainty. Finally, sensitivity analysis is used to validate and evaluate the performance of the proposed model under different uncertainty situation and the resistance of the model in variations of uncertain parameter is illustrates the robustness of model.

Introduction

In a competitive market environment, a GenCo, attempt to acquire an optimal bidding strategy in a secure way, which hedged against any realization of the electricity prices deviation. The uncertainty associated with the electricity market prices is modeled via the fuzzy forecasted value to be used for solving self-scheduling problem and offering to electricity market. The self-scheduling of a GenCo is a complex optimization problem. The first aspect of this

complexity is the necessity to encounter all equality and inequality constraints of the generating units such as minimum on/off duration, generation capacity limits, ramping up/down limits of generating units. The second aspect is electricity market price uncertainty and its volatility which affects the optimal result. This paper proposes a robust optimization framework to optimize self-scheduling and bidding strategy to electricity market considering pay-as-bid pricing mechanism, which enables the GenCo to make robust decisions and to schedule the power generation of units against the uncertain energy price.

Case study

To evaluate effectiveness of the proposed robust optimization model, it is employed on the gas-fired thermal generation units with Siemens V94.2 turbines.

Materials and Methods

To propose a robust self-scheduling technique, a mathematical modeling approach is applied by using a mixed-integer linear programming problem considering fuzzy price uncertainty, which is implemented in Lingo software for a case study of thermal generation unit to investigate the efficiency of the proposed model. Fuzzy possibility and necessity techniques are used for robust optimization modeling to solve self-scheduling problem and offering strategy to electricity market. Robust optimization approach is a form of risk management methods that has a low computing volume comparing to other methods such as stochastic programming and nonlinear methods to address data uncertainty in mathematical programming model.

Discussion and Results

In this paper the construction of hourly offer curves is designed based on a robust approach and the price forecast are obtained by fuzzy concepts. The robust methods can deal with uncertainty of market price is more desirable rather than deterministic and stochastic methods. In deterministic methods price uncertainty can't be considered and in stochastic methods the probability of the uncertain parameters needs to be determined which is a difficult job.

In the proposed method, step-wised price bids are generated by a fuzzy measure based on possibility and necessity technique. The proposed method enables decision makers to adjust their desired level of robustness by fuzzy measure confidence adjustment parameter (π) and to arrange bidding price from lower risk and upper acceptance level to higher risk and lower acceptance level. Also in the self-scheduling model, a fuzzy credibility technique is introduced to deal with fuzzy constraint. This technique empowers decision makers to adjust the level of conservatism and fuzzy constraint satisfaction based on their risk aversion or risk seeking manner. Since robustness level is antithetical to profit values, a higher degree of conservatism or robustness, leads to the lower values of profit. The proposed model lets decision makers to choose optimal bidding

strategy by adjusting the robustness level according to their risk aversion level. If decision makers want the greater profit values, they should adjust lower robustness level, but if they want to be resistant to the risk of bidding rejection in electricity market, they must intend the higher degrees of conservatism and robustness.

Conclusion

In this paper the sensitivity of a GenCo's profit to the level of market price uncertainty is investigated. In this regard, a robust approach is proposed by applying fuzzy possibility and necessity measure to deal with uncertainty which enables decision makers to adjust their desired risk level. In addition, sensitivity analysis is used to validate and evaluate the performance of the proposed model and a simulation method is applied to indicates the robustness of model. By comparing the results of the robust model and the deterministic model, it can be concluded the solution of the proposed model is more robust dealing with variations of price uncertainty. As results indicate, the risk aversion decision makers should adjust higher robust level to hedge themselves from the risk of rejection in electricity market and risk seeker decision makers should adjust lower robustness to gain higher profit. Accordingly, the proposed approach is suitable for both risk averse and risk seeker decision makers participating in pay-as-bid electricity market.

Keywords: bidding strategy, self-scheduling, electricity market, uncertainty, fuzzy possibility & necessity, robust optimization

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Article Type: Research Article

Cite this article: Khaji, M., Amiri, M., & Taghavifard, M.T. (2023). A Robust Optimization Approach to Bidding Strategy for Generation Companies in Electricity Competitive Market Using Fuzzy Possibility and Necessity Theory. *Public Management Researches*, 15 (58), 119-148. (In Persian)

CC BY NC

DOI:10.22111/JMR.2022.41039.5690
Received: 22 Dec. 2021 **Revised:** 08 Jun. 2022 **Accepted**: 18 Oct. 2022
© The Author(s).
Publisher: University of Sistan and Baluchestan

پژوهش‌های مدیریت عمومی
شاپا چاپی: ۳۴۱۸-۲۵۳۸ شاپا الکترونیکی: ۷۸۸۰-۲۶۷۶
انجمن علوم مدیریت ایران
دانشگاه سیستان و بلوچستان

ارائه رویکردی استوار به مسئله پیشنهاددهی تولیدکننده برق در بازار رقابتی با معیارهای الزام و امکان فازی

مهرنوش خاجی[۱] – مقصود امیری*[۲]– محمد تقی تقوی فرد[۳]

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مدیریت و حسابداری ، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.
۲. نویسنده مسئول، استاد تمام گروه مدیریت دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
amiri@atu.ac.ir
۳. استاد تمام گروه مدیریت دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر مدلی به منظور تعیین استراتژی بهینه پیشنهاددهی تولیدکننده انرژی الکتریکی جهت شرکت در بازار رقابتی برق به منظور بیشینه‌سازی سود ارائه شده است. این استراتژی شامل قیمت پیشنهادی فروش و مقدار انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار برق می‌باشد. ابتدا روشی برای تعیین قیمت‌ها به صورت پلکانی ارائه شده و سپس مدل برنامه‌ریزی تولید بهینه انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار، معرفی شده است. در این پژوهش با کمک منطق فازی، مدلی استوار در برابر عدم قطعیت قیمت با قابلیت تنظیم سطح استواری، ارائه شده است. رویکرد پژوهش، مدلسازی ریاضی بوده که به صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه شده و مراحل آن بر روی یک نیروگاه برق حرارتی پیاده سازی شده است. اعتبار و عملکرد مدل ارائه شده با رویکردهای تحلیل حساسیت و شبیه سازی مورد تأیید قرار گرفت و نشان داده شد که پله‌های پایین قیمت به ازای نوسان‌های شدید استواری خود را حفظ می‌کنند اما در پله‌های بالاتر، استواری نسبت به نوسانات شدیدتر قیمت تسویه به تدریج کاهش می یابد. بدین ترتیب در پله‌های پایین‌تر سود کمتر همراه با ریسک کمتر و در پله‌های بالاتر سود بیشتر همراه با ریسک بیشتر محقق می‌شود. ازاین‌رو پیشنهاددهی بر اساس پله‌های پایین‌تر قیمتی به تولیدکنندگان ریسک‌گریز و پیشنهاددهی بر اساس پله‌های بالاتر به تولیدکنندگان ریسک‌پذیر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: **استراتژی پیشنهاددهی، مسئله خودبرنامه‌ریزی، بازار انرژی الکتریکی، عدم قطعیت، امکان و الزام فازی**

مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم مهرنوش خاجی است.

استناد: خاجی، مهرنوش؛ امیری، مقصود؛ تقوی فرد، محمد تقی (۱۴۰۱). ارائه رویکردی استوار به مسئله پیشنهاددهی تولیدکننده برق در بازار رقابتی با معیارهای الزام و امکان فازی، *پژوهش‌های مدیریت عمومی*. ۱۵(۵۸)، ۱۴۸-۱۱۹ .

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱ **تاریخ ویرایش:** ۱۴۰۱/۰۳/۱۸ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

نوع مقاله: علمی پژوهشی **DOI**:10.22111/JMR.2022.41039.5690

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

حق مؤلف © نویسندگان

مقدمه

در ایران تجدید ساختار شبکه و طراحی بازار رقابتی برق از سال ۱۳۸۲ آغاز شده است و تا کنون برخی از اشکال بازارهای رقابتی پیاده‌سازی شده‌اند. خصوصی‌سازی نیروگاه‌های موجود و تشویق به سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در حوزه نیروگاهی نیز موجب پررنگ‌تر شدن اهمیت این بازار و ضرورت برنامه‌ریزی از سمت تولیدکنندگان برای حضور در آن شده است. عرضه برق پس از تجدید ساختار در صنعت برق به سمت بازار رقابت کامل پیشرفت نموده به نحویکه در بازار رقابت کامل، قیمت از طریق تعامل بین عرضه‌کنندگان و تقاضاکنندگان متعدد تعیین می‌شود که به آن قیمت تسویه بازار گفته می‌شود (*Mardani, Fatemi Ardestani, Ghazizadeh., 2018: 18-21*). در بازارهای برق شکل‌های مختلفی از حراج قابل اجراست که ساز و کار این داد و ستد مبتنی بر مناقصه است و می‌تواند به‌صورت حراج پرداخت یکسان و پرداخت بر مبنای پیشنهاد باشد. بازار برق ایران جزء معدود بازارهایی است که حراجی از نوع پرداخت بر اساس پیشنهاد دارد (*Farsaee, & Nazemi.,2015: 2*).

