



Optimal Pricing of Microgrids Considering Government Subsidies: A Stackelberg Game Approach

Razieh Keshavarzfar^{a*}, Sheida Rahimi^a

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Keshavarzfar R, Rahimi Sh. Optimal Pricing of Microgrids Considering Government Subsidies: A Stackelberg Game Approach. *Industrial Innovations*. 2025;3(2):79-98.

 <https://doi.org/10.61882/jii.3.2.79>

KEYWORDS

Microgrid;
Fuzzy;
Subsidy; Renewable Power;
Pricing.

ABSTRACT

This paper investigates the problem of optimal electricity pricing in microgrids under government subsidies and demand uncertainty. A three-level Stackelberg game model is developed to analyze the hierarchical interaction among the key players in the energy market. In this structure, the government acts as the leader, determining the optimal level of subsidy, while the microgrid and the distribution network operator (DNO) are the followers, each maximizing their respective profits in response to the subsidy policy. Two distinct scenarios are analyzed. In the centralized scenario, the government, DNO, and microgrid cooperate to maximize the overall social welfare and system profit. In contrast, in the decentralized scenario, each entity optimizes its own objective function independently, and the government strategically adjusts the subsidy to ensure market stability and efficiency. Numerical analyses demonstrate that increasing the subsidy level significantly reduces the equilibrium price of electricity, enhances demand, and improves total social profit. Sensitivity analysis further reveals that parameters such as price elasticity and investment cost have a strong influence on the optimal prices and profits. The results highlight that well-designed government subsidies can play a crucial role in promoting sustainable microgrid development and improving energy market performance.

Extended Abstract

1. Introduction

With the growing concerns about climate change and the limitations of fossil fuel resources, there has been an increasing focus on renewable energy sources and distributed generation (DG) systems. Distributed generation centers are smaller than central power plants and supply energy to their local areas or nearby regions. This proximity helps minimize energy losses in transmission lines. Although DG systems are not intended to replace central power plants, they provide a reliable, efficient, and cost-effective method of meeting energy demand. Given the limited availability of land, increasing energy demand, and environmental impacts, the possibility of adding new central power plants and transmission lines is rare. Therefore, meeting demand during peak hours becomes a significant challenge. By establishing distributed generation sources close to consumers, their energy needs can be effectively met. Furthermore, with the growing number of regulations aimed at minimizing carbon emissions and combating climate change, and the increasing violations of energy sector regulations, DG systems have gained significant attention.

2. Modeling and formulation

* Corresponding author.

E-mail address: raziehkeshavarz@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.3.2.79>

Received: September 9, 2025; Received in revised form: November 3, 2025; Accepted: November 28, 2025.

Article type: Research Paper



In this section, a pricing model for microgrids is presented by considering government subsidies for each unit of electricity sold by distribution companies or microgrids within the power supply network. The present study is based on the model proposed by [5], in which the interaction between the microgrid and the distribution network operator (DNO) was analyzed within the framework of a bi-level game. However, the current research introduces several fundamental differences and conceptual developments compared to that model:

- Incorporating the role of the government into a Stackelberg game, where the government determines the subsidy level, and the microgrid and DNO respond to this decision.
- Considering fuzzy demand (\tilde{a}) to model uncertainty in the electricity market, thereby improving the accuracy of economic estimations.
- Analyzing two distinct scenarios (centralized and decentralized) instead of a single fixed framework, enabling a comparison between full cooperation and independent decision-making.

Overall, although this work is inspired by the theoretical structure of [5], the inclusion of the governmental policy-making dimension elevates the model from a purely economic interaction to a policy-oriented decision-making framework. The microgrid consists of renewable energy generators such as solar panels, wind turbines, and others. It first supplies its own consumption using the electricity generated from its resources, and then sells the surplus electricity to the DNO at the wholesale price w . The DNO adds a transportation price l to the wholesale purchase price and then sells the electricity to the final consumer. This added amount represents the DNO's profit. Therefore, the final retail price of electricity sold to consumers is $p = w + l$. Let e denote the subsidy allocated to the distribution network operator, and e' the subsidy allocated to the microgrid. We assume that the government assigns subsidies to both the wholesale selling price and the transportation price. Consequently, after the allocation of subsidies, the wholesale and distribution prices become $w - e'$ and $l - e$, respectively. Here, q_0 represents the amount of electricity consumed by the microgrid itself, and h denotes the profit earned by the microgrid per unit of electricity, which is considered a constant based on real-world conditions.

3. Conclusion

The findings of this study are derived from the numerical results of two simulated scenarios, while several factors—such as investment costs, risk-averse behavior, and additional incentive mechanisms—were kept outside the scope of the proposed model. Although the analysis relies on assumptions of complete information and linear demand, the framework can be extended to settings with stochastic demand or incomplete information, offering valuable opportunities for future research. Moreover, the robustness of the model's outcomes could be examined under economic shocks or shifts in subsidy policies to better understand the stability of the proposed pricing mechanism. Employing multi-period equilibrium formulations or agent-based simulation approaches may provide a more realistic representation of market dynamics and strategic interactions among stakeholders. For analytical simplicity and to focus on the role of government subsidies, the study assumes zero generation cost for renewable energy units within the microgrid. While this assumption is commonly used in theoretical research due to the negligible marginal cost of solar and wind power after installation, real-world conditions involve maintenance expenses, operational losses, and efficiency variations. Consequently, the results should be interpreted with these practical limitations in mind.



بهینه‌سازی قیمت‌گذاری میکروگریدها با در نظر گرفتن یارانه‌های دولتی بر پایه مدل بازی استکلبرگ

راضیه کشاورزفرد الف*، شیدا رحیمی ب

الف گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. r.keshavarzfar@iaui.ir

ب گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. shr807@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این مقاله، مسئله بهینه‌سازی قیمت‌گذاری برق در میکروگریدها با در نظر گرفتن اثر یارانه‌های دولتی و عدم قطعیت تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل تعاملات میان بازیگران مختلف بازار، از مدل بازی استکلبرگ سه‌سطحی استفاده شده است که در آن دولت به‌عنوان رهبر، میزان بهینه یارانه را تعیین می‌کند و میکروگرید و شرکت توزیع برق (DNO) به‌عنوان پیروان تصمیمات خود را در دو سناریوی متمایز اتخاذ می‌نمایند. در سناریوی متمرکز، دولت، DNO و میکروگرید به‌صورت یکپارچه عمل کرده و هدف، حداکثرسازی سود کل سیستم است. در مقابل، در سناریوی غیرمتمرکز، هر عامل اقتصادی با هدف حداکثرسازی سود فردی خود تصمیم‌گیری می‌کند و دولت سطح بهینه یارانه را تنظیم می‌نماید. نتایج عددی نشان می‌دهد که افزایش سطح یارانه منجر به کاهش قیمت برق، افزایش تقاضا و بهبود سود اجتماعی می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهایی نظیر کشش قیمتی و هزینه سرمایه‌گذاری تأثیر قابل توجهی بر قیمت و سود بهینه دارند. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که سیاست‌های حمایتی دولت می‌توانند نقشی کلیدی در توسعه پایدار میکروگریدها و بهینه‌سازی ساختار بازارهای برق ایفا کنند.</p>	<p>میکروگرید؛ فازی؛ یارانه؛ نیروی تجدیدپذیر؛ قیمت گذاری. تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷</p>

۱- مقدمه

با توجه به نگرانی‌های فزاینده در مورد تغییرات آب و هوایی و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های تولید پراکنده بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. مراکز تولید پراکنده مراکزی هستند که از نیروگاه اصلی کوچک‌ترند و انرژی منطقه خود یا مناطق نزدیک را تأمین می‌کنند. به همین دلیل از اتلاف انرژی توسط خطوط انتقال اجتناب می‌شود DG ها جایگزین نیروگاه اصلی نیستند اما یک روش قابل اطمینان و کارآمد با صرفه اقتصادی برای تأمین انرژی مورد نیاز هستند. با توجه به محدودیت وسعت زمین افزایش درخواست و تقاضای رو به افزایش مردم برای انرژی و اثرات منفی زیست‌محیطی، امکان اضافه‌کردن نیروگاه‌های اصلی و خطوط انتقال جدید به‌ندرت وجود دارد. پس فراهم کردن تقاضای مصرف‌کنندگان در ساعات اوج مصرف انرژی سخت می‌باشد. با ساخت منابع تولید پراکنده در نزدیک مصرف‌کنندگان باعث تأمین نیاز آنها می‌شوند. با توجه به تخطی از قوانین توسط صنعت انرژی و افزایش قوانین موافق استفاده حداقل از کربن و انتشار آن جهت جلوگیری از تغییرات آب و هوایی، DG ها مورد توجه واقع می‌شود. یک نیروگاه DG می‌تواند شامل طیف وسیعی از نیروهای