تولیدکنندگان برق برای فروش انرژی تولیدی خود در این بازار باید با بررسی محیط، رقبا و همچنین ارزیابی دقیق از توانمندی‌های رقابتی خود اقدام به برنامه‌ریزی برای شرکت در بازار برق نمایند و با شناختی که از بازار و ویژگی‌های آن دارند، قیمت پیشنهادی فروش انرژی تولیدی خود را برای ساعات آینده ارائه کنند. از این‌رو تعیین استراتژی قیمت‌دهی بهینه مهم‌ترین مسئله پیش روی تولیدکنندگان برق است در این بازار رقابتی پیشنهادهای بیش از اندازه‌گران‌قیمت منتهی به عدم موفقیت در بازار و پیشنهادهای بیش از اندازه ارزان‌قیمت منجر به سود از دست رفته می‌گردد (*Aien, Rashidinejad, & Fotuhi-Firuzabad., 2015*).

در محیط بازار رقابتی برق تولیدکنندگان نه تنها به دنبال یک استراتژی پیشنهاددهی پر سود هستند بلکه می‌کوشند تا استراتژی مقاومی انتخاب کنند که از آنها در برابر هرگونه تحققی از فاصله عدم قطعیت بین مقدار پیش‌بینی شده و مقدار محقق شده محافظت کند. بنابراین مسئله خودبرنامه‌ریزی از این جهت یک مسئله سخت و پیچیده است که هم باید محدودیت‌های فنی و منطقی واحد تولیدی و هم عواملی که بر قیمت بازار اثرگذار است و منجر به افزایش نوسان آن می‌شود را مد نظر قراردهد. از این رو تولید کننده باید روش‌های

بهینه‌سازی را اتخاذ کند که این عدم قطعیت را مدنظر قرار دهد (*Vatani, Chowdhury, Dehghan, & Amjady., 2018:.1*). رویکردهای مورد استفاده در مواجهه با پارامترهای عدم قطعیت در پژوهش‌های صورت گرفته عموما شامل مدل‌سازی تصادفی و مدل‌سازی استوار بوده است.

با توجه به اینکه به منظور استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی لازم است رفتار عامل عدم قطعیت به کمک یک تابع توزیع احتمال تقریب زده شود، اما حصول اطمینان از اینکه داده‌ها از رفتار آن تابع احتمال تبعیت کند کار دشواری خواهد بود. همچنین با فرض یافتن تابع توزیع مناسب و برازنده برای مجموعه‌ای از داده‌ها، استفاده از فرمول‌های تابع توزیع در مدل برنامه‌ریزی مسئله می‌تواند فضای جواب یا تابع هدف مسئله را از حالت تحدب خارج کرده و مسئله را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل کند که این امر امکان دست یافتن به جواب بهینه سراسری را کاهش و زمان حل مسئله را افزایش می‌دهد (*Jalilvand Nejad, Shafaei, & Shahriari,. 2016: 62*). با توجه به مشکلات و کاستی‌های روش‌های بهینه‌سازی تصادفی، در سال‌های اخیر محققان این حوزه به استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی استوار متمایل شده‌اند. روش بهینه سازی استوار یک روش مدیریت ریسک است که به بررسی اثر پارامتر عدم قطعیت بر جواب بهینه می‌پردازد و هدف آن کاهش حساسیت جواب بهینه به پارامتر عدم قطعیت است که نسبت به برنامه ریزی تصادفی از پیچیدگی محاسباتی کمتر و جواب موثر تری برخوردار است (*Nojavan, Nourollahi, Pashaei-Didani, & Zare ., 2019 : 6*).

مقاله حاضر با هدف غنی‌سازی پژوهش‌های مرتبط با این مسئله و پر نمودن بخشی از خلاءهای تحقیق متناسب با نیازهای بازار برق ایران ارائه شده است. در این مقاله مسئله خودبرنامه‌ریزی جهت ارائه استراتژی‌های بهینه تولیدکنندگان برق برای اولین بار با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار با تکیه بر تئوری فازی و مفاهیم الزام و امکان جهت مواجهه با عدم قطعیت پارامتر قیمت تسویه به عنوان مهمترین عامل عدم قطعیت در بازارهای رقابتی برق مدل‌سازی شده است. هدف از ارائه این مدل تعیین استراتژی پیشنهاددهی تولیدکننده در نظام پرداخت بر اساس پیشنهاد، شامل قیمت و مقادیر تولید پیشنهادی بوده به گونه‌ای

که این تصمیمات از تولیدکننده در برابر عوامل عدم قطعیت 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 می‌باشد. در بخش مرور ادبیات ابتدا به بررسی اجزاء مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی پرداخته شده و در ادامه برخی از فعالیت‌های پژوهشی صورت گرفته مرتبط با مسئله مورد بررسی مرور شده است. بخش تبیین مدل پیشنهادی شامل دو گام بوده که در گام نخست روشی جهت تعیین پله‌های قیمت پیشنهادی ارائه شده و بر اساس آن در گام دوم مدل خودبرنامه‌ریزی طراحی و تشریح شده است. در بخش مثال عددی، نمونه‌ای از مسئله با استفاده از داده‌های واقعی بازار برق ایران مدل‌سازی شده و با استفاده از نرم‌افزار لینگو[1] ورژن ۱۸ پیاده‌سازی شده است. در نهایت، تشریح یافته‌های تحقیق و بحث پیرامون آن در بخش بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

چارچوب نظری و پیشینه تحقیق

مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی شامل مراحل: الف) تخمین قیمت تسویه بازار، ب) مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی، ج) ارائه پله‌های پیشنهاد و د) تعیین نظام پرداخت حاکم بر بازار برق مورد نظر می‌باشد.

الف) تخمین قیمت تسویه بازار

انرژی الکتریکی به دلیل ویژگی‌هایی مثل غیر قابل ذخیره بودن، ضرورت تعادل لحظه ای بین عرضه و تقاضای آن و همچنین وابستگی تقاضای آن به عوامل بسیار زیاد و پویا، کالای بسیار منحصربفردی است و پویایی ویژه‌ای در قیمت بازار آن وجود دارد که با هیچ بازار دیگری مشابهت ندارد *(Weron, 2014:4)*. 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 & Mori, 2017: 2)*. از این رو سود بازیگران بازار برق در گرو دقت در تخمین قیمت تسویه بازار است *(Sheikh-el-eslami & Seifi, 2006: 1)*. یکی از

[1]. Lingo

ویژگی‌های بازار برق، نوسانات شدید قیمت برق است زیرا این قیمت تحت تأثیر عوامل متعدد و گوناگونی است که پیش‌بینی دقیق و نقطه‌ای آن را بسیار پیچیده و دشوار کرده است. *(Nazari Farsani, Sheikh-El-Eslami, 2019)*. بسیاری از خطاهای برنامه‌ریزی بر مبنای تخمین نقطه‌ای با روش‌های احتمالی، از نوسانات شدید قیمت واقعی از مقدار تخمین نقطه ای ناشی می‌شود. در سال‌های اخیر برای کاربردهایی مانند مدیریت ریسک و یا مسئله پیشنهاددهی روش پیش‌بینی بازه‌ای مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است *(Nazari Farsani, Sheikh-El-Eslami.,2019)*. پیش‌بینی بازه‌ای می‌تواند در ارزیابی ریسک ناشی از تصمیمات اخذ شده توسط بازیگران بازار مورد استفاده قرار گیرد و اطلاعات بیشتری از واقعیاتی که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد به آنها ارائه نماید تا خود را برای بهترین و بدترین شرایط ممکن آماده کنند *(Nowotarski & Weron, 2015:2)* .

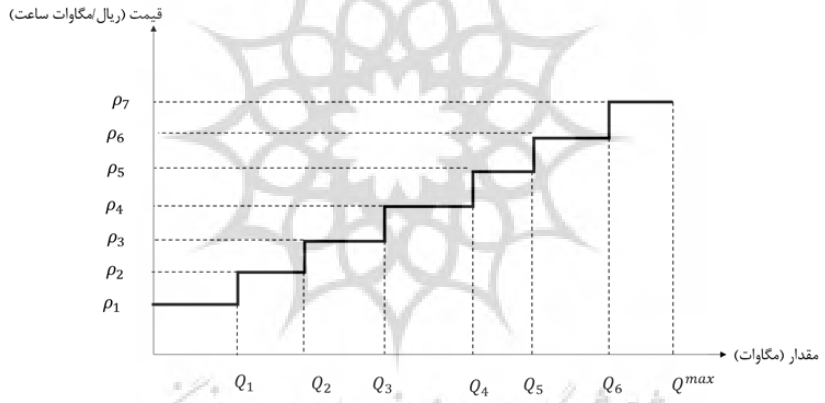
ب) مسئله خودبرنامه‌ریزی[1]

برای شرکت در بازار روز بعد، هر تولیدکننده ابتدا قیمت هر ساعت از روز بعد را پیش‌بینی می‌کند و سپس با در نظرگرفتن سطح معینی از عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها اقدام به خودبرنامه‌ریزی واحدهای تولیدی خود با هدف بیشینه نمودن سود می‌کند. از جمله عواملی 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 می‌باشد. قیمت بازار و نوسانات آن، عامل بسیار مهم دیگری است که به طور معناداری بر این مسئله اثر گذار است به طوریکه سیگنال‌های قیمت وضعیت روشن و خاموش بودن واحد تولیدی را تعیین می‌کند *(Vatani et al., 2018)* . نتایج حاصل از خودبرنامه‌ریزی بهینه سپس توسط تولیدکننده برای تولید استراتژی پیشنهاددهی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین عاملی که باعث پیچیده شدن مسئله خود برنامه‌ریزی می‌شود، وجود عدم قطعیت در داده‌ها به‌ویژه قیمت‌های روز بعد است. از این‌رو برای مواجهه با عدم قطعیت موجود، پژوهشگران این حوزه از رویکردهای متنوعی همچون برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار بهره برده‌اند *(Jalilvand Nejad, et al., 2016: 62)*.

[1]. Self scheduling

ج) منحنی پلکانی قیمت-مقدار

در استراتژی پیشنهاددهی پلکانی قیمت – مقدار انرژی الکتریکی برای ارائه به بازار برق، عموما برای جلوگیری از غیر خطی شدن مسأله بهینه سازی، ابتدا یک روش برای تعیین قیمت‌های پیشنهادی (p_j) در j پله برای هر ساعت از شبانه‌روز ارائه می شود سپس یک مسئله خودبرنامه‌ریزی به گونه‌ای طرح می‌شود که به ازای هرکدام از پله‌های قیمت، مقادیر بهینه انرژی الکتریکی تولیدشده (q_j) برای آن بازه زمانی را با توجه به محدودیت‌های فنی و عملیاتی واحد تولیدی تعیین کند. زیرا در غیر این صورت وجود دو متغیر تصمیم قیمت و مقدار سبب غیر خطی شدن مسأله بهینه سازی می شود. در نهایت تولیدکننده برای هر یک از ۲۴ ساعت شبانه‌روز باید نموداری مطابق شکل ۱ در حداکثر ده پله به دست آورده و به بهره‌بردار بازار جهت شرکت در حراج بازار برق ارائه دهد.



شکل شماره ۱: نمودار پلکانی قیمت-مقدار

در بین مسائل استراتژی پیشنهاددهی روش‌های مختلفی برای تولید نمودار پلکانی پیشنهاد، معرفی شده‌اند. عموماً این روش‌ها متناسب با رویکردی که محقق برای مواجهه با عدم قطعیت در پیش می‌گیرد انتخاب یا توسعه داده می‌شوند. محققان عموماً از برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت بهره برده‌اند و بسته به اینکه این عدم قطعیت را به‌صورت پیوسته یا گسسته مورد بررسی قرار دهند، از تابع توزیع احتمال برای حالت پیوسته و رویکرد سناریو محور برای حالت گسسته استفاده کرده‌اند. برخی دیگر از پژوهشگران خارج از فضای احتمالات با تخصیص بازه عدم قطعیت به قیمت تسویه، رویکرد

استوار را برگزیده‌اند. در فضای هرکدام از این رویکردها بنابر ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز بودن تولیدکننده برق، پلکان نمودار پیشنهاد، مقادیر و شکل متفاوتی خواهد داشت. لذا محققین برای تنظیم سطح ریسک مطلوب، روش‌های متفاوتی را مورد استفاده قرار داده‌اند.

د) نظام‌های پرداخت

نظام پرداخت به برندگان مناقصه در بازار روز بعد به دو صورت انجام می‌شود: ۱- پرداخت بر مبنای پیشنهاد و ۲-پرداخت یکنواخت. در نظام پرداخت بر مبنای پیشنهاد، تسویه با هر شرکت‌کننده در بازار، در صورت پذیرش پیشنهادش، برابر با قیمت پیشنهادی از طرف خود او خواهد بود. در نظام پرداخت یکنواخت، تسویه‌حساب با تمام شرکت‌کنندگان بدون توجه به قیمت پیشنهادی ایشان، تنها بر اساس قیمت تسویه بازار و به‌صورت یکسان انجام می‌شود. به بیان دیگر انرژی الکتریکی از تمام تولیدکنندگان با قیمت تسویه خریداری می‌شود و به تمام خریداران نیز با همین قیمت فروخته می‌شود (*Shamsini- Ghiasvand, Afshar, Bigdeli, 2015: 19-20*).

با توجه به مفاهیم بیان‌شده، در ادامه به بررسی مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته از سوی محققین مختلف پرداخته شده است.

یزدانی نژاد و امجدی در تحقیقی مسئله خودبرنامه‌ریزی را با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور با در نظرگرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و شدت وزش باد در توربین‌های بادی برای تولیدکننده برق جهت شرکت در بازار روز بعد مورد بررسی قرار داده و از معیار ارزش در معرض خطر شرطی[1] برای اندازه‌گیری ریسک مدل استفاده کرده‌اند (*Yazdaninejad & Amjady, 2017*). خالویی و همکاران 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 سناریو پردازی مدنظر قرار داده‌اند (*Khaloie, Abdollahi, Rashidinejad, & Siano., 2019*). گروهی و انصاری 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

[1]. CVaR

قراردادهای دوجانبه را با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های قیمت و شدت وزش باد مدنظر قرار می‌دهد *(Goroohi Sardou & Ansari, 2020)*. جیائو[1] و همکاران 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 *(Jiao, Chen, Qi, Zhao, & Peng., 2019)*. اسماعیلی و همکاران با رویکرد بهینه‌سازی تصادفی و سناریو پردازی 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 *(Esmaeily et al., 2017)*. در تحقیقی که توسط خراسانی و همکاران انجام شده به مکانیسم پیشنهاددهی در حراج به شیوه پرداخت بر اساس پیشنهاد پرداخته شده است *(Khorasani, Monabbati, & Rajabi Mashhadi., 2018)*.

بهینه‌سازی استوار از رویکردهای جدید مواجهه با عدم قطعیت است که اخیراً 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 مسئله استراتژی پیشنهاددهی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت و تقاضای انرژی الکتریکی با رویکرد استوار مورد بررسی قرار دادند *(Nojavan, Zare, & Mohammadi-Ivatloo., 2017)*. نجفی و همکاران 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 *(Najafi, Pourakbari-Kasmaei, Jasinski, Lehtonen, & Leonowicz., 2022)*. جباری و همکاران با روش بهینه‌سازی استوار و رویکردی ریسک‌گریز که دارای قابلیت تنظیم سطح استواری برای مواجهه با عدم قطعیت قیمت است، مسئله خودبرنامه‌ریزی را به گونه‌ای طراحی نمودند که عدم قطعیت را به‌صورت بازه‌ای مدنظر قرار می‌دهد *(Jabari, Mohammadi-ivatloo, & Mohammadpourfard., 2019)*. وطنی و

[1]. jiao

همکاران 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 *(Vatani et al., 2018)*. یزدانی نژاد و همکاران 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 *(Yazdaninejad, Amjady, & Dehghan., 2020)*. صیاد نوجوان و همکاران 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 *(Nojavan, Nourollahi, Pashaei-Didani, & Zare., 2019)*. جلیلوند نژاد و همکاران یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله خود برنامه‌ریزی 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 *(Jalilvand Nejad et al,. 2016)*.

تبیین مدل پیشنهادی

در این بخش به تشریح مدل پیشنهادی برای مسئله پیشنهاددهی تولیدکننده برق پرداخته شده است. شایان ذکر است که رویکرد پژوهش حاضر در مواجهه با عدم قطعیت رویکردی فازی خواهد بود. در این مدل فرض شده است که قیمت تسویه بازار به‌صورت تخمینی بازه‌ای از قبل تعیین‌شده و مقدار پیش‌بینی شده و بازه نوسانات آن در دسترس است. همان‌طور که قبلاً بیان شد استراتژی پیشنهاددهی قیمت_مقدار برای تولیدکننده برق برای شرکت در بازار برق شامل دو گام می‌باشد؛ گام اول تعیین پله‌های قیمت فروش انرژی الکتریکی قابل عرضه به بازار و گام دوم خودبرنامه‌ریزی بهینه جهت تعیین مقادیر

پیشنهادی انرژی الکتریکی برای هر پله قیمت. از این‌رو ابتدا باید روشی برای تعیین قیمت‌های پیشنهادی به‌صورت پلکانی ارائه و سپس مدلی برای مسئله خودبرنامه‌ریزی طراحی شود که مقدار پیشنهادی انرژی الکتریکی قابل عرضه در بازار برق را برای هر پله قیمت به‌صورت بهینه تعیین کند.