* نویسنده مسئول؛

محركه مانند موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین، پنل خورشیدی، توربین بادی، سلول سوختی و غیره باشد. باید به این مسئله توجه داشت که یک DG متشکل از منابع تجدیدپذیر با توجه به اینکه خروجی غیرقابل کنترل دارند، ممکن است خود به تنهایی کیفیت بالایی از فرکانس و تناوب برق نداشته باشد و برای خیلی از کاربردها مناسب نباشند. یکی از مشکلات اساسی DG، مشکلات فنی مربوط به کنترل تعداد زیاد ریزمنابع می‌باشد. DG همان‌طور که مشکلات زیادی را حل می‌کند می‌تواند مشکل آفرین نیز باشد. یک راه مناسب برای تحقق پتانسیل‌های دیجی این است که رویکرد سیستمی را در نظر بگیریم که تولیدها و بارها را در یک منطقه خاص به‌عنوان یک زیر سیستم یا همان میکروگرید ادغام می‌کند. میکروگریدها یک تکنولوژی آینده‌نگر و دست‌یافتنی برای تولید برق از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر تولید پراکنده می‌باشند. با این روش قابلیت اطمینان سیستم برق به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها به‌عنوان واحدهای تولید و توزیع انرژی در مقیاس کوچک، با قابلیت بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر محلی، راهکاری نوین برای بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات شبکه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها با ایجاد انعطاف‌پذیری بیشتر در شبکه و کاهش وابستگی به شبکه اصلی، امکان مدیریت بهتر تقاضا و افزایش سهم انرژی‌های پاک را فراهم می‌آورند. با وجود مزایای فراوان میکروگریدها، هزینه اولیه بالای سرمایه‌گذاری و عدم قطعیت‌های موجود در بازار انرژی، توسعه گسترده آن‌ها را با چالش مواجه ساخته است. برای تشویق سرمایه‌گذاران به ورود به این حوزه و تسریع در روند توسعه میکروگریدها، حمایت‌های دولتی از طریق ارائه تسهیلات و یارانه‌های ضروری است. یارانه‌ها به‌عنوان ابزاری کارآمد، می‌توانند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش جذابیت اقتصادی سرمایه‌گذاری در میکروگریدها کمک کنند. همچنین، حمایت‌های دولتی می‌توانند به ایجاد بازارهای جدید برای محصولات و خدمات مرتبط با میکروگریدها و توسعه فناوری‌های نوین در این حوزه منجر شوند. آن‌ها در فاز اول با تابع توزیع احتمالی، برای هر متغیر غیرقطعی یک سناریو تعریف کردند، سناریوهای محتمل‌تر را انتخاب کردند و مدل هرکدام را ساختند. در فاز دوم یک استراتژی جدید و بهینه‌سازی برای حل این مسئله ارائه شد. شی^۱ و همکاران [۱] به وسیله توسعه یک استراتژی برای مدیریت انرژی به‌صورت آنلاین، کار پیش‌بینی تقاضا و متعادل‌سازی آن با انرژی تولیدی را ساده‌تر کردند. مدیریت انرژی تا پیش از آن به‌صورت برنامه‌ریزی برای روز بعد انجام می‌گرفت که پیش‌بینی خوبی داشت اما دشوار بود. لی^۲ و همکاران [۲] به‌اندازه مناسب میکروگریدها پرداختند که هم نیاز مصرف‌کننده را برطرف کند و هم کمترین هزینه را داشته باشد. آن‌ها با تلفیق روش‌های مدیریت انرژی و اندازه‌سنجی به طرح مدل پرداختند و از روش الگوریتم‌های ژنتیک آن را حل کردند. کومار^۳ و همکاران [۳] نقش مصرف‌کنندگان را در تولید انرژی بررسی کردند. آن‌ها به این مسئله پرداختند که امروزه مشتریان انرژی، فقط نقش مصرف‌کننده ندارد بلکه با کمک میکروگریدها می‌توانند تحت هر شرایط سیستمی مختلف در فرایند عملیاتی شرکت کنند و تولیدکننده نیز باشند. حسین^۴ و همکاران [۴] در سه مرحله به افزایش تاب‌آوری میکروگریدها پرداختند. در مرحله اول تعریف تاب‌آوری سیستم‌های انرژی و شرایط آن را بیان کردند، در مرحله دوم استفاده از یک میکروگرید به‌عنوان یک منبع تاب‌آور را آنالیز کردند و نهایتاً در مرحله سوم یک استراتژی برای افزایش تاب‌آوری میکروگریدها ارائه گردید. اکسو^۵ و لانگ [۵] با کمک بازی استکلبرگ یک مدل نوشتند که اثرات سوبسید دولت بر میکروگرید و همچنین اثرات خارجی دوگانه را بر میکروگرید و محیط خارجی بررسی کردند. آن‌ها معتقد بودند که صرفاً تجدیدپذیر بودن میکروگرید دلیل کافی برای تخصیص سوبسید دولت به آن‌ها نمی‌باشد و باید دلایل دیگر مؤثر بر رفاه اجتماعی نیز بررسی شود. فیلیپو^۶ و همکاران [۶] یک مدل ریاضی تشویقی بر اساس زمان استفاده از انرژی برق را برای شبیه‌سازی روند استفاده از انرژی و تأمین به‌موقع و کافی انرژی برق، طراحی کردند. رجامند [۷] به دلایل مختلف عدم قطعیت در یک میکروگرید می‌پردازد. عدم قطعیت در یک میکروگرید می‌تواند دلایل مختلفی از جمله تقاضای انرژی، انرژی تولیدی ژنراتورها و قیمت بازار باشد. برای سهولت در این مسئله دو راه وجود دارد که یکی سیستم ذخیره انرژی^۷ (Ess) و دیگری پاسخ به تقاضا^۸ (DR) می‌باشد. پاسخ به تقاضا دو حالت دارد؛ در اولی مصرف توسط مشتری به دلیل تعرفه‌های قیمتی کاهش

¹ Shi

² Li

³ Kumar

⁴ Hussain

⁵ Xu

⁶ Philipo

⁷ Energy Storage System

⁸ Demand Response

می‌یابد و در دومی به دلیل کاهش مصرف مشتری به او پرداخت مالی تشویقی انجام می‌گیرد (به‌خصوص در زمان‌های اوج مصرف انرژی). در این مقاله با استفاده از روش اول یعنی پاسخ به تقاضا به کاهش هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت برای سه نوع مصرف‌کننده صنعتی، تجاری و خانگی پرداخته است. کومار و همکاران [۸] یک سیستم مدیریت انرژی کارآمد برای یک ریزشبکه هیبریدی مقیاس کوچک مبتنی بر انرژی بادی-خورشیدی-باتری طراحی کردند. لوو^۱ و همکاران [۹] برای یک میکروگرید متصل به شبکه اصلی شامل منابع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پنل خورشیدی، توربین بادی، سلول سوختی، توربین آبی و سیستم ذخیره انرژی باتری^۲ (BESS)، یک سیستم مدیریت انرژی جدید ارائه دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در خروجی سیستم پنل خورشیدی و توربین بادی و همچنین پیش‌بینی تقاضا یک مدل ریاضی نوآورانه به وجود آوردند. چانداک^۳ [۱۰] میکروگرید، انواع آن، چهارچوب‌های پیاده‌سازی، استانداردهای مورد نیاز و همچنین چالش‌های یک میکروگرید را کاملاً بررسی کرده و توضیح داده است. لی^۴ و لیونگ^۵ [۱۱] بر روی رابطه بین قیمت انرژی، میزان مصرف انرژی تجدیدپذیر و رشد اقتصادی کار کردند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با توجه به اهمیت انرژی تجدیدپذیر، با افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر، رشد اقتصادی در کشورهای اروپایی بالاتر می‌رود. یعنی استفاده از انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر بی‌خطر بودن برای محیط‌زیست، به سودآوری اقتصادی کشور نیز کمک می‌کند. تساو و لین^۶ [۱۲] یک مسئله برنامه‌ریزی قیمت‌گذاری را برای یک شرکت برق و یک مصرف‌کننده برق بررسی کردند. آن‌ها قیمت را برای برق تولیدی از منبع تجدیدناپذیر ثابت در نظر گرفتند و بر روی قیمت آن مالیات سه‌قسمتی اعمال کردند. درحالی‌که سیاست بای‌بک^۷ (BB) را برای منبع تجدیدپذیر در نظر گرفتند که سود حداکثر شود. در این حالت مصرف‌کننده می‌تواند تصمیم بگیرد که آیا خود تولیدکننده باشد و با شرکت تبادل کند یا خیر. کیو^۸ و همکاران [۱۳] مدل قیمت‌گذاری یک سیستم ترکیبی از شبکه برق هوشمند و یک سیستم میکروگرید مبتنی بر تولید انرژی پاک که متصل به یک تأمین‌کننده اصلی مبتنی بر تولید انرژی فسیلی بود را نوشتند. این مدل بر اساس قیمت‌گذاری واقعی بود و هدف آن حداکثرسازی رضایت اجتماعی در نظر گرفته شده بود. هوسان^۹ و همکاران [۱۴] با استفاده از رویکردهای اقتصادسنجی پیشرفته، اثر سوبسیدهای اخیر دولت‌ها را بر روی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی کردند. آن‌ها در پایان پیشنهاد کردند که با نوآوری در یارانه و سوبسیدها، می‌توان کمک بزرگی به توسعه منابع تولید انرژی تجدیدپذیر و استفاده از این انرژی کرد که به نفع همه می‌باشد. لی و همکاران [۱۵] یک روش مدیریت تجارت انرژی میکروگریدها را بر اساس مکانیزم قیمت‌گذاری پویا و براساس ساعت‌های حقیقی و طبق بازی استکلبرگ پیشنهاد کردند که این روش مشکل عملیات بهینه‌سازی پیچیده میکروگریدها را حل می‌کند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از این روش بهینه‌سازی، سود میکروگرید را افزایش می‌دهد و به تجارت بیشتر نیرو توسط میکروگرید کمک می‌کند. جباری و همکاران [۱۶] یک ریزشبکه با شش ژنراتور دیزلی، پنل خورشیدی و توربین‌های بادی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بودجه و بدون نیاز به توزیع احتمال و توابع عضویت قیمت انرژی برنامه‌ریزی کردند که برای بخش عدم قطعیت از روبات استفاده کردند. هدف آن‌ها ارائه یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی اعداد صحیح مختلط با در نظر گرفتن ریسک برای به دست آوردن بهترین برنامه‌های تولید واحدهای مختلف میکروگرید است که شامل نوسانات قیمت انرژی می‌شود. دیو^{۱۰} و همکاران [۱۷] یک مدل به اشتراک‌گذاری انرژی را بر اساس بازی چانه‌زنی نش بین چند ریزشبکه پیشنهاد کردند. آن‌ها برای مقابله با عدم قطعیت در تعرفه‌های مختلف تخصیص‌یافته به قیمت انرژی تجدیدپذیر، از روبات استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، آن‌ها انگیزه تقلب برای به حداکثر رساندن مزایای هر میکروگرید را در نظر گرفتند و آن رفتار را به‌طور کامل بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند همکاری پایدار را تحقق بخشد، به‌طور مؤثر هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و در برابر عدم قطعیت‌های متعدد و تقلب ایمن‌سازی کند. اکسو و همکاران [۱۸] یک طرح

¹ Lewo

² Battery Energy Saving System

³ Chandak

⁴ Li

⁵ Leung.