گام اول- پیشنهاددهی قیمت پلکانی

در این پژوهش قیمت تسویه ($\widetilde{\rho_{m_t}}$) به شکل عدد فازی مثلثی $(\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3)$ تعریف شده به طوریکه مقدار تخمینی معادل σ_2 بوده و حداقل و حداکثر مقدار ممکن آن به ترتیب معادل σ_1 و σ_3 خواهد بود. به منظور ترسیم نمودار پلکانی، ρ_t که قیمت پیشنهادی برای ساعت t است باید به گونه‌ای ارائه شود که از قیمت تسویه بازار در این ساعت که به‌صورت $\widetilde{\rho_{m_t}}$ تخمین زده شده، کوچک‌تر باشد تا پیشنهاد قیمت ρ_t در بازار برق پذیرفته شود. کوچک‌تر بودن قیمت پیشنهادی (ρ_t) از قیمت تسویه تخمینی ($\widetilde{\rho_{m_t}}$) یک محدودیت غیر قطعی محسوب می‌شود که با درجات ارضای مختلفی می‌تواند محقق شود و برای بیان آن می‌توان از قواعد منطق فازی بهره برد. با فرض اینکه درجه ارضای محدودیت فازی π در نظر گرفته شود، محدودیت مذکور به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\widetilde{\rho_{m_t}} = (\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3) \quad (۱)$$

$$\rho_t \leq_\pi \widetilde{\rho_{m_t}} \quad (۲)$$

معیارهای امکان[1]، الزام[2] و مژر[3] فازی از جمله قواعدی هستند که برای فازی‌زدایی و قطعی‌سازی محدودیت‌های فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابر قواعد منطق فازی داریم (Dehghan, Shafiei Nikabadi, Amiri, Jabbarzadeh, 2018):

$$\text{Measure } \{A\} = \Delta \text{ Possibility}\{A\} + (1-\Delta) \text{ Necessity } \{A\} \quad (۳)$$
$$0 \leq \Delta \leq 1$$

[1]. possibility

[2] .necessity

[3] .Measure

$$\text{Measure}\{A\} = \begin{cases} \text{Necessity}\{A\}, if\ \Delta = 0 \\ Credibility\{A\}, if\ \Delta = 0.5 \\ \text{Possibility}\{A\}, if\ \Delta = 1 \end{cases} \quad (۴)$$

با تعریف فوق، درجه ارضای محدودیت فازی با معیار مژر و در سطح اطمینان π به این شکل تعریف می‌شود:

$$\text{Me}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} \geq \pi \quad (۵)$$

$$0 \leq \pi \leq 1$$

$$\text{Me}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \Delta\ \text{Pos}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} + (1-\Delta)\ \text{Nec}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} \quad (۶)$$

معیارهای امکان و الزام به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

$$Pos\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} 1 & , if\ \rho_t \leq \sigma_2 \\ \frac{\sigma_3 - \rho_t}{\sigma_3 - \sigma_2} & , if\ \sigma_2 \leq \rho_t \leq \sigma_3 \\ 0 & , if\ \rho_t \geq \sigma_3 \end{cases} \quad (۸)$$

بدین ترتیب محدودیت فازی بر اساس معیار مژر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Me}\{\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \Delta \begin{cases} 1, & if\ \rho_t \leq \sigma_2 \\ \frac{\sigma_3 - \rho_t}{\sigma_3 - \sigma_2}, & if\ \sigma_2 \leq \rho_t \leq \sigma_3 \\ 0, & if\ \rho_t \geq \sigma_3 \end{cases} + (1-\Delta) \quad (۹)$$

$$\begin{cases} 1\,, & if\ \rho_t \le \sigma_1 \\ \frac{\sigma_2-\rho_t}{\sigma_2-\sigma_1}\,, & if\ \sigma_1 \le \rho_t \le \sigma_2 \\ 0\,, & if\ \rho_t \ge \sigma_2 \end{cases}$$

و در نهایت به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Me}\{\rho_t \le \widetilde{\rho_{m_t}}\} = \begin{cases} 1\,, & if\ \rho_t \le \sigma_1 \\ \Delta + (1-\Delta)\left(\frac{\sigma_2-\rho_t}{\sigma_2-\sigma_1}\right), & if\ \sigma_1 \le \rho_t \le \sigma_2 \\ \Delta\ \frac{\sigma_3-\rho_t}{\sigma_3-\sigma_2}\,, & if\ \sigma_2 \le \rho_t \le \sigma_3 \\ 0\,, & if\ \rho_t \ge \sigma_3 \end{cases} \quad (۱۰)$$

بنابر تعاریف فوق برای محاسبه ρ_t مناسب در سطح اطمینان π از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Me}\{\widetilde{\rho_{m_t}} \ge \rho_t\} \ge \pi \ \Rightarrow\ \Delta + (1-\Delta)\left(\frac{\sigma_2-\rho_t}{\sigma_2-\sigma_1}\right) \ge \pi \quad (۱۱)$$

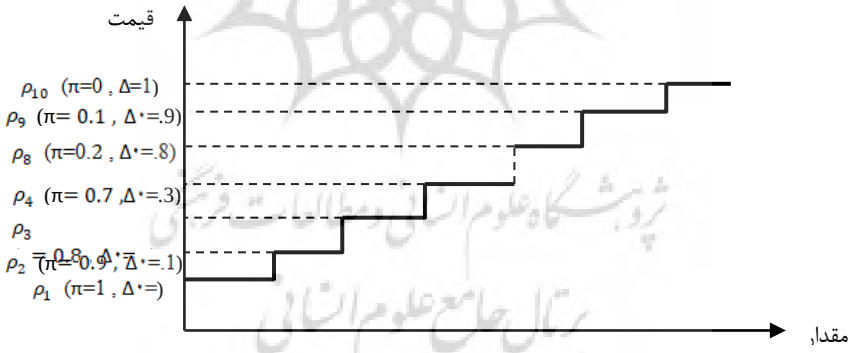
$$\Rightarrow \rho_t \le \frac{(\pi-\Delta)(\sigma_2-\sigma_1)+(\Delta-1)\sigma_2}{\Delta-1} \quad (۱۲)$$

به این ترتیب عبارت $\frac{(\pi-\Delta)(\sigma_2-\sigma_1)+(\Delta-1)\sigma_2}{\Delta-1}$ که یک حد بالا برای مقدار ρ_t است را می‌توان به‌عنوان قیمت پیشنهادی به بازار برق در نظر گرفت.

از آنجایی‌که الزام نسبت به امکان معیار سخت‌گیرانه‌تری است، از این‌رو معیار الزام برای حالت بدبینانه و ریسک‌گریز و معیار امکان برای حالت خوش‌بینانه و ریسک‌پذیر مناسب است. به این ترتیب به منظور تعریف تعداد j پله پیشنهادی برای بازه زمانی t $(\rho_{t1},\dots,\rho_{tj})$ جهت طراحی نمودار پلکانی پیشنهاددهی قیمت، با تخصیص مقادیر متفاوت Δ برای هر پله، نمودار پلکانی پیشنهادی قیمت ρ_t به‌صورت طیفی از بدبینانه تا خوش‌بینانه که در آن به‌تدریج ریسک پذیرش پیشنهاد افزایش پیدا می‌کند، ترسیم خواهد شد. در این صورت پله پیشنهادی اول در بدبینانه‌ترین حالت قرار دارد (Δ=۰) به طوریکه امکان پذیرش آن بالا بوده ولی سود کمی عاید تولیدکننده خواهد شد و پله آخر در خوش‌بینانه‌ترین حالت قرار

دارد (Δ=۱) به طوریکه امکان پذیرش آن کم بوده ولی سود زیادی عاید تولیدکننده خواهد شد. در پله‌های میان این دو نقطه، با افزایش Δ امکان پذیرش پیشنهاد کم می‌شود و در عوض سود عایدی افزایش می‌یابد و به این ترتیب پله‌های پیشنهاد به ترتیب از ریسک کم و سود کم به ریسک بالا و سود بالا طراحی می‌شود.

π درجه ارضای محدودیت یا سطح اطمینان است که به انتخاب تولیدکننده تعیین می‌شود به طوری‌که انتخاب مقادیر بزرگ آن همراه با ریسک کم و انتخاب مقادیر کوچک آن همراه با ریسک زیاد خواهد بود. برای محاسبه مقدار پله‌های پیشنهاد می‌توان علاوه بر مقادیر متفاوت Δ از مقادیر متفاوتی برای π نیز استفاده نمود، به‌نحوی‌که برای پله‌های ابتدایی که باید همراه با ریسک کم باشد، مقادیر بزرگ‌تر و برای پله‌های انتهایی که باید همراه ریسک بیشتر باشد، مقادیر کوچک‌تری از π انتخاب شود. بنابر آنچه بیان شد نمودار پلکانی پله‌های پیشنهاد قیمت بر اساس مقادیر متفاوت π و Δ به‌صورت ارائه شده در شکل ۲ خواهد بود. همان‌طور که در شکل نمایش داده شده است، در پله‌های پیشنهاد، Δ به‌تدریج افزایش و π به‌تدریج کاهش می‌یابد تا ریسک پذیرش پله‌های پیشنهاد به‌تدریج افزایش یابد.



شکل شماره ۲: پله‌های پیشنهاد در سطوح اطمینان متفاوت π

پس از شکل‌گیری نمودار پلکانی قیمت، از مقادیر آن به‌عنوان ورودی‌های مدل خودبرنامه‌ریزی جهت تعیین مقدار انرژی الکتریکی پیشنهادی متناظر با هر پله قیمت استفاده خواهد شد. با اجرای مدل خودبرنامه‌ریزی و مشخص شدن مقادیر پیشنهادی انرژی الکتریکی به ازای هر پله از قیمت، فرایند پیشنهاددهی به اتمام رسیده و نمودار پلکانی

قیمت-مقدار نهایی حاصل‌شده، قابل ارائه به بهره‌بردار بازار برای شرکت در بازار برق خواهد بود.

در جدول ۱، برخی پله‌های پیشنهادی قیمت محاسبه شده بر اساس روش پیشنهادی، نمایش داده شده است. تصمیم‌گیرندگان بنابر میزان ریسک‌پذیری خود می‌توانند با تخصیص مقادیر مختلف دیگری به π و Δ پله‌های متفاوتی مطابق با سطح محافظه کاری خود ایجاد کنند.

جدول شماره۱: محاسبه پله‌های قیمت پیشنهادی-ده هزار ریال- (یافته‌های تحقیق)

ساعت	پله اول	پله سوم	پله پنجم	پله هفتم	پله دهم
۱	۳۸۷/۵	۴۰۰/۱۲	۴۲۱/۱۶	۴۶۳/۲۵	۸۴۲
۲	۳۸۲	۴۰۰/۲۵	۴۳۰/۶۶	۴۹۱/۵	۱۰۳/۹
۳	۳۹۰	۴۰۶/۶۲	۴۳۴/۳۳	۴۸۹/۷۵	۹۸۸/۵
...					
۱۲	۴۱۲/۵	۴۲۶/۸۷	۴۵۰/۸۳	۴۹۸/۷۵	۹۳۰
۱۳	۴۲۵	۴۳۴/۶۲	۴۵۰/۶۶	۴۸۲/۷۵	۷۷۱/۵
۱۴	۴۱۷/۵	۴۳۰/۶۲	۴۵۲/۵	۴۹۶/۲۵	۸۹۰
...					
۲۱	۳۹۰	۴۰۴/۵	۴۲۸/۶۶	۴۷۷	۹۱۲
۲۲	۴۰۰	۴۱۲	۴۳۲	۴۷۲	۸۳۲
۲۳	۳۸۷/۵	۴۰۰	۴۲۰/۸۳	۴۶۲/۵	۸۳۷/۵

گام دوم- مدل‌سازی مسئله خودبرنامه‌ریزی با روش پرداخت بر اساس پیشنهاد

در بازار با مکانیسم پرداخت بر اساس پیشنهاد، تولیدکننده برق برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی پس از تعیین قیمت‌های پیشنهادی، باید مقادیر انرژی الکتریکی تولیدی به ازای هر قیمت در هر ساعت را در یک فرایند بهینه‌سازی مشخص کند. مدل خودبرنامه‌ریزی زیر جهت تعیین مقادیر بهینه انرژی الکتریکی (Q_t) قابل پیشنهاد به بازار به ازای قیمت پیشنهادی به بازار (ρ_t) طرح می‌شود. پارامترهای مدل به‌صورت جدول ۲ تعریف می‌شود:

جدول شماره ۲:اندیس ها، پارامترها و متغیرها

متغیرها			
$C(Q_t)$	هزینه تولید در بازه زمانی t به ازای تولید Q_t		
Q_t	مقدار توان که در بازه زمانی t و به ازای قیمت ρ_t تولید می‌شود		
$Qb_{j,t}$	توان خروجی زیر بازه jام در بازه زمانی t (مگاوات ساعت)		
b_{jt}	متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در زیر بازه jام از بازه زمانی t تولید انجام شود		
u_t	متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در بازه زمانی t تولید انجام شود		
I_t	متغیر صفر و یک که برابر یک است هرگاه در بازه زمانی t پیشنهاد فروش داشته باشد		
پارامترها			
ρ_{max}	سقف قیمت قابل ارائه به بازار	c_t^{SU}	هزینه هر بار راه‌اندازی
ρ_t	قیمت پیشنهادی به بازار در بازه زمانی t	c_t^{SD}	هزینه هر بار توقف
$\widetilde{\rho_{m_t}}$	قیمت تسویه بازار تخمینی فازی در بازه زمانی t	Q^{min}	حداقل توان تولیدی که در صورت فعال بودن واحد نیروگاهی باید حتماً تولید شود
ρ_{m_t}	قیمت تسویه بازار واقعی در بازه زمانی t	Q^{max}	حداکثر توان تولیدی
u^0	وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد در ابتدای افق برنامه‌ریزی	Qb_j^m	حداکثر توان تولیدی در بازه jام از منحنی تولید (مگاوات ساعت)
c_{min}	حداقل هزینه تولید	R^{up}	حداکثر نرخ افزایش تولید (مگاوات / ساعت)
c_0	هزینه ثابت هر ساعت کارکرد واحد	R^{down}	حداکثر نرخ کاهش تولید (مگاوات / ساعت)
c_j	هزینه سوخت به ازای تولید در بازه jام از منحنی تولید (ریال/ مگاوات ساعت)	R^{SU}	نرخ افزایش تولید از حالت توقف (مگاوات / ساعت)
$cost_t^{SU}$	کل هزینه راه‌اندازی مجدد در ساعت tام	R^{SD}	نرخ کاهش تولید برای رسیدن به حالت توقف (مگاوات /ساعت)
$cost_t^{SD}$	کل هزینه توقف در ساعت tام	M	عدد خیلی بزرگ
اندیس‌ها			
T	ساعات شبانه روز	J	زیر بازه‌های منحنی شکسته خطی هزینه تولید

در ادامه مدل ریاضی خودبرنامه‌ریزی طراحی شده ارائه و تشریح شده است.

Max: (۱۳)

$$\tilde{z} = \sum_{t=1}^{N_t}[p_t.(\sum_{J=1}^{N_J} Qb_{jt} + Q^{min}.I_t) - C(Q_t)]$$

St:

$$C(Q_t) = c_0 u_t + \sum_j c_j . Qb_{j,t} + c_1 . Q^{min}.u(t) + \qquad \forall t \qquad (۴۴)$$

$cost\ _t^{SU} + cost\ _t^{SD}$

$Qb_{j,t} \leq Qb_j^m _ Qb_{j-1}^m$	$\forall$ t , j=2, …, N_j	(۵۵)
$Qb_{j,t} \geq Qb_j^m - Qb_{j-1}^m$ - M. $(1 - b_{j+1,t})$	$\forall$ t , j=2, …, N_j	(۶۶)
$Qb_{1,t} \leq Qb_1^m - Q^{min}$	$\forall$ t	(۷۷)
$Qb_{1,t} \geq Qb_1^m - Q^{min}$ - M. $(1 - b_{2,t})$	$\forall$ t	(۸۸)
$\varepsilon . Qb_{j,t} \leq b_{j,t} \leq$ M. $Qb_{j,t}$	$\forall$ t , j	(۹۹)
$Q_t = \sum_j Qb_{j,t} + Q^{min} . u_t$	$\forall$ t , j	(۲۰)
$cost_t^{SU} \geq c^{SU} (u_t - u_{t-1})$	t=2, …, N_T	(۲۱)
$cost_t^{SD} \geq c^{SD} (u_{t-1} - u_t)$	t=2, …, N_T	(۲۲)
$cost_1^{SU} \geq c^{SU} (u_1 - u^0)$		(۲۳)
$cost_1^{SD} \geq c^{SD} (u^0 - u_1)$		(۲۴)
q_{t+1} - $q_t \leq R^{UP} u_t + R^{SU} (1 - u_t)$	t=1, …, N_T -1	(۲۵)
q_t - $q_{t+1} \leq R^{down} u_{t+1} + R^{SD} (1 - u_{t+1})$	t=1, …, N_T -1	(۲۶)
$u(t) \geq I(t)$	$\forall$ t	(۲۷)
I(t) , u(t) , $b_{jt} \in \{0,1\}$	$\forall$ t , j	(۲۸)
$I_t (\widetilde{\rho_{m_t}} , \rho_t) = \begin{cases} 1 & c_{min} \leq \rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \\ 0 & \widetilde{\rho_{m_t}} \leq \rho_t \leq \rho_{max} \end{cases}$	$\forall$ t	(۲۹)