⁶ Tsao, Linh

⁷ Buy Back

⁸ Qu

⁹ Hosan

¹⁰ Due

قیمت‌گذاری به‌وسیله تئوری بازی برای حقوق انتشار کربن مشترک^۱ (CER) و تجارت برق بین مصرف‌کنندگان برق در یک ریزش‌بکه را پیشنهاد کردند. آن‌ها برای این منظور از چند رهبر و چند پیرو استفاده کردند. لکلر^۲ و همکاران [۱۹] روش‌های بهینه‌سازی برای تولید و تأمین انرژی در میکروگریدهای صنعتی را بررسی و با در نظر گرفتن نوسانات بازار و تغییرات بار، مدل‌هایی برای بهبود قیمت‌گذاری و کاهش هزینه‌ها ارائه کرده‌اند. این مدل‌ها برای صنایع با نیازهای انرژی بالا و تحت شرایط عدم قطعیت مناسب هستند. نوجوان و معقولی [۲۰] یک مدل جدید پاسخ تقاضا (DR) مبتنی بر زمان برای کنترل شیب تغییرات تقاضا پیشنهاد کردند. آن‌ها بررسی کردند که با تغییر قیمت می‌توان تقاضای مشتری را در زمان‌های مختلف مدیریت کرد. کومار و همکاران [۲۱] یک استراتژی قیمت‌گذاری را پیشنهاد کردند که با به‌روزرسانی مکرر اطلاعات برق (مانند قیمت خرید و فروش آن در طی روز)، اشتراک‌گذاری محلی آن را بین میکروگرید و DNO، تسهیل کرده است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهینه‌سازی قیمت‌گذاری و سیاست‌های یارانه‌ای در میکروگریدها انجام شده است. برای مثال، مطالعات ژنگ و همکاران [۲۲] و لی و چن [۲۳] بر تحلیل دینامیک قیمت انرژی در بازارهای محلی تمرکز داشته‌اند، در حالی که پژوهش ونگ و همکاران [۲۴] نقش دولت را در تخصیص یارانه‌ها با استفاده از مدل‌های بازی چندسطحی بررسی کرده است. همچنین، تحقیقات اخیر نظیر حسینی و همکاران [۲۵] و خلیلی و زو [۲۶] به ادغام عدم قطعیت در تقاضای انرژی و طراحی سیاست‌های تطبیقی برای سیستم‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند. با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع، تعیین قیمت بهینه برای برق تولیدی میکروگریدها نه تنها از منظر اقتصادی، بلکه برای پایداری شبکه، حفظ انگیزه سرمایه‌گذاران و کاهش وابستگی به یارانه‌های دولتی حیاتی است. نوسانات تقاضا، تغییرات لحظه‌ای قیمت در بازار برق، و سیاست‌های حمایتی دولت باعث شده‌اند که تصمیمات قیمت‌گذاری در سطح میکروگرید به یک مسأله پویا و راهبردی تبدیل شود. هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل دوسطحی بر پایه بازی استکلبرگ برای تعیین قیمت بهینه برق در میکروگریدهاست، به‌گونه‌ای که با در نظر گرفتن یارانه‌های دولتی و رفتار اپراتورهای توزیع، (DNO)، بتوان هزینه‌های کل سیستم را کاهش داد، سود میکروگرید را افزایش داد و پایداری اقتصادی شبکه را در بلندمدت تضمین نمود. در این مطالعه، ابتدا یک مدل دو سطحی، بر اساس مدل اکسو و لانگ [۵]، برای محاسبه قیمت بهینه انرژی تولید شده توسط میکروگریدها با در نظر گرفتن یارانه دولت ارائه خواهد شد. پس از ارائه مدل ریاضی موردنظر که متشکل از میکروگرید در سطح بالا و DNO در سطح پایین می‌باشد، از روش استنتاج معکوس (بازی استکلبرگ) برای حل مدل و به دست آوردن قیمت‌های بهینه و سود حاصل میکروگرید و DNO استفاده می‌گردد. نهایتاً به این سؤال که دولت با تخصیص یارانه مناسب چطور می‌تواند بر روند این سیستم اثر بگذارد، پاسخ داده می‌شود. بنابراین در این مقاله ما به این مسئله می‌پردازیم که آیا تخصیص یارانه ویژه برای میکروگریدها اثرگذار است و اینکه قیمت فروش برق از سمت میکروگرید و DNO به چه مقدار باشد. پژوهش حاضر با تمرکز بر این چالش، ترکیب جدیدی از مدل بازی استکلبرگ دوسطحی، سیاست‌های یارانه‌ای دولتی و تقاضای فازی برق را برای تحلیل تعامل بین اپراتور شبکه توزیع (DNO) و میکروگرید پیشنهاد می‌کند. جنبه جدید بودن و تفاوت تحقیق حاضر با مقالات پیشین را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱. توسعه مدل بازی استکلبرگ در حضور یارانه‌های دولتی: در حالی که مطالعات پیشین معمولاً تنها بر تعامل تولیدکننده و مصرف‌کننده تمرکز داشته‌اند، پژوهش حاضر یک‌لایه جدید به مدل افزوده و نقش دولت را به‌عنوان بازیگر سیاست‌گذار و تعیین‌کننده سطح بهینه یارانه وارد مدل کرده است.
۲. ترکیب هم‌زمان دو سناریوی متمرکز و غیرمتمرکز: برخلاف اکثر مطالعات که تنها یکی از این ساختارها را بررسی کرده‌اند، در این مقاله اثر تخصیص یارانه در هر دو ساختار تصمیم‌گیری تحلیل و مقایسه شده است.
۳. کاربرد تحلیل فازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در تقاضا: این ویژگی، مدل پیشنهادی را به شرایط واقعی بازار نزدیک‌تر می‌سازد و موجب تمایز آن از مدل‌های کلاسیک خطی می‌شود.

¹ Certified emission reduction

² Leclerc

۲- تشریح مسئله و مدلسازی ریاضی

در این بخش یک مدل قیمت گذاری برای میکروگریدها با در نظر گرفتن یارانه دولت برای هر واحد برق فروخته شده توسط شرکت های توزیع و یا میکروگرید در شبکه تأمین برق ارائه می گردد. مطالعه حاضر بر پایه مدل پیشنهادی اکسو و لانگ (۲۰۱۹) بنا شده است، که در آن تعامل میان میکروگرید و اپراتور شبکه توزیع در قالب یک بازی دوسطحی مورد تحلیل قرار گرفته بود. باین حال، پژوهش حاضر چند تفاوت اساسی و توسعه محتوایی نسبت به آن مدل دارد:

افزودن نقش دولت در یک بازی استکلبرگ، که در آن دولت سطح یارانه را تعیین کرده و میکروگرید و DNO به آن مقدار واکنش نشان می دهند.

در نظر گرفتن تقاضای فازی (\tilde{a}) به منظور مدل سازی عدم قطعیت در بازار برق، که موجب افزایش دقت در برآوردهای اقتصادی می شود.

تحلیل دو سناریوی متمایز (متمرکز و غیرمتمرکز) به جای یک چارچوب ثابت، که امکان مقایسه بین همکاری کامل و تصمیم گیری مستقل را فراهم می کند.

در مجموع، اگرچه این پژوهش از ساختار نظری مدل اکسو و لانگ (۲۰۱۹) الهام گرفته است، اما با افزودن بعد سیاست گذاری دولتی، مدل را از سطح تعامل اقتصادی به یک چارچوب تصمیم گیری سیاستی ارتقا داده است.

میکروگرید شامل ژنراتورهای تولید انرژی تجدیدپذیر مانند پنل خورشیدی، توربین بادی و غیره می باشد که ابتدا با الکتریسیته تولید شده توسط منابع نیاز مصرف خود را تأمین می کند و سپس برق تولیدی خود را به DNO و به قیمت عمده w می فروشد. DNO مبلغی را تحت عنوان قیمت حمل و نقل^۱ به قیمت خرید عمده خود اضافه کرده و سپس برق را به مصرف کننده نهایی می فروشد که این مبلغ همان سود DNO می باشد. بنابراین p قیمت نهایی برق فروخته شده به مصرف کننده نهایی می باشد که به صورت $p=w+l$ نشان داده می شود.

e یارانه تخصیص یافته به اپراتور شبکه پخش می باشد و e' یارانه تخصیص یافته به میکروگرید می باشد. ما در نظر گرفتیم که دولت یارانه را بر قیمت فروش عمده و قیمت حمل و نقل تخصیص دهد. پس قیمت فروش عمده و قیمت توزیع کننده پس از تخصیص یارانه به دو صورت $w-e'$ و $l-e$ نشان داده می شوند. q_0 نشان دهنده حجم مصرف الکتریسیته توسط خود میکروگرید می باشد و h سود میکروگرید بر روی هر واحد الکتریسیته می باشد که یک عدد ثابت طبق واقعیت برای آن در نظر گرفته می شود. زیرا هزینه تأسیس و تقاضای مصرف کنندگان میکروگرید قبل از استقرار مشخص می شود.