تابع هدف فوق بیانگر سود تولیدکننده در صورت ارائه پیشنهاد به بازار برق و پیشنهاددهی برای ۲۴ ساعت روز بعد است و از دو عبارت درآمد فروش و هزینه تولید تشکیل می‌شود و شامل تفاضل مجموع هزینه‌های تولید مقادیر Q_t واحد انرژی الکتریکی از مجموع درآمدهای فروش همان مقادیر(Q_t) به ازای قیمت‌های پیشنهادی ρ_t برای هر ساعت در صورت پذیرفته شدن پیشنهاد قیمتی ρ_t در آن ساعت ($I_t = 1$) است. از آنجاییکه تابع هزینه تولید تابعی غیرخطی از مقدار تولید است، برای جلوگیری از غیرخطی شدن آن، از یک تابع شکسته خطی استفاده شده به این نحو که هر بازه t به N_j زیر بازه تقسیم می‌شود و نرخ هزینه سوخت برای هر زیر بازه j به ازای هر مگاوات تولید برابر با c_j می‌باشد که با ضرب آن در مقدار تولیدی در هر زیر بازه ($Qb_{j,t}$) هزینه تولید در آن زیر بازه محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۴ بیانگر تابع هزینه تولید به ازای تولید مقدار Q_t واحد انرژی الکتریکی است. مقدار Q^{min} حداقل مقداری است که در صورت روشن بودن نیروگاه در بازه زمانی t باید تولید شود. روابط ۱۵ تا ۱۹ میزان تولید در هر زیر بازه را تعیین می‌کنند و همچنین تضمین می‌کنند که به هر زیر بازه تنها زمانی مقداری تخصیص داده می‌شود که زیر بازه قبلی به‌طور کامل مورد استفاده قرار گرفته باشد. رابطه ۲۰ خروجی کل واحد را نشان می‌دهد. روابط ۲۱ تا ۲۴ برای محاسبه هزینه‌های توقف و راه‌اندازی مجدد واحد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روابط ۲۵ و ۲۶ نرخ کاهش و افزایش خروجی و نرخ توقف و راه‌اندازی واحد را نشان می‌دهد. رابطه ۲۷ بیانگر این است که فعال بودن واحد نیروگاهی در بازه زمانی t لزوماً به معنای داشتن فروش در آن بازه زمانی نیست و به تعبیر دیگر ممکن است در بازه زمانی t نیروگاه در مدار تولید باشد (u(t)=1) ولی فروش نداشته باشد (I(t)=0). رابطه ۲۹ بیان می‌کند در صورتیکه قیمت پیشنهادی به بازار از قیمت تسویه بازار تخمینی کمتر باشد، مدل پیشنهاد فروش را پذیرفته شده فرض نموده و متغیر I مقدار یک می‌گیرد و در غیر این صورت مدل پیشنهاد فروش را رد شده فرض نموده و متغیر I مقدار صفر می‌گیرد. رابطه ۲۹ معادل است با:

If $(\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}})$: I_t $(\widetilde{\rho_{m_t}}, \rho_t)$=1 (۳۰)
Else: I_t $(\widetilde{\rho_{m_t}}, \rho_t)$=0

که به صورت زیر مدل شده است (M عددی بزرگ):

$$M.I_t + \rho_t \geq \widetilde{\rho_{m_t}} \quad (۳۱)$$

$$\rho_t - M.(1-I_t) \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \quad (۳۲)$$

در حالتی که قیمت پیشنهادی تولیدکننده از قیمت تسویه تخمینی کمتر باشد پیشنهاد احتمالاً پذیرفته خواهد شد، در این حالت متغیر I_t باید مقدار یک بگیرد تا روابط ۳۱ و ۳۲ برقرار باشد. در حالتی که قیمت پیشنهادی تولیدکننده بیشتر از قیمت تسویه تخمینی باشد، پیشنهاد احتمالاً رد خواهد شد در این حالت متغیر I_t باید مقدار صفر بگیرد تاروابط فوق برقرار باشد.

وجود روابط فازی در مدل موجب غیرقطعی شدن آن می‌شود که باید به شیوه‌ای این عدم قطعیت را برطرف نمود. کوچک‌تر بودن یک عدد قطعی از یک عدد فازی، مفهومی است که در سطوح مختلفی از اطمینان می‌تواند محقق شود.

$$\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \rightarrow \rho_t \lesssim_{\pi} \widetilde{\rho_{m_t}} \quad (۳۳)$$

رابطه ۳۳ بیان می‌کند که در سطح اطمینان (π) این محدودیت فازی باید محقق شود. با افزایش مقدار π ریسک عدم برقراری محدودیت فوق کاهش پیدا می‌کند و رابطه ۳۳ در سطح اطمینان بالاتری قابلیت تحقق پیدا می‌کند. رابطه ۳۳ را می‌توان با معیار اعتبار[1] و با درجه اطمینان π از حالت غیرقطعی خارج و به‌صورت قطعی زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} \widetilde{\rho_{m_t}} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \\ \rho_t \lesssim_{\pi} \widetilde{\rho_{m_t}} \end{cases} \rightarrow \text{credibility}\left[\rho_t \leq \widetilde{\rho_{m_t}}\right] \geq \pi \quad (۳۴)$$

$$\rightarrow \rho_t \leq \delta_2 - (2\pi - 1)(\delta_2 - \delta_1) \quad (۳۵)$$

بنابر روابط ۳۴ و ۳۵ روابط ۳۱ و ۳۲ بر اساس معیار اعتبار فازی به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\mathrm{M}I_t + \rho_t \geq \widetilde{\rho_{m_t}} \rightarrow \rho_t + \mathrm{M}(I_t) \geq \delta_2 - (2\pi - 1)(\delta_2 - \delta_1) \quad (۳۶)$$

$$\rho_t - \mathrm{M}(1 - I_t) \leq \widetilde{\rho_{m_t}} \rightarrow \rho_t - \mathrm{M}(1 - I_t) \leq \delta_2 - (2\pi - 1)(\delta_2 - \delta_1) \quad (۳۷)$$

اعتبار مدل با تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل مورد سنجش قرار گرفت. در ازای افزایش یا کاهش در یک پارامتر به شرط ثابت ماندن بقیه پارامترها، در صورتیکه تغییرات در رفتارمتغیرهای خروجی بر اساس ادبیات پژوهش و یا نظر افراد خبره مورد تأیید قرار گیرد 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.

[1]. credibility

مثال عددی

مسئله طرح‌شده در این مقاله بر اساس ویژگی‌های یک نیروگاه‌های حرارتی ارائه شده و مورد مطالعه یک نیروگاه گازی دارای توربین‌های زیمنس V94.2 می‌باشد. این توربین‌ها از توربین‌های پرکاربرد در ایران می‌باشد.

نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی، ۲۳ نمودار پلکانی قیمت – مقدار برای هر یک از ۲۳ ساعت از روز بعد خواهد بود. به منظور تصمیم‌گیری مناسب و مدیریت ریسک تصمیم‌گیری، مدل به ازای هر سطح اطمینان (مقادیر مختلف π) ده بار(به تعداد پله‌های قیمت) اجرا شده است. به دلیل زیاد بودن دفعات اجرای مدل به بیان چند نمونه از نتایج اکتفا شده است. نتایج به دست آمده از به‌کارگیری مدل پیشنهادی برای پله چهارم قیمت و سطوح مختلفی از اطمینان در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول شماره۳: مقادیر تولید انرژی الکتریکی در سطوح اطمینان مختلف

ساعات روز	$Q_{\pi=1}$	$Q_{\pi=0}$	$Q_{\pi=0.8}$	$Q_{\pi=0.7}$	$Q_{\pi=0.6}$	$Q_{\pi=0.5}$	$Q_{\pi=0.4}$	$Q_{\pi=0.3}$	$Q_{\pi=0.2}$	$Q_{\pi=0.1}$
۱	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
...										
۱۱	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
...										
۱۸	۰	۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
...										
۲۳	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
سود (هزار ریال)	۰	۰	۵۷۳۷۶۱۴	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰	۲۶۱۵۵۰

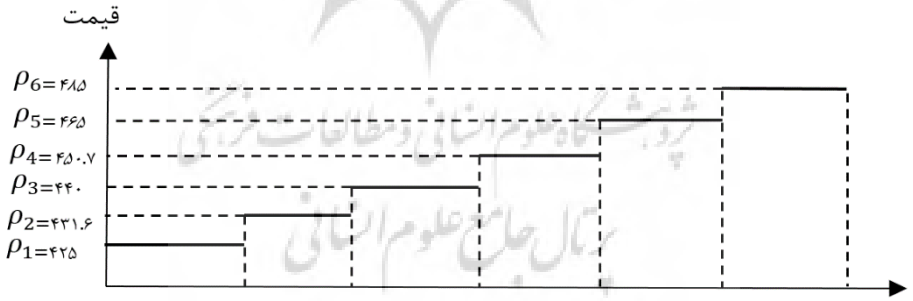
مقادیر انرژی الکتریکی تولیدی متناظر با قیمت پیشنهادی هر پله در سطوح مختلف اطمینان بر مبنای معیار اعتبار فازی در ساعت اول محاسبه و در جدول ۴ نمایش داده شده است. مطابق جدول ۴ در سطح اطمینان ۰/۸ مقدار انرژی تولیدی متناظر با پله سوم

قیمت برابر ۱۵۰، مقدار انرژی تولیدی متناظر با پله چهارم قیمت برابر ۷۰ و مقدار انرژی تولیدی متناظر با پله پنجم قیمت برابر صفر مگاوات خواهد بود.

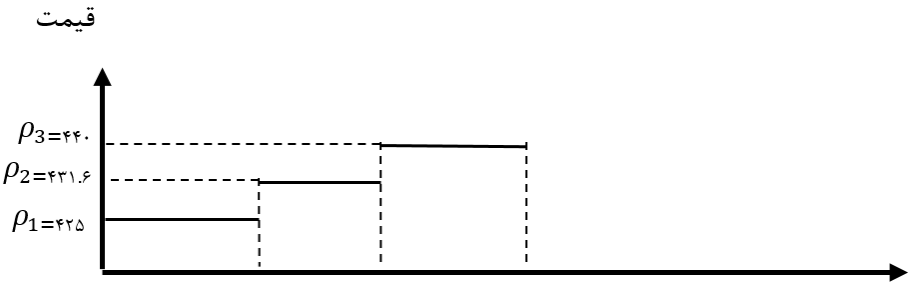
جدول شماره۴: مقادیر تولید به ازای پله های قیمت جهت ارائه به بازار برق برای ساعت۱

	مقادیر تولید به ازای مقادیر مختلف π (مگاوات)									
	π = 1	π = 0.9	π = 0.8	π = 0.7	π = 0.6	π = 0.5	π = 0.4	π = 0.3	π = 0.2	π = 0.1
پله اول	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله دوم	۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله سوم	۰	۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله چهارم	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله پنجم	۰	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله ششم	۰	۰	۰	۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
پله هفتم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰	۷۰	۱۵۰	۱۵۰
پله هشتم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

در صورت تمایل به پیشنهاددهی با چندین قیمت به صورت پلکانی، ابتدا باید قیمت هایی که امکان پذیرفته شدن در سطح اطمینان مورد نظر تولیدکننده را دارند مشخص شوند.



شکل شماره ۳: نمودار پلکانی قیمت مقدار در ساعت ۱۰ به ازای π = ۰/۴



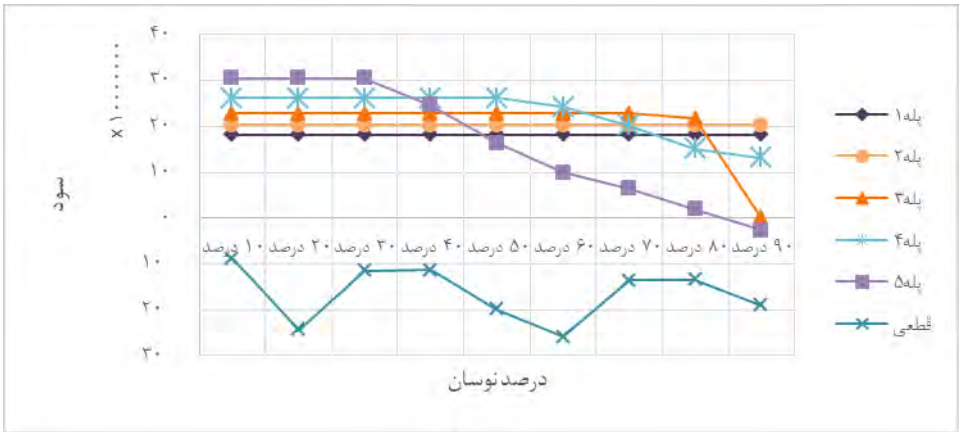
شکل شماره۴: نمودار پلکانی قیمت مقدار در ساعت ۱۰ به ازای ۰/۸ = π

نمودار پلکانی قیمت برای ساعت ۱۰ به ازای ۰/۴ = **π** و ۰/۸ = **π** در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. همانطورکه در نمودارهای شکل ۳ و ۴ مشخص است در سطح اطمینان ۰/۸ تنها سه پله از ده پله پیشنهادی قیمت، امکان پذیرفته شدن داشته و تولیدکننده بقیه پله‌های پیشنهادش را رد شده فرض می‌کند. در سطح اطمینان ۰/۴ هم شش پله از قیمت‌های پیشنهادی امکان پذیرفته شدن داشته و بقیه پله ها رد شده فرض می‌شود. ازاین‌رو تولیدکننده برای پیشنهاددهی پلکانی فقط به ازای پله‌های پذیرفته شده قیمت در سطح اطمینان انتخابی خود، اقدام به برنامه‌ریزی تولید می‌کند و ظرفیت تولید خود را به دلخواه بین قیمت های پذیرفته شده تقسیم می کند.

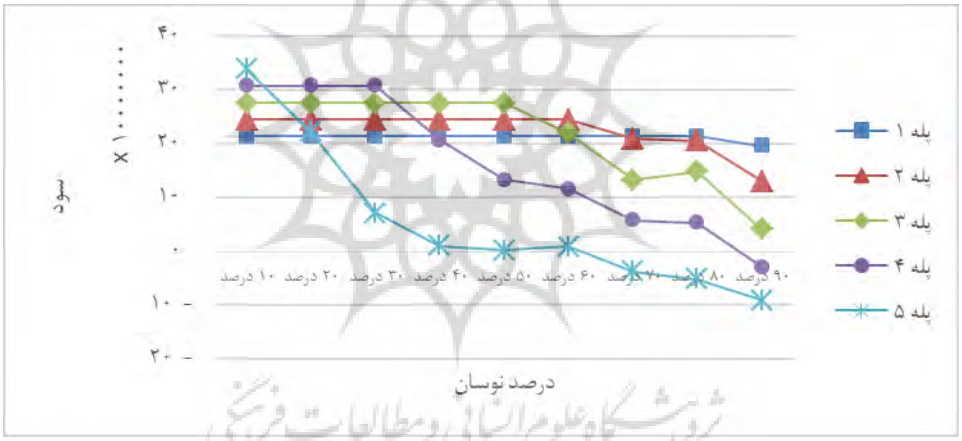
بررسی استواری مدل پیشنهادی

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. بنابراین در هر سطح استواری، پاسخ بهینه با توجه به این واقعیت بدست آمده که مقادیر پارامترهای غیر قطعی می‌توانند در فاصله اطمینان مورد نظر (مثلا ده درصد انحراف از مقدار اسمی پارامتر مورد نظر) نوسان داشته باشد، بدون اینکه تابع هدف بهینگی خود را از دست بدهد. از این رو برای بررسی استواری مدل پیشنهادی یک بار مسئله در حالت قطعی و با قراردادن مقدار اسمی متغیرهای عدم قطعیت و بار دیگر در سطوح مختلف نوسان از مقدار اسمی و با مدل استوار پیشنهادی حل شده و نتایج مقایسه می‌شوند. از این‌رو، جهت سنجش استواری

مدل پیشنهادی در شرایط واقعی، از شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی به معنای محقق‌سازی وقوع پارامترهای غیر قطعی است که به منظور ارزیابی کیفیت جواب‌ها در بهینه‌سازی استوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب که با تولید تعداد زیاد مقادیر تصادفی در بازه [(مقدار اسمی * درصد نوسان)±مقدار اسمی] با نوسانات ۱۰درصد تا ۹۰ درصد مدل به دفعات اجرا و متوسط نتایج محاسبه شده است. طبق شبیه سازی انجام شده برای حالت قطعی (مقدار اسمی قیمت) و حالت استوار پیشنهادی (پله‌های مختلف قیمت)، نتایج به صورت نمودار شکل ۵ ترسیم شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در صورت ارائه مقادیر اسمی قیمت‌های تسویه بازار، به‌ازای هر میزان نوسان، مقدار سود منفی خواهد بود ولی در صورت ارائه قیمت‌های روش پیشنهادی، در پله‌های اول تا پنجم مقدار متوسط سود به ازای نوسانات مختلف مثبت و به ازای پله‌های ششم تا دهم منفی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار سود در پله های اول و دوم به ازای کلیه نوسانات قیمت از مقدار اسمی ثابت است. در پله سوم تا نوسان ۷۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی، سود ثابت و سپس انحراف پیدا می‌کند به طوریکه تا نوسان ۸۰ درصدی از مقدار اسمی، مقدار سود تا ۵ درصد انحراف پیدا می‌کند. در پله چهارم، مقدار سود تا نوسان ۵۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی ثابت و به ازای نوسان‌های ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی به ترتیب ۷، ۲۳، ۴۲ و ۵۰ درصد انحراف پیدا می‌کند. مقدار سود در پله پنجم تا نوسان ۳۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی ثابت و سپس به ازای نوسان‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی به ترتیب به اندازه ۱۹، ۴۶، ۶۷، ۷۹، ۹۳ و ۱۰۰ درصد انحراف پیدا می‌کند. از پله ۵ به بالا مقدار متوسط سود منفی خواهد بود و این مسئله به دلیل این است که به ازای این پله‌ها فقط در تعداد محدودی از ساعات روز، پیشنهاد قیمت پذیرفته می‌شود و در بقیه ساعات پیشنهاد قیمت رد می‌شود که به دلیل هزینه‌های روشن بودن نیروگاه سود منفی خواهد بود.