پارامترهای مدل:

\tilde{a}	تقاضای پایه بازار (فازی)
b	ضریب حساسیت قیمت الکتریسیته
m	ظرفیت هر واحد میکروگرید
δ	پدیده تناوب انرژی تجدیدپذیر
q_0	حجم مصرف الکتریسیته توسط میکروگرید
h	سود حاصل از مصرف هر واحد الکتریسیته توسط میکروگرید
c	هزینه هر واحد برق
l	هزینه تأسیس برای هر واحد ظرفیت نصب شده میکروگرید
e	یارانه اختصاص یافته به DNO توسط دولت
e'	یارانه اختصاص یافته به میکروگرید توسط دولت

متغیرهای مدل:

D	حجم تقاضای الکتریسیته توسط مصرف‌کننده نهایی
P	قیمت نهایی الکتریسیته برای مصرف‌کننده
p*	قیمت بهینه نهایی الکتریسیته
Π_c	رفاه اجتماعی (سود کلی مجموعه)
Π_{DNO}	سود DNO
Π_{mcg}	سود میکروگرید
w	قیمت فروش عمده الکتریسیته توسط میکروگرید به DNO
l	قیمت انتقال الکتریسیته توسط DNO به مصرف‌کننده نهایی
w*	قیمت عمده بهینه برای الکتریسیته
l*	قیمت انتقال بهینه برای الکتریسیته

تقاضای بازار که DNO با آن روبرو است به صورت خطی و با تقاضای پایه فازی در نظر گرفته می‌شود:

$$D = a - bp \quad (1)$$

D مقدار تقاضای میکروگرید می‌باشد، a نشان‌دهنده اندازه فازی تقاضای بازار است. b ضریب حساسیت برای قیمت برق می‌باشد. با توجه به عدم قطعیت در بازار تقاضای برق، پارامتر \bar{a} فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شود. در هنگام محاسبه مقادیر عددی برای دیفازی کردن \bar{a} ، آن را از فرمول $\bar{a} = \frac{(a_1 + 2a_2 + a_3)}{4}$ به دست می‌آوریم. لازم به ذکر است که تقاضا در اینجا به معنای مصرف آنی الکتریسیته نیست و به معنای مقدار کل الکتریسیته تقاضا شده در طول یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. همچنین به جهت سادگی ما هزینه‌های تولید را که میکروگرید متحمل می‌شود، صفر در نظر می‌گیریم. این یک فرض متداول می‌باشد زیرا منابع انرژی تجدید پذیر، مانند انرژی خورشیدی و باد، از دیدگاه تئوری پایدار در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین ما هزینه را عمدتاً هزینه سرمایه‌گذاری برای هر واحد در نظر می‌گیریم. هزینه سرمایه‌گذاری l ، ظرفیت نصب‌شده برای میکروگرید m می‌باشد. مشابه (کوک^۱، ۲۰۱۸) تابع هزینه به صورت $l_m = cm$ در نظر گرفته می‌شود. هزینه هر واحد ظرفیت نصب شده برای میکروگرید، با نشان داده می‌شود. بدیهی است که به دلیل متناوب بودن انرژی خورشیدی و باد، مقدار تولید انرژی‌های تجدید پذیر همیشه به حداکثر ظرفیت نصب شده برای آنها نمی‌رسد. بیشترین بازدهی انرژی خورشید در طول روز می‌باشد. در حالی که الگوی تولید انرژی باد به شدت بستگی به شدت وزش باد در مناطق مختلف جغرافیایی دارد. پس مشابه کار (اکسو و لانگ، ۲۰۱۹) تابع مقدار تولید برق به صورت $q = \delta m$ نشان داده می‌شود، که در آن ظرفیت در دسترس δ نشان‌دهنده پدیده تناوب انرژی تجدید پذیر برای هر واحد میکروگرید m می‌باشد. جهت سادگی محاسبات، مقدار δ ، $(0 \leq \delta \leq 1)$ یک عدد ثابت در نظر گرفته شده است. نتیجتاً هزینه هر واحد برق تولید شده در میکروگرید به صورت $\frac{l_m}{q} = \frac{cm}{\delta m} = \frac{c}{\delta}$ به دست می‌آید.

در این مقاله دو سناریوی متمرکز و غیرمتمرکز برای شبکه مورد نظر بررسی می‌شود. در سناریوی متمرکز تنها یک سطح برای میکروگرید و DNO داریم و قیمت و سود کل مجموعه یکی در نظر گرفته شده است. در سناریوی غیرمتمرکز زنجیره دوسطحی در نظر گرفته می‌شود پس منافع میکروگرید و DNO از هم جدا می‌باشند، سپس در سطح بالاتر دولت سطح بهینه پارانه را تعیین می‌نماید. در نهایت برای به دست آوردن مقادیر بهینه از استنتاج معکوس استفاده می‌شود.

۲-۱- سناریوی متمرکز:

در این سناریو دولت بر هر واحد تقاضا از سمت مشتری، بر روی قیمت نهایی پارانه اختصاص می‌دهد. این مقدار پارانه با e'' نشان داده می‌شود. ابتدا تابع سود با در نظر گرفتن پارانه را نوشتیم:

$$\pi_c = (\bar{a} - b(p - e''))p + q_0h - \frac{c}{\delta}(\bar{a} - b(p - e'')) + q_0 \quad (2)$$

در این حالت حجم تقاضا برابر می‌شود با $D = \bar{a} - b(p - e'')$ که در آن یک پارانه برای قیمت نهایی مشخص شده است. با مشتق

¹ KOK

گرفتن از تابع (2) بر حسب p، مقدار بهینه برای قیمت را به دست آوردیم:

$$p^* = \frac{cb + \bar{a}\delta + b\delta e''}{2b\delta} \quad (3)$$

۲-۲- سناریوی غیر متمرکز:

در این مرحله پیشنهاد شده که دولت برای مقابله با شکست بازار فروش برق میکروگرید، بر روی قیمت فروش عمده یا قیمت انتقال برق، یارانه اختصاص دهد. با توجه به این که بودجه دولت محدود می‌باشد و نمی‌تواند هم به میکروگرید و هم به DNO یارانه تخصیص دهد و مبلغ ثابتی برای یارانه در نظر گرفته است. تابع سود DNO به صورت زیر نوشته شده است:

$$\pi_{DNO} = (\bar{a} - b(1 - e + w - e'))l \quad (4)$$

طبق معادله بالا، زمانی که از تابع سود DNO بر حسب l مشتق بگیریم مقدار بهینه قیمت انتقال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$l^* = \frac{\bar{a}\delta - bw + b(e + e')}{2b} \quad (5)$$

سود میکروگرید نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\pi_{mcg} = (\bar{a} - b(1 - e + w - e'))w - \frac{c}{\delta}(w + q_0h) \quad (6)$$

زمانی که معادله (5) را در معادله (6) گذاشتیم، با مشتق گرفتن از تابع میکروگرید بر حسب w مقدار بهینه قیمت عمده نیز به دست آمد:

$$w^* = \frac{bc + \bar{a}\delta + b\delta(e + e')}{2b\delta} \quad (7)$$

قیمت انتقال را با جایگذاری معادله (7) در معادله (5) به صورت زیر بازنویسی کردیم:

$$l^* = \frac{\bar{a}\delta - bc + b\delta(e + e')}{4b\delta} \quad (8)$$

سپس با جایگذاری w^* و π_{DNO} و π_{mcg} مجدد آن‌ها را محاسبه کردیم:

$$\pi_{DNO} = \frac{(\bar{a}\delta - bc + b\delta(e + e'))^2}{16b\delta^2} \quad (9)$$

$$\pi_{mcg} = \frac{\bar{a}^2\delta^2 + b^2c^2 + 8bq_0h\delta^2 - 2bc(\bar{a}\delta + 4q_0)}{8b\delta^2} \quad (10)$$

اگرچه مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت کلی طراحی شده است، اما می‌توان آن را با ساختار بازار برق و سیاست‌های یارانه‌ای ایران نیز تطبیق داد. در ایران، دولت نقش اصلی را در تعیین تعرفه‌های برق و تخصیص یارانه‌های انرژی ایفا می‌کند، که از نظر مفهومی معادل «رهبر» در مدل استکلبرگ در این مقاله است. از سوی دیگر، شرکت‌های توزیع برق و میکروگریدهای محلی در نقش «پیروان» عمل کرده و تصمیمات خود را بر اساس سیاست‌های یارانه‌ای دولت تنظیم می‌کنند. با توجه به سهم بالای منابع گازی و تجدیدپذیر خورشیدی در ترکیب انرژی کشور، نتایج این پژوهش می‌تواند در تحلیل سیاست‌های قیمت‌گذاری و تخصیص یارانه‌ها در مناطق مختلف ایران (به‌ویژه مناطق با شدت تابش بالا) مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، در شرایط فعلی اصلاح تدریجی یارانه‌های انرژی در کشور، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر نظریه بازی می‌تواند ابزاری مناسب برای ارزیابی آثار اقتصادی و اجتماعی سیاست‌های یارانه‌ای باشد.

۳- آنالیز عددی

در این بخش هرکدام از سناریوهای مشخص شده در فصل قبل به ترتیب با مثال عددی مشخص شده است. سپس برخی از پارامترها را تغییر دادیم که اثر آن‌ها روی قیمت و سود مشخص شود. طبق جدول زیر به پارامترهای موجود عددی ثابت

تخصیص می‌دهیم. اعداد این پارامترها به صورت اختیاری و مشابه کار (اکسو و لانگ، ۲۰۱۹) انتخاب شده است. ابتدا عدد فازی \tilde{a} را دیفازی کرده و مقدار آن را به دست آوردیم.

جدول ۱ پارامترهای مقدار بیس تقاضا

a_1	39
a_2	40
a_3	41

$$\bar{a} = \frac{(39 + (2 * 40) + 41)}{4}$$

اعداد جهت راحتی مدیریت برای تجسم، تحلیل و بررسی کردن سریع به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

جدول ۲ پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار
b	1.2
q_0	1.3
h	5
c	2
δ	0.6
e	6
\bar{a}	40

با توجه به عددهای بالا، نسبت‌ها را برای هر سناریو به صورت جداگانه بررسی کردیم و نتایج را در قالب جداول و نمودارها رسم نمودیم.

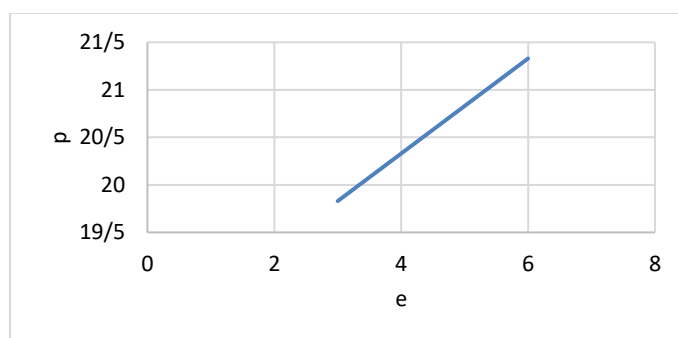
حالت اول: سناریو متمرکز

در این حالت هدف حداکثرسازی سود کل می‌باشد و کل مجموعه با هم در نظر گرفته می‌شوند. با تغییر پارامترهای e'' ، δ ، b و c قیمت و سود نهایی به شرح زیر به دست آمد:

جدول ۳ تغییرات در تابع سود و قیمت بر حسب تغییر در پارامترها

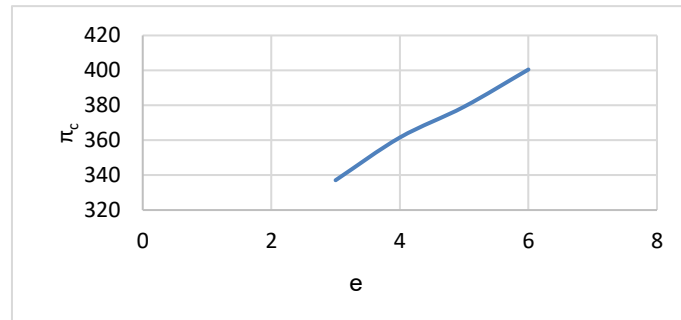
e''	p^*	π_c	b	p^*	π_c
3	19.83	337.09	1.1	22.84	488.89
4	20.33	361.54	1.2	21.33	399.19
5	20.83	379.19	1.4	18.95	352.80
6	21.33	400.49	1.6	17.16	318.31
δ	p^*	π_c	c	p^*	π_c
0.2	24.66	278.93	1	20.5	434.73
0.4	22.16	366.63	2	21.33	400.32
0.6	21.33	399.19	3	22.16	387.97
0.8	20.91	416.10	4	23	327.23

نمودار روابط جداول در نمودارهای زیر قابل مشاهده هستند:



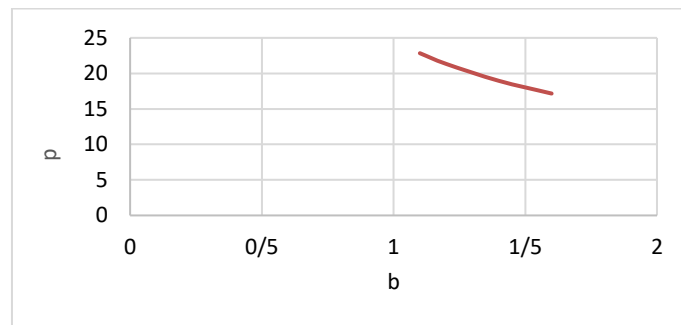
نمودار ۱ تغییرات قیمت بهینه بر حسب تغییرات پارانه

یارانه و قیمت با یکدیگر رابطه مستقیم دارند زیرا با افزایش میزان یارانه می‌توان قیمت را افزایش داد. همان‌طور که قابل مشاهده است شیب نمودار تند می‌باشد یعنی یارانه تأثیر زیادی بر روی قیمت می‌گذارد.



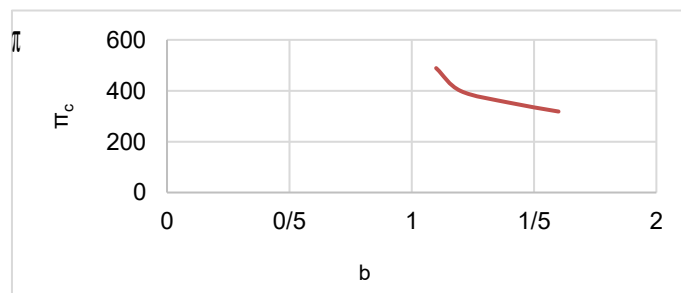
نمودار ۲ تغییرات سود بهینه بر حسب تغییرات یارانه

با افزایش یارانه سود مجموعه به شدت افزایش پیدا می‌کند مقدار یارانه تأثیر بسیار زیاد و قابل توجهی بر روی سود نهایی گذاشته است زیرا شیب نمودار بسیار تند می‌باشد.



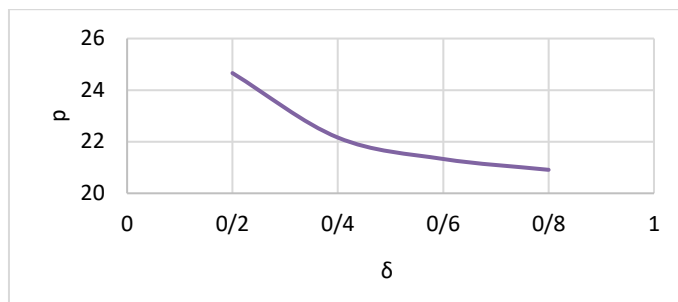
نمودار ۳ تغییرات قیمت بهینه بر حسب تغییرات کثرت قیمت

طبق نمودار فوق با افزایش ضریب حساسیت قیمت نهایی ما کاهش پیدا می‌کند یعنی با یکدیگر رابطه عکس دارند.



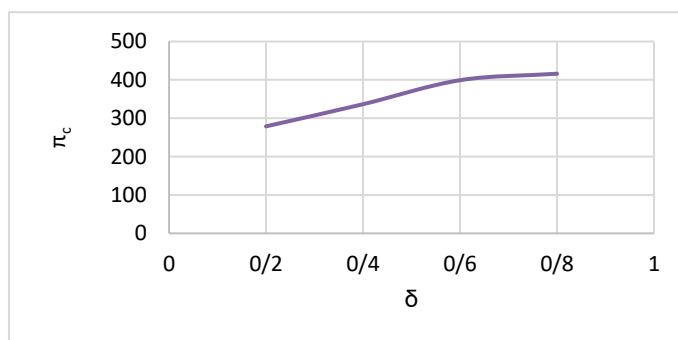
نمودار ۴ تغییرات سود بر حسب تغییرات کثرت قیمت

این نمودار شیب نزولی دارد یعنی با افزایش ضریب حساسیت سود نهایی کاهش پیدا می‌کند.



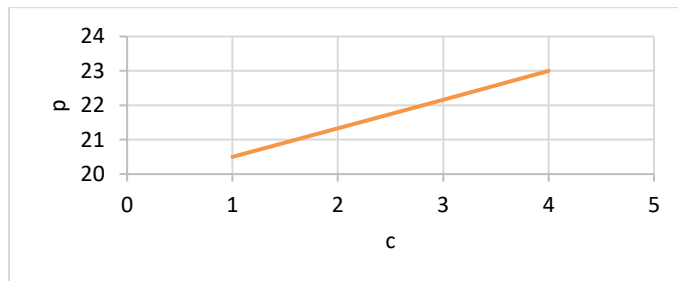
نمودار ۵ تغییرات قیمت بهینه بر حسب تغییرات δ

طبق این نمودار δ و قیمت با یکدیگر رابطه عکس دارند و شیب نزولی می‌باشد.



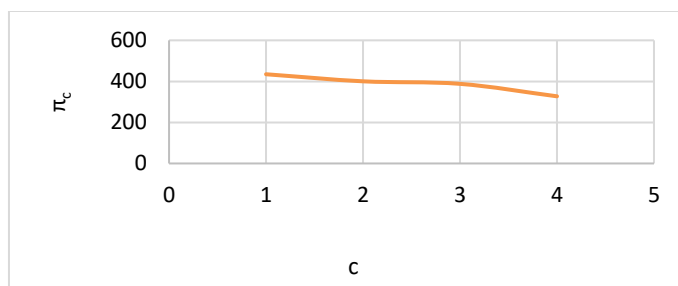
نمودار ۶ تغییرات سود بهینه بر حسب تغییرات δ

δ و سود با یکدیگر رابطه مستقیم دارند یعنی هر چقدر δ بیشتر باشد سود ما نیز بیشتر می‌شود.



نمودار ۷ تغییرات قیمت بهینه بر حسب تغییرات c

هزینه هر واحد با قیمت رابطه مستقیم دارد زیرا نمودار صعودی می‌باشد. بدیهی است که با افزایش هزینه‌ها قیمت نیز افزایش می‌یابد.



نمودار ۸ تغییرات سود بهینه بر حسب تغییرات c

هزینه‌ها و سود با یکدیگر رابطه عکس دارند همانطور که مشاهده می‌کنید نمودار نزولی می‌باشد پس با افزایش هزینه‌ها سود

نهایی ما کم می‌شود.

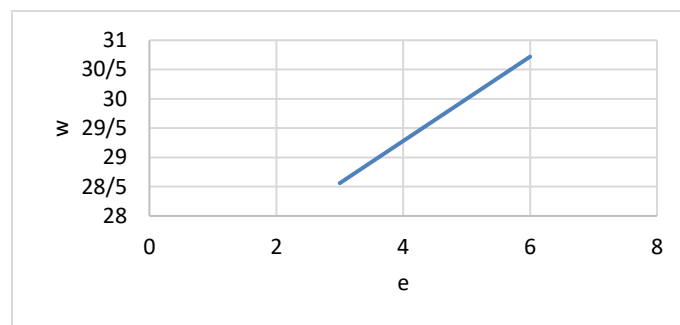
حالت دوم: سناریو غیر متمرکز

در این سناریو در نظر می‌گیریم که یکبار دولت یارانه را به DNO تخصیص دهد و یکبار به میکروگرید. سود آن‌ها را در صورت تخصیص به آن‌ها محاسبه کرده و سود نهایی را به دست آوردیم. با توجه به این که مقدار e و e^* برابر است، پس تفاوتی ندارد که دولت e را به کدام اختصاص دهد.

جدول ۳ تغییرات در تابع سود و قیمت بر حسب تغییر در پارامترها

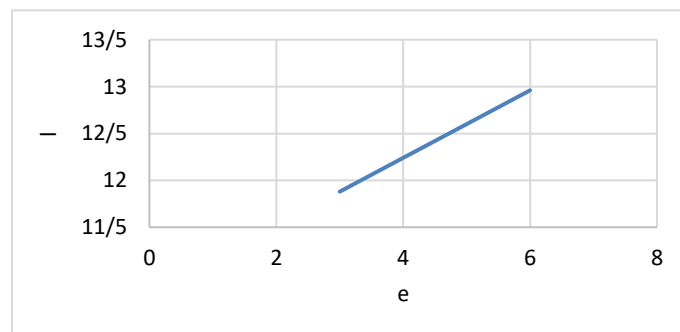
e	w^*	l^*	π_{DNO}	π_{mcg}	δ	w^*	l^*	π_{DNO}	π_{mcg}
3	28.56	11.88	564.53	163.18	0.2	24.66	9.3	49.56	122.56
4	29.28	12.24	599.27	173.23	0.4	22.16	9	271.59	176.81
5	30	12.6	635.04	183.58	0.6	21.33	8.58	671.84	192.23
6	30.72	12.96	671.84	194.23	0.8	20.91	7.33	1250	200.25
c	w^*	l^*	π_{DNO}	π_{mcg}	b	w^*	l^*	π_{DNO}	π_{mcg}
1	20.5	8.16	735.49	209.31	1.1	22.84	17.3	765.43	209.32
2	21.33	8.58	671.84	192.23	1.2	21.33	15.3	688.53	194.23
3	22.16	9	611.07	174.31	1.4	18.95	12.96	670.24	170.04
4	23	9.4	553.19	151.23	1.6	17.33	9.75	663.57	151.97

همانطور که قابل مشاهده هست، بودجه اختصاصی دولت به میکروگرید و DNO مساوی می‌باشد و تفاوتی برای آن‌ها قائل نمی‌شود. پس فقط شاهد اثرات آن روی قیمت و سود هستیم. برای بررسی اثرات پارامترهای دیگر بر تابع، مقدار یارانه را ثابت و $e=6$ در نظر گرفتیم.



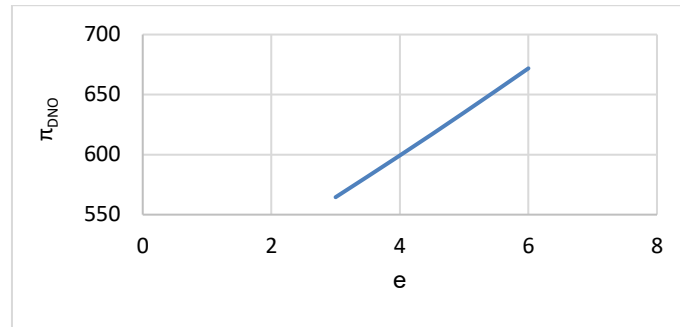
نمودار ۹ تغییرات قیمت عمده‌فروشی بر حسب تغییرات یارانه

یارانه و قیمت فروش عمده با یکدیگر رابطه مستقیم دارند زیرا با افزایش میزان یارانه می‌توان قیمت را افزایش داد. همانطور که قابل مشاهده است شیب نمودار تند می‌باشد یعنی یارانه تأثیر زیادی بر روی قیمت می‌گذارد.



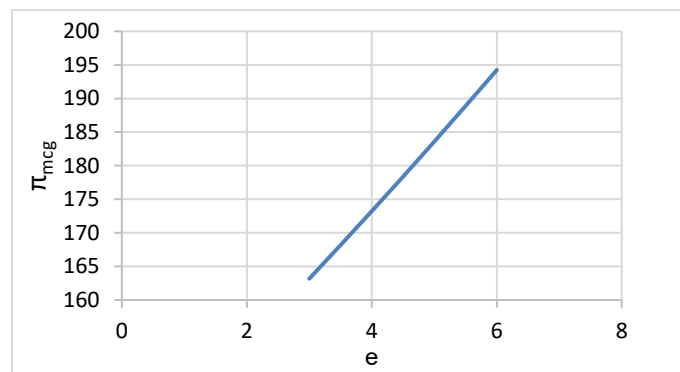
نمودار ۱۰ تغییرات قیمت انتقال بر حسب تغییرات یارانه

یارانه و قیمت انتقال با یکدیگر رابطه مستقیم دارند زیرا با افزایش میزان یارانه می‌توان قیمت انتقال را افزایش داد.



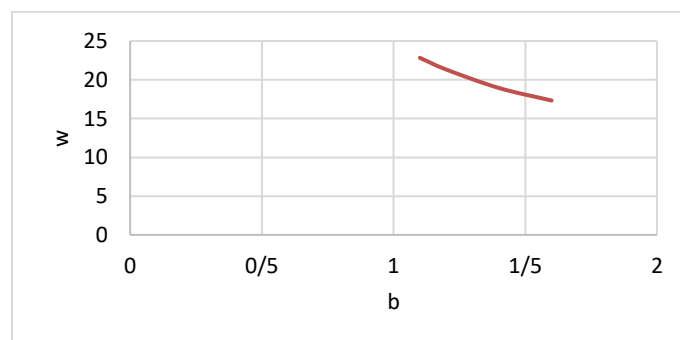
نمودار ۱۱ تغییرات سود DNO بر حسب تغییرات یارانه

با افزایش یارانه سود DNO نیز به شدت افزایش پیدا می‌کند. همانطور که بیان شد، تفاوتی ندارد که دولت یارانه را به کدام مجموعه اختصاص دهد. مقدار یارانه تأثیر بسیار زیاد و قابل توجهی بر روی سود DNO گذاشته است زیرا شیب نمودار بسیار تند می‌باشد.



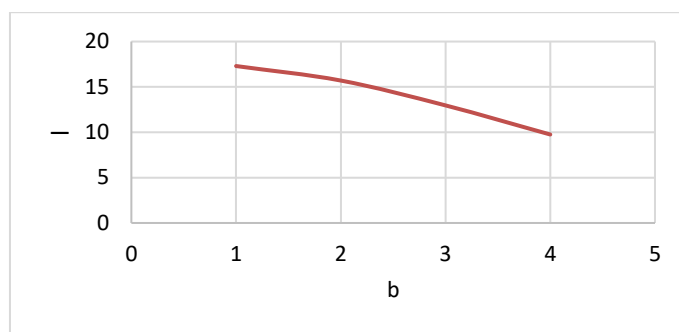
نمودار ۱۲ تغییرات سود میکروگرید بر حسب تغییرات یارانه

با افزایش یارانه سود میکروگرید نیز به شدت افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که بیان شد، تفاوتی ندارد که دولت یارانه را به کدام مجموعه اختصاص دهد. مقدار یارانه تأثیر بسیار زیاد و قابل توجهی بر روی سود میکروگرید گذاشته است زیرا شیب نمودار بسیار تند می‌باشد.



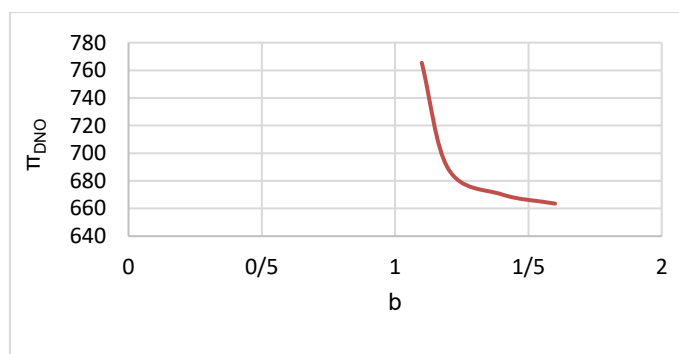
نمودار ۱۳ تغییرات عمده‌فروش بر حسب تغییرات b

نمودار فوق نزولی می‌باشد. طبق نمودار فوق با افزایش ضریب حساسیت قیمت فروش عمده میکروگرید کاهش پیدا می‌کند یعنی با یکدیگر رابطه عکس دارند.



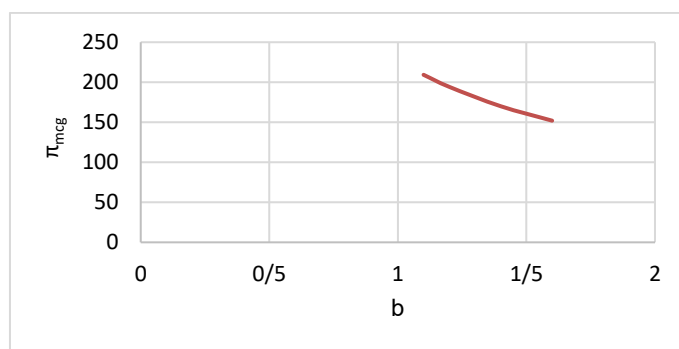
نمودار ۱۴ تغییرات λ بر حسب تغییرات b

نمودار فوق نزولی می‌باشد. طبق نمودار فوق با افزایش ضریب حساسیت قیمت انتقال DNO نیز کاهش پیدا می‌کند یعنی با یکدیگر رابطه عکس دارند.



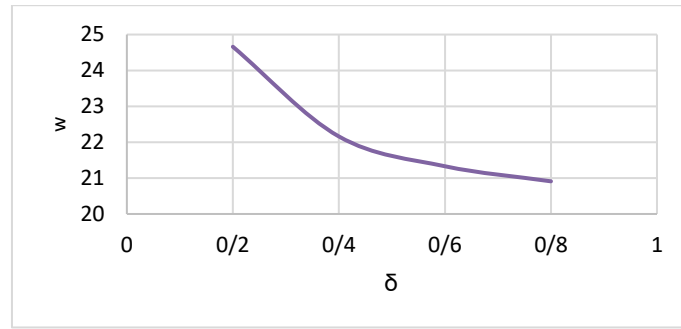
نمودار ۱۵ تغییرات سود DNO بر حسب b

این نمودار شیب تند نزولی دارد یعنی سود DNO بسیار به ضریب حساسیت قیمت بستگی دارد. با افزایش ضریب حساسیت سود DNO به شدت کاهش پیدا می‌کند.



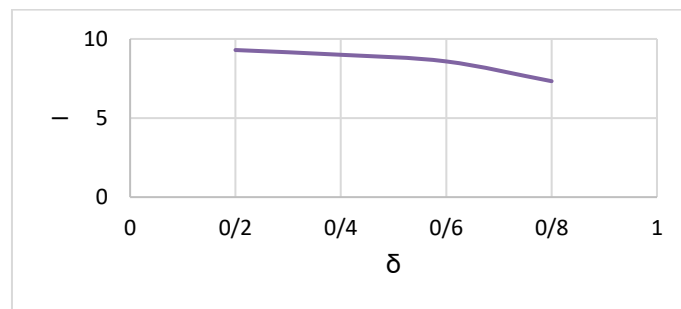
نمودار ۱۶ تغییرات میکروگرید بر حسب تغییرات ضریب حساسیت

این نمودار نیز شیب نزولی دارد اما ملایم‌تر می‌باشد. یعنی سود میکروگرید نیز به ضریب حساسیت قیمت بستگی دارد. با افزایش ضریب حساسیت سود میکروگرید کاهش پیدا می‌کند.



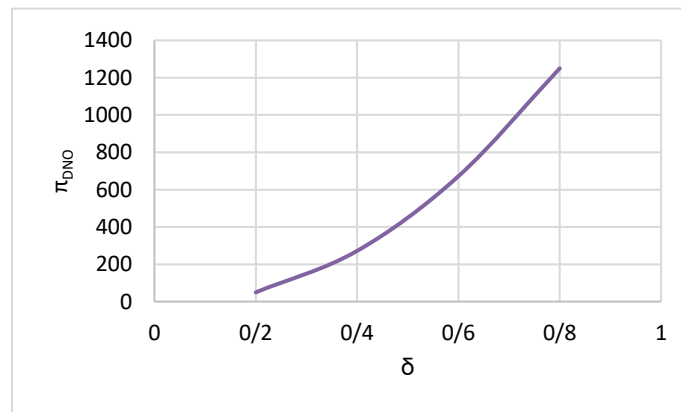
نمودار ۱۷ تغییرات قیمت عمده‌فروشی بر حسب تغییرات δ

طبق این نمودار δ و قیمت عمده‌فروشی میکروگرید با یکدیگر رابطه عکس دارند اما شیب آن متوسط می‌باشد و تغییرات نسبتاً زیادی داریم.



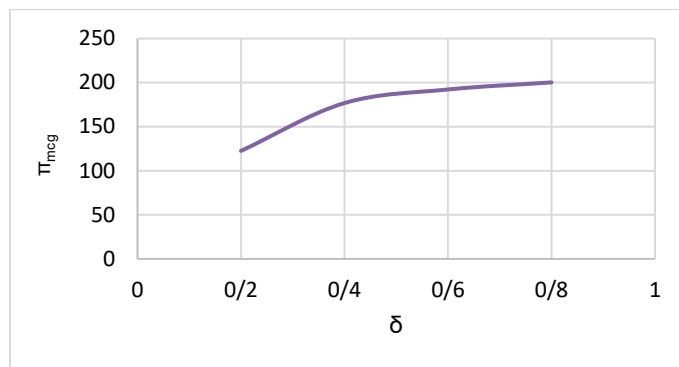
نمودار ۱۸ تغییرات قیمت انتقال بر حسب تغییرات δ

در این نمودار نیز δ و قیمت انتقال با یکدیگر رابطه عکس دارند اما شیب آن ملایم می‌باشد و تغییرات کمی داریم.



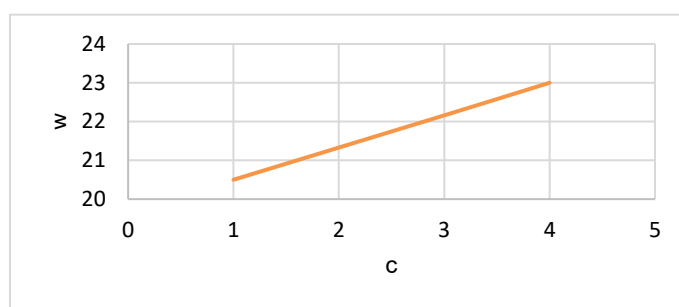
نمودار ۱۹ تغییرات سود DNO بر حسب تغییرات δ

δ و سود DNO با یکدیگر رابطه مستقیم دارند یعنی هر چقدر δ بیشتر باشد سود DNO نیز بیشتر می‌شود.



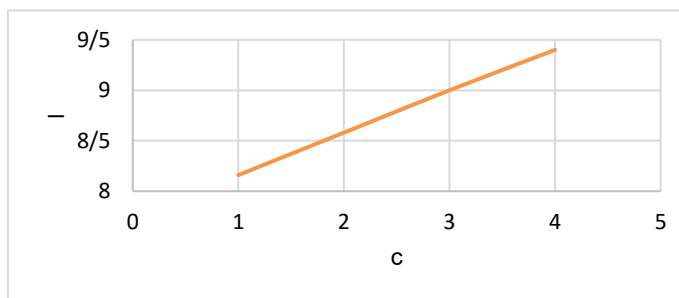
نمودار ۲۰ تغییرات سود میکروگرید بر حسب تغییرات δ

سود میکروگرید با δ نیز رابطه مستقیم دارد، یعنی هرچه قدر کارایی سیستم بیشتر باشد، در نهایت سود میکروگرید نیز بیشتر می‌شود.



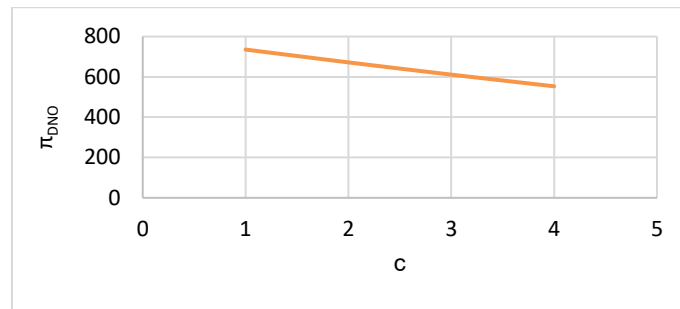
نمودار ۲۱ تغییرات قیمت فروش عمده بر حسب تغییرات c

هزینه هر واحد میکروگرید با قیمت فروش عمده رابطه مستقیم دارد زیرا نمودار صعودی می‌باشد. بدیهی است که با افزایش هزینه‌ها مجبوریم قیمت فروش عمده را نیز افزایش دهیم.



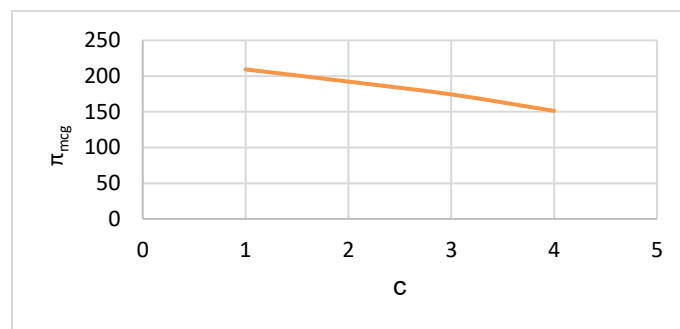
نمودار ۲۲ تغییرات قیمت انتقال بر حسب تغییرات c

همچنین هزینه‌ها با قیمت انتقال DNO نیز رابطه مستقیم دارد اما با شیب ملایم‌تر زیرا نمودار صعودی می‌باشد. اما تأثیر کمتری از هزینه‌ها می‌گیرد زیرا هزینه‌ها مربوط به میکروگرید می‌باشند.



نمودار ۲۳ تغییرات سود DNO بر حسب تغییرات c

هزینه‌ها و سود DNO با یکدیگر رابطه عکس دارند همانطور که مشاهده می‌کنید نمودار نزولی می‌باشد اما با شیب ملایم؛ پس با افزایش هزینه‌ها سود نهایی ما تا حدودی کم می‌شود.



نمودار ۲۴ تغییرات سود میکروگرید بر حسب تغییرات c

هزینه‌ها و سود با یکدیگر رابطه عکس دارند همانطور که مشاهده می‌کنید نمودار نزولی می‌باشد و شیب آن نیز زیاد است. پس با افزایش هزینه‌ها سود نهایی ما به شدت کم می‌شود.

نتایج به دست آمده از مدل استکلبرگ پیشنهادی نشان می‌دهد که تخصیص یارانه‌های دولتی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری قیمت تعادلی برق و توزیع سود میان بازیگران مختلف (میکروگرید و اپراتور شبکه توزیع) دارد. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود، افزایش سطح یارانه تخصیص‌یافته به میکروگریدها منجر به کاهش قیمت عمده‌فروشی برق می‌شود که این امر، به‌طور غیرمستقیم، باعث تحریک تقاضا و افزایش حجم مبادله انرژی در بازار محلی می‌گردد. از دیدگاه اقتصادی، این رفتار نشان‌دهنده وجود رابطه غیرخطی میان یارانه، تقاضا و سود اجتماعی است؛ به‌گونه‌ای که در سطوح پایین یارانه، اثر افزایش آن بر سود کل سیستم مثبت و قابل توجه است، اما پس از نقطه‌ای مشخص، بازده نهایی یارانه کاهش یافته و موجب ایجاد ناپایداری در تعادل بازار می‌شود.

تحلیل نتایج همچنین نشان می‌دهد که نقش دولت تنها در کاهش هزینه‌ها خلاصه نمی‌شود، بلکه از طریق تنظیم هوشمندانه میزان یارانه، می‌تواند تعادل بازی استکلبرگ را به سمت پایداری اقتصادی بیشتر هدایت کند. در واقع، در غیاب یارانه، میکروگریدها تمایل دارند قیمت فروش برق را در سطح بالاتری تعیین کنند تا هزینه‌های تولید را جبران نمایند، اما در حضور یارانه، انگیزه اقتصادی برای کاهش قیمت افزایش یافته و منجر به رشد رفاه اجتماعی می‌شود. این پدیده در تحلیل‌های حساسیت نیز تأیید شد؛ به‌طوری‌که تغییرات جزئی در پارامترهای یارانه e و e' منجر به تغییر معنادار در سود تعادلی می‌گردد.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل سه‌سطحی بر پایه بازی استکلبرگ برای تحلیل بهینه‌سازی قیمت‌گذاری در میکروگریدها تحت سیاست‌های یارانه‌ای دولت ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش میزان یارانه موجب کاهش قیمت تعادلی برق و افزایش سود اجتماعی کل می‌شود. همچنین، مقایسه دو سناریوی متمرکز و غیرمتمرکز نشان داد که همکاری میان دولت و

اپراتور شبکه می‌تواند منجر به تخصیص کارآمدتر منابع و پایداری بیشتر در سیستم گردد. بنابراین، نمی‌توان به‌صورت قطعی درباره اثر شدت عدم قطعیت بر نتایج اقتصادی اظهار نظر کرد. یافته‌های این پژوهش بر مبنای نتایج عددی دو سناریوی شبیه‌سازی شده است و سایر عوامل مانند هزینه سرمایه‌گذاری، رفتار ریسک‌گریزی یا سیاست‌های تشویقی خارج از چارچوب مدل باقی مانده‌اند. با وجود فرض اطلاعات کامل و تقاضای خطی، چارچوب پیشنهادی قابلیت توسعه به مدل‌های دارای تقاضای تصادفی یا اطلاعات ناقص را دارد، که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد. همچنین برای توسعه آتی مدل، می‌توان پایداری نتایج را در برابر شوک‌های اقتصادی یا تغییرات سیاست‌های یارانه‌ای بررسی نمود. به‌ویژه تحلیل پویایی سیستم با استفاده از مدل‌های تعادلی چنددوره‌ای یا شبیه‌سازی مبتنی بر عامل می‌تواند دیدگاه واقع‌گرایانه‌تری نسبت به رفتار بازار ارائه دهد. در این مطالعه، برای سادگی تحلیل و تمرکز بر تأثیر یارانه‌های دولتی، فرض شده است که هزینه تولید برق از منابع تجدیدپذیر در میکروگرید برابر صفر است. این فرض در مطالعات نظری مشابه نیز به‌کار رفته است، زیرا هزینه نهایی تولید انرژی از منابعی مانند باد و خورشید پس از نصب تجهیزات تقریباً ناچیز است. با این حال، باید توجه داشت که در محیط‌های واقعی، هزینه‌های نگهداری، تعمیرات، تلفات عملکردی و کاهش راندمان ناشی از شرایط آب‌وهوایی می‌توانند بر بازده اقتصادی میکروگرید تأثیرگذار باشند. بنابراین، نتایج این پژوهش باید با در نظر گرفتن این محدودیت تفسیر شود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، هزینه‌های عملیاتی و عدم قطعیت تولید نیز به مدل اضافه گردد تا پایداری و دقت نتایج افزایش یابد. برخی دیگر از پیشنهادات آتی عبارتند از: در نظر گرفتن عدم قطعیت احتمالی بر میزان حجم تقاضا در مدل ریاضی، عدم قطعیت در میزان تولید به دلیل ماهیت انرژی‌های تجدیدپذیر، دو کاناله کردن و رقابتی کردن بازار قیمت‌گذاری با استفاده از دو یا چند DNO برای پخش برق.

۴- منابع

- [1] Shi W, Li N, Chu C. C, Gadh R. Real-time energy management in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015; 8(1): 228-238. [10.1109/TSG.2015.2462294](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2462294)
- [2] Li B, Roche R, Miraoui A. Microgrid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment. *Applied energy*. 2017; 188: 547-562. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.038>
- [3] Kumar D, Verma Y. P, Khanna R. Demand response-based dynamic dispatch of microgrid system in hybrid electricity market. *International Journal of Energy Sector Management*. 2019; 13(2): 318-340. <https://doi.org/10.1108/IJESM-12-2017-0008>
- [4] Hussain A, Bui V. H, Kim H. M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*. 2019; 240: 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.055>
- [5] Xu D, Long Y. The impact of government subsidy on renewable microgrid investment considering double externalities. *Sustainability*. 2019; 11(11): 3168. <https://doi.org/10.3390/su11113168>
- [6] Philipo G H, Chande Jande Y A, Kivevele T. Demand-side management of solar microgrid operation: Effect of time-of-use pricing and incentives. *Journal of Renewable Energy*. 2020; (1): 6956214. <https://doi.org/10.1155/2020/6956214>
- [7] Rajamand S. Cost reduction in microgrid using demand response program of loads and uncertainty modeling with point estimation method. *International transactions on electrical energy systems*. 2020; 30(4): e12299. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12299>
- [8] Kumar P S, Chandrasena R P. S., Ramu V, Srinivas G, Babu K. V. S. M. Energy management system for small scale hybrid wind solar battery based microgrid. *IEEE access*. 2020; 8: 8336-8345. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964052>
- [9] Luo L, Abdulkareem S. S, Rezvani A, Miveh M. R, Samad S, Aljojo N., Pazhoohesh M. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2020; 28: 101306. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101306>
- [10] Chandak S, Rout P. K. The implementation framework of a microgrid: A review. *International Journal of Energy Research*. 2021; 45(3): 3523-3547. <https://doi.org/10.1002/er.6064>
- [11] Li R, Leung G. C. The relationship between energy prices, economic growth and renewable energy consumption: Evidence from Europe. *Energy Reports*. 2021; 7: 1712-1719. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.03.030>

- [12] Tsao Y C, Linh, V. T. A new three-part tariff pricing scheme for the electricity microgrid considering consumer regret. *Energy*. 2022; 254: 124387. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124387>
- [13] Qu D, Li J, Yong M. Real-time pricing for smart grid considering energy complementarity of a microgrid interacting with the large grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022; 141: 108217. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108217>
- [14] Hosan S, Rahman M M, Karmaker S C, Saha B. B. Energy subsidies and energy technology innovation: Policies for polygeneration systems diffusion. *Energy*. 2023; 267: 126601.
- [15] Li B, Zhao R, Lu J., Xin, K, Huang J, Lin G, Pang X. Energy management method for microgrids based on improved Stackelberg game real-time pricing model. *Energy Reports*. 2023; 9:1247-1257.
- [16] Jabari F, Zeraati M, Sheibani M, Arasteh H. Robust self-scheduling of pvs-wind-diesel power generation units in a standalone microgrid under uncertain electricity prices. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2024; 12(2): 152-162. <https://doi.org/10.22098/joape.2023.11096.1829>
- [17] Du J, Han X, Wang J. Distributed cooperation optimization of multi-microgrids under grid tariff uncertainty: A nash bargaining game approach with cheating behaviors. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024; 155: 109644. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109644>
- [18] Xu, W., Lin, F., Jia, R., Tang, C., Zheng, Z., & Li, M. Game-Based Pricing for Joint Carbon and Electricity Trading in Microgrids. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3400392>
- [19] Leclere J, Wang J, Bian J. Joint production and energy supply planning of an industrial microgrid. *Applied Energy*. 2024; 315: 119034. <https://doi.org/10.1007/s12667-023-00645-5>
- [20] Nojavan M, Maghoul P. A Novel Dynamic Pricing Time-Based Demand Response Program for Net-Load Flexibility of Microgrids. *International Journal of Energy Research*. 2024; (1): 2104716. <https://doi.org/10.1155/2024/2104716>
- [21] Kumar A, Kiran D, Padhy N. P. Pricing strategy for local power-sharing between distribution network and microgrid operators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024; 157: 109820. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109820>
- [22] Zhang Z, Huang Y, Chen Z, Lee W.-J. Integrated demand response for microgrids with incentive-compatible bidding mechanism. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022; 58(5): 5612–5624. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3154789>
- [23] Li Y, Chen X. Dynamic energy pricing strategies in local electricity markets under renewable integration. *Applied Energy*. 2023; 341: 121048. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121048>
- [24] Wang J, Liu H, Zhao M. Multi-level game models for government subsidy allocation in renewable energy microgrids. *Energy Policy*. 2024; 185: 113525. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.113525>
- [25] Hosseini S, Karimi A, Dehghan M. Adaptive policy design for renewable microgrids under demand uncertainty. *Renewable Energy*. 2023; 209: 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.027>
- [26] Khalili R, Xu Q. Stochastic optimization of renewable microgrid operations under uncertain demand and generation. *Energy Reports*. 2022; 8: 10567–10581. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.018>