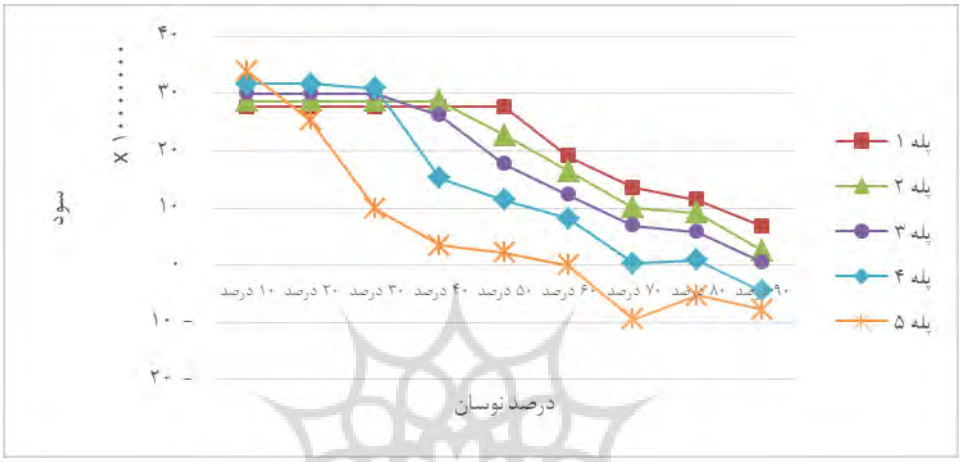
شکل شماره۵: نمودار رفتار پله‌های پیشنهادی در نوسانات ۱۰ تا ۹۰ درصدی قیمت از مقدار اسمی به ازای مقادیر مختلف π و Δ



شکل شماره۶: نمودار رفتار پله‌های پیشنهادی به ازای Δ=۰/۴ و به ازای مقادیر مختلف π

برای بررسی اثربخشی روش پیشنهاد قیمت ارائه شده، مدل در دو حالت Δ ثابت و π متغیر و همچنین π ثابت و Δ متغیر، اجرا و نتایج مورد بررسی قرارگرفت. در حالت Δ ثابت و π متغیر با بررسی‌های مختلف مشخص شد که بیشترین میزان سود در Δ=۰/۴ اتفاق می‌افتد از این رو پله‌های پیشنهاد با Δ=۰/۴ و π های مختلف ساخته شد و رفتار آنها در نوسانات مختلف محاسبه و در نمودار شکل ۶ ترسیم شد. همانطور که مشاهده

می‌شود پله‌های قیمت نسبت به نمودار شکل ۵ از نظر استواری رفتار بهتری از خود نشان نمی‌دهند.



شکل شماره۷: نمودار رفتار پله‌های پیشنهادی به ازای π=۰/۵ و به ازای مقادیر مختلف Δ

در نمودار شکل ۷ حالت π ثابت و Δ متغیر با بررسی‌های مختلف مشخص شد که بیشترین میزان سود در π =۰/۵ اتفاق می‌افتد از این رو پله‌های پیشنهاد با π =۰/۵ و Δ های مختلف ساخته شد و رفتار آنها در نوسانات مختلف محاسبه شد. همانطور که مشاهده می‌شود این بار نیز پله‌های قیمت نسبت به نمودار شکل ۵ از نظر استواری رفتار بهتری از خود نشان نمی‌دهند.

از این رو پله‌های قیمت که در جدول ۱ و بر اساس تغییر در هر دو مقدار Δ و π محاسبه شده اند، بیشترین پایداری را در برابر نوسانات از خود نشان می‌دهند و این بیانگر مطلوبیت قیمت‌دهی پیشنهادی می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در بازار رقابتی برق عامل غیرقطعی قیمت تسویه بازار، مسئله پیشنهاددهی را به یک مسئله بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت تبدیل می‌کند و تولیدکننده ناچار به اتخاذ رویکردی برای مواجهه با این عدم قطعیت خواهد بود. در این پژوهش مدلی استوار در برابر

عدم قطعیت قیمت با قابلیت تنظیم سطح استواری ارائه شده است به گونه‌ای که بهینگی تصمیم تولیدکننده نسبت به نوسانات قیمت در سطوح مختلفی از اطمینان حفظ شود. روش پیشنهادی در دو گام طرح‌ریزی شده است که در گام اول پله‌های قیمت به گونه‌ای تعیین گردید که پله‌های پایین‌تر نسبت به پله‌های بالاتر، دارای ریسک عدم پذیرش کمتری باشد و به‌تدریج و با افزایش پله‌ها این ریسک نیز افزایش یابد که این امر منجر به افزایش قدرت تصمیم‌گیری تولید کننده در مواجهه با شرایط مختلف حاکم بر بازار برق خواهد شد. در گام دوم مدلی استوار به منظور خودبرنامه‌ریزی بهینه واحد نیروگاهی بر اساس محدودیت‌های فنی نیروگاه طرح گردید که با اخذ قیمت‌های گام اول به عنوان یکی از ورودی‌های مدل، میزان بهینه تولید واحد نیروگاهی در هر پله قیمتی را به صورت مجزا در ساعت‌های مختلف شبانه روز و در سطح اطمینان مطلوب تولیدکننده تعیین خواهد نمود.

جهت اعتبارسنجی روش پیشنهادی از رویکردهای تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی استفاده شد و نشان داده شد که با وقوع نوسانات مختلف در پارامتر عدم‌قطعیت، سود حاصل شده در پله‌های مختلف نسبتا استوار خواهد بود. به طور مشخص در پله‌های ۱ و ۲ نسبت به کلیه نوسان‌ها، در پله سوم تا ۷۰ درصد نوسان، در پله چهارم تا ۵۰ درصد نوسان و در پله پنجم تا ۳۰ درصد نوسان، بهینگی سود حفظ شده و تصمیم اخذ شده دارای استواری خواهد بود.

همچنین نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل استوار نشان می‌دهد که پله اول قیمتی به ازای کلیه سطوح اطمینان، پله دوم به ازای سطوح اطمینان تا π=۰/۹، پله سوم تا سطح اطمینان π=۰/۸، پله چهارم تا سطح اطمینان π=۰/۷، پله پنجم تا سطح اطمینان π=۰/۶، پله ششم تا سطح اطمینان π=۰/۵ و پله هفتم تا سطح اطمینان π=۰/۲ نتایج مطلوبی را برای تولیدکننده به همراه خواهد داشت.

در نتیجه هر تولیدکننده می‌تواند با توجه به میزان ریسک‌پذیری و در سطح اطمینان مطلوب خود، تعدادی از این پله‌ها را به عنوان قیمت پیشنهادی به بازار برق ارائه دهد. در این راستا به منظور عملیاتی نمودن نتایج، توصیه می‌شود تولیدکننده کاملا ریسک گریز پله‌های قیمتی ۱ و ۲، تولیدکننده با ریسک پذیری متوسط، پله‌های قیمتی ۲، ۳و ۴ و

تولیدکننده ریسک‌پذیر پله‌های قیمتی ۴ و ۵ را به عنوان مبنای پیشنهاددهی در بازار برق مورد استفاده قرار دهند.

در نهایت به منظور بررسی مقایسه‌ای عملکرد مدل، مسئله در حالت قطعی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و با مقدار اسمی قیمت بازار حل گردید و عملکرد آن در شرایط وقوع نوسانات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل استوار پیشنهادی در کلیه سطوح اطمینان عملکرد بهتری از منظر سود نسبت به مدل قطعی در شرایط وقوع عدم قطعیت خواهد داشت.

از آنجایی‌که در این پژوهش صرفا به تصمیم‌گیری برای شرکت در بازار روز بعد انرژی الکتریکی پرداخته شده و با توجه به اینکه علاوه بر بازار روز بعد ، تولیدکنندگان می‌توانند انرژی الکتریکی تولیدی خود را به طور همزمان در بازار رزرو انرژی الکتریکی و یا بورس انرژی نیز به فروش برسانند و یا از طریق قراردادهای دوجانبه بلند مدت با مشتریان وارد معامله شوند، لذا پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند برای تحقیقات آتی، جهت توسعه تحقیق حاضر، قراردادهای دوجانبه و بورس انرژی و یا بازار رزرو انرژی را نیز در کنار بازار روز بعد مورد بررسی قرار دهند. همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش مکانیسم پرداخت بر اساس پیشنهاد مورد بررسی قرار گرفته است، لذا علاقه‌مندان می‌توانند در تحقیقات آتی مکانیسم پرداخت یکسان را نیز مورد بررسی قرار دهند.

منابع فارسی

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

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., Sha, M., Amiri, M., & Jabbarzadeh, A. (2018). Computers & Industrial Engineering Hybrid robust , stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. 123(May), 220–231.

Esmaeily, A., Ahmadi, A., Raeisi, F., Ahmadi, M. R., Esmaeel Nezhad, A., & 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.

Farsaee, A., Nazemi, A. (2015), Computing Competitive Equilibrium in Pay-as-Bid Auction, Quarterly Energy Economics Review.

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).

Itaba, S., & Mori, H. (2017). A Fuzzy-Preconditioned GRBFN Model for Electricity Price Forecasting. Procedia Computer Science, 114, 441–448.

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.

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 and Energy Systems, 107, 422–437.

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 and Energy Systems, 110(February 2018), 598–612.

Khorasani, J., Monabbati, E., & Mashhadi, H. R. (2018). Designing an Optimal Linear Bid Function in a Pay-as-Bid Electricity Market. In International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization .© 2018 IECO… (Vol. 1, Issue 2).

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.

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 and Energy Systems, 105(January 2018), 237–248.

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.

Nowotarski, J., & Weron, R. (2015). Computing electricity spot price prediction intervals using quantile regression and forecast averaging. Computational Statistics, 30(3), 791–803.

Sheikh-el-eslami, M. K., & Seifi, H. (2006). Short-term electricity price forecasting using a fuzzy stochastic predictor. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 5 pp.-,

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.

Weron, R. (2014). Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. International Journal of Forecasting, 30(4), 1030–1081.

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).

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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی