Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

The University of Tehran Press

Peer-to-Peer Electricity Trading in Nanogrid-based Community based on Game Theory Approach

Keivan Malekzadeh Viayeh[1] | Masoumeh Javadi[2] | Alfred Baghramian[3*]

1. MSc student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: keivan.malekzadeh@gmail.com
2. PhD student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: masoumeh_javadi@phd.guilan.ac.ir
3. Corresponding Author, Associate Professor, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: alfred@guilan.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 25 May 2024
Revised 26 June 2024
Accepted 28 Augusr 2024
Published Online 04 October 2024

Keywords:
Peer-to-Peer Electricity Trading,
Game Theory,
Nanogrid.

ABSTRACT

Owing to the augmenting penetration of distributed energy resources (DER) in active distribution systems and the high significance of peer-to-peer (P2P) energy trading, uncovering a proper approach to operate these resources in nanogrids (NG) is essential. In this structure, NGs behave as active participants in P2P energy dealings and reach Nash equilibrium utilizing the presented game theory algorithm. This research has developed a comprehensive model to examine the energy system dynamics employing a game theory approach named the Nikaido-Isoda function and Relaxation algorithm (NIRA). Besides, this study has analyzed the influences of various factors on the economic earnings and losses of NGs, consisting of natural gas price upsurges, renewable energy production boosts, and disconnection from the upstream grid, stressing the need for flexibility and adaptability to alterations in the energy ecosystem. Simulation outcomes reveal that with a doubling of renewable production and a tripling of fuel price in the case study, the whole NGs' participation in the P2P trades has encountered 113% growth and 5% reduction compared to the normal scenario. Therefore, the presented method leads to improved energy efficiency, decreased costs, and enhanced power system sustainability. The results of this paper could serve as a practical way to expand the usage of renewable energy and form local energy markets, helping policymakers and energy managers to design useful techniques for gaining more sustainable and flexible energy systems.

Cite this article: Malekzadeh Viayeh, K.; Javadi, M. & Baghramian, A. (2024). Peer-to-Peer Electricity Trading in Nanogrid-based Community based on Game Theory Approach. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (4), 419-442. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382114.1094

© Keivan Malekzadeh Viayeh, Masoumeh Javadi, Alfred Baghramian
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382114.1094

Introduction

To attain a reliable, cost-effective, and zero-emission power system, the operation of distributed energy resources (DER), especially based on renewable sources, has experienced substantial growth in recent years. Hence, peer-to-peer (P2P) energy trading as a novel scheme has been introduced to accelerate the mentioned targets while diminishing energy transmission and distribution expenditures. Nevertheless, implementing this type of market faces several challenges linked to the decision-making process and pricing strategies owing to the variable nature of renewable energy generation and consumption demand. Therefore, employing game theory approaches can be a proper solution to handle players' complex interactions in this market structure. However, more investigation is needed to comprehend

the influence of various motivation mechanisms on participants' decisions and manners. Therefore, this study has explored how to run and settle P2P energy trading in a neighborhood community consisting of nanogrids (NG) to optimize energy deals among them.

Methodology

The presented system consists of NGs experiencing a P2P energy market to purchase and sell electricity within a neighborhood community connected to the upstream grid. Excess energy production by each NG can be employed to charge its energy storage system, satisfy its local responsive demand, or sell to the buyer players in the market. To attain these objectives, the suggested structure has two main units: the UCDR unit and the NIRA unit. The UCDR unit is employed for the local scheduling and control of each NG's DERs to make NGs capable of partaking in energy trading while meeting their local demand. Through the community manager, the NIRA unit has been implemented to portray the competitive nature of this energy market, where participants engage in P2P, P2G, and G2P electricity interactions. To find the Nash equilibrium, the performance of the NIRA unit has been started based on the players' offers which is the UCDR unit output. Ultimately, the NIRA unit's outcome would determine the optimum share of players in selling and buying transactions.

Results and Discussion

The efficacy of the suggested process by scrutinizing simulations of P2P, P2G, and G2P energy trading in various scenarios has been evaluated in this part. The changes in participants' payoff functions because of upturns in natural gas fuel prices, depicted in Figure 9, reveal that NGs faced earnings reduction, while the upstream grid's payoff improved. Due to the surge in fuel costs, NGs' shares in sale interactions have considerably altered as illustrated in Figure 10. For instance, by a 90% and a 150% growth in the fuel price compared to the normal operation scenario, NG4's participation has lessened from 84% to 77% and 56%, respectively. Nonetheless, the shares of NG1 and NG2 in selling trades have extended, with NG1 increasing from almost zero to 10% and 17%, and NG2 rising from 16% to 28% and 38%. According to the results, most energy deals have happened between 9 AM and 5 PM when the range of renewable resources' production is high. In addition, the alteration trend of players' payoff functions due to 50% and 100% renewable energy production growth led to substantial improvements in the payoff function of NGs as shown in Figure 11. This fact has also been proved by indicating the significant contribution of players in P2P and P2G energy trading via augmenting renewable energy generation as displayed in Figure 12. On the other hand, differences in players' income because of turning the operation from on-grid mode to off-grid mode, demonstrated in Figure 13, present the NGs' payoff values have diminished, leading to higher expenses for these players.

Conclusion

NIRA, a non-cooperative game theory approach, has been used in this paper to show a proper technique for running energy deals among microsystems in a neighborhood system. This approach lets participants, following opposite objectives, compete with each other to attain more fair and effective energy trading. Simulation results display that renewable generation growth and a surge in fuel expenditures have substantially affected the energy system dynamics. This study has underlined the importance of a systemic strategy for more profitable energy management of DERs. Besides, this research exposes the necessity of understanding complicated interactions among various parts and the capability to adapt to quick changes in the energy communities.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار
سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰
انتشارات دانشگاه تهران

تجارت برق همتا به همتا در جامعه مبتنی بر نانوشبکه‌ها برپایهٔ رویکرد تئوری بازی

کیوان ملک‌زاده ویایه[۱] | معصومه جوادی[۲] | آلفرد باغرامیان[۳*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: keivan.malekzadeh@gmail.com
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: masoumeh_javadi@phd.guilan.ac.ir
۳. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: alfred@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

کلیدواژه:
سامانه‌های هیبریدی انرژی،
تولید هم‌زمان برق و حرارت،
پیل سوختی،
بهره‌وری انرژی،
پایداری.

چکیده

با توجه به افزایش نفوذ منابع انرژی توزیع‌شده (DER) در سیستم‌های توزیع فعال و اهمیت بالای تجارت انرژی همتا به همتا (P2P)، یافتن نوعی رویکرد مناسب برای بهره‌برداری از این منابع در نانوشبکه‌ها (NG) ضروری است. در این ساختار، NGها به عنوان شرکت‌کنندگان فعال در معاملات انرژی P2P رفتار می‌کنند و با استفاده از الگوریتم تئوری بازی ارائه‌شده به تعادل نش می‌رسند. این تحقیق یک مدل جامع را برای بررسی پویایی سیستم انرژی با استفاده از رویکرد تئوری بازی به نام تابع نیکایدو ـ ایزودا و الگوریتم آزادسازی (NIRA) توسعه داده است. همچنین در این مطالعه، با تأکید بر ضرورت انعطاف‌پذیری و سازگاری با تغییرات در اکوسیستم انرژی، تأثیر عوامل مختلف بر درآمد و زیان اقتصادی NGها ناشی از افزایش قیمت گاز طبیعی، افزایش تولیدات تجدیدپذیر و انفصال از شبکهٔ بالادست مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد به‌ترتیب با دو برابر شدن تولیدات تجدیدپذیر و سه برابر شدن نرخ سوخت در مطالعه موردی، مجموع میزان مشارکت NGها در معاملات P2P با رشد ۱۱۳ و افت ۵ درصد نسبت به سناریوی نرمال همراه بوده است. بنابراین، روش ارائه‌شده به بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری سیستم قدرت منجر می‌شود. نتایج این مقاله می‌تواند به عنوان نوعی راهکار عملی در گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و تشکیل بازارهای انرژی محلی به کار رود و به سیاست‌گذاران و مدیران انرژی برای طراحی تکنیک‌های مفید به منظور دستیابی به سیستم‌های انرژی پایدارتر و انعطاف‌پذیرتر کمک کند.

استناد: ملک‌زاده ویایه، کیوان؛ جوادی، معصومه و باغرامیان، آلفرد (۱۴۰۳). تجارت برق همتا به همتا در جامعه مبتنی بر نانوشبکه‌ها برپایهٔ رویکرد تئوری بازی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۳ (۴) ۴۱۹-۴۴۲.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382114.1094

© کیوان ملک‌زاده ویایه، معصومه جوادی، آلفرد باغرامیان **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.382114.1094

۱. مقدمه

در دههٔ اخیر، شتاب قابل توجهی در کمینه‌سازی انتشار آلودگی‌های کربنی و هوشمندسازی سیستم قدرت مشاهده می‌شود، به طوری که می‌توان گفت ایجاد یک شبکهٔ برق قابل اعتماد و به‌صرفه با انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر از طریق نفوذ فزایندهٔ منابع انرژی توزیع‌شده[1] (DER) میسر می‌شود [۱ و ۲]. بهره‌برداری DERهای تجدیدپذیر، از راهکارهای قابل توجه در تأمین و بهبود مدیریت انرژی است و رویکرد مؤثری را در پاسخ به مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و توسعهٔ پایدار در تأمین تقاضای انرژی فراهم می‌کند. با نصب این منابع پراکنده در سراسر جوامع و معمولاً نزدیک به بارها یعنی در موقعیت مکانی مشترکان، می‌توان به آن‌ها امکان داد تا به طور مستقل انرژی خود را تولید و مصرف کنند [۳]. از سوی دیگر، علاوه بر افزایش تولید برق، بهره‌برداری DERها در هر دو حالت مستقل و متصل‌به‌شبکه به بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان توان می‌انجامد. اگرچه ارائهٔ فرصت‌های بیشتر برای ادغام این منابع به شبکهٔ توزیع از طریق یک محیط مقررات‌زدایی‌شده با دسترسی آزاد امکان‌پذیر خواهد بود [۴].

برای کاهش اتکا به شبکه‌های برق متمرکز، مشترکان باید قادر باشند به طور مستقیم و فعال در بازار انرژی مشارکت کنند. از این‌رو، تجارت انرژی همتا به همتا[2] (P2P) به عنوان یک روش مؤثر معرفی شده تا بهبود کارایی و امنیت سیستم‌های توزیع انرژی را فراهم کند. در این رویکرد، مشترکانی که DERهایی مانند پنل‌های فتوولتائیک[3] (PV) یا توربین‌های بادی دارند، می‌توانند در تبادلات تجاری انرژی شرکت کنند، به طوری که یا انرژی مازاد خود را به سایر همتایان در منطقهٔ همسایگی‌شان می‌فروشند و یا در صورت رویارویی با کمبود انرژی به عنوان خریدار در بازار حاضر می‌شوند. کاهش هزینه‌های انتقال و توزیع انرژی، کاهش اتلاف، افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود مقاومت سیستم‌های توزیع انرژی در برابر اختلالات و حملات و نیز ترویج گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از مزایای این روش به حساب می‌آید [۱ و ۵]. مدل‌های تجارت انرژی P2P را می‌توان به سه نوع اصلی طبقه‌بندی کرد [۶]: ۱) تجارت کاملاً غیرمتمرکز، که در آن تراکنش‌های انرژی، به طور مستقیم بین همتایان و بدون هیچ واسطه‌ای صورت می‌پذیرد. برپایی این نوع سیستم تجارت به پلتفرم‌های قوی برای مدیریت ایمن نیازمند است. ۲) تجارت مبتنی بر جامعه، که در آن مبادلهٔ انرژی در جامعه‌ای از خریداران و فروشندگان تحت نظارت یک مدیر جامعه یا اپراتور بازار محلی رخ می‌دهد و ۳) تجارت ترکیبی، که از تلفیق ویژگی‌های تجارت مستقیم و مبتنی بر جامعه حاصل شده و ارائه‌دهندهٔ انعطاف‌پذیری و سازگاری با شرایط مختلف نظارتی و بازاری است. با این‌حال، این مدل‌ها از نظر ساختار پیاده‌سازی مزایا و معایبی دارند. بازارهای کاملاً غیرمتمرکز با وجود ارائهٔ شفافیت، کاهش هزینهٔ تراکنش و سطح کنترل بالاتر کاربر، با چالش‌های نظارتی، امنیتی و مقیاس‌پذیری روبه‌رو هستند. در مقابل، بازارهای مبتنی بر جامعه، با وجود بهینه‌سازی منابع انرژی محلی، گسترش مشارکت در سطح جامعه و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، با مشکلات ناشی از پیچیدگی هماهنگی و هزینه‌های اولیهٔ بالا درگیر هستند. در این بین، اگرچه بازارهای ترکیبی از مزایای هر دو نوع قبل مانند انعطاف‌پذیری، سازگاری و بهبود کارایی برخوردار هستند، اما سطح بالای پیچیدگی در پیاده‌سازی در کنار چالش‌های نظارتی و هماهنگی از موانع این ساختار هستند [۷ ـ ۹].

همان‌طورکه گفته شد، تجارت برق P2P در جوامعی متشکل از مشترکان فعال در سطح توزیع که در این مطالعه به آن‌ها نانوشبکه[4] (NG) اطلاق می‌شود، با چالش‌هایی همراه است. ممکن است حضور هر مشترک در بازار به واسطهٔ تصمیمات و استراتژی‌های خاص‌اش به افزایش پیچیدگی فرایند تصمیم‌گیری نهایی در بازار بینجامد [۱۰]. از این‌رو، تئوری بازی یکی از راهکارهایی است که به تسهیل مدل‌سازی و تحلیل تعاملات بین بازیگران در این شرایط کمک می‌کند [۱۱]. به‌علاوه، با توجه به وجود عدم قطعیت در سطح تولیدات منابع تجدیدپذیر و بار مصرف‌کنندگان، چگونگی تعیین قیمت و ظرفیت بهینهٔ همتایان در فرایند تسویهٔ تبادلات بازار انرژی از موضوعات چالش‌برانگیز در تجارت انرژی P2P به شمار می‌آید [۵، ۱۰ و ۱۲].

از این‌رو، در چندین مطالعه به تحلیل و بهینه‌سازی تجارت برق P2P در جوامع متشکل از NGها با استفاده از رویکردهای مختلف پرداخته شده است. به عنوان مثال در [۱۰]، یک استراتژی قیمت‌گذاری دومرحله‌ای برای تجارت P2P ارائه شده که در

1. Distributed Energy Resources
2. Peer-to-peer
3. Photovoltaic Panels
4. Nanogrid

مرحلهٔ اول از پیش‌بینی قیمت دومرحله‌ای برای تنظیم معاملات استفاده شده و در مرحلهٔ دوم، از تئوری بازی هم‌زمان برای بهینه‌سازی تعادل بازار و افزایش رفاه اجتماعی بهره گرفته شده است. در [۱۲] نیز یک مدل مبتنی بر تئوری بازی برای تجارت انرژی P2P در میان پرسیومرها[1] در یک ریزشبکه ارائه شده که شامل مدل‌سازی رقابت قیمت بین فروشندگان به عنوان یک بازی غیرهمکارانه، پویایی خریدار برای انتخاب فروشندگان به عنوان یک بازی تکاملی[2] و تعامل بین خریداران و فروشندگان به عنوان یک بازی استکلبرگ[3] است. در این مقاله، از دو الگوریتم تکرارشونده نیز برای دستیابی به تعادل در این بازی‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، یک مدل بازی استکلبرگ برای تجارت انرژی P2P در [۱۳] توسعه داده شده است که در آن حراج‌گذار به عنوان رهبر و پرسیومرها به عنوان پیروان عمل می‌کنند. با استفاده از حراج دوطرفه در این مقاله، حراج‌گذار برندگان معاملات را تعیین کرده و قیمت‌ها را برای بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی مشخص می‌کند؛ در حالی که پرسیومرها با هدف حداکثرسازی رفاهشان در مورد کمیت‌های انرژی خود تصمیم می‌گیرند. مدل‌های به‌اشتراک‌گذاری یا معاملهٔ انرژی P2P برای ساختمان‌های انرژی برپایهٔ بازی غیرهمکارانه در [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، مدیریت هماهنگ اشتراک انرژی P2P در جامعه ای از ساختمان‌های انرژی در [۱۵]، از طریق یک رویکرد مبتنی بر بازی غیرهمکارانه با قیود سراسری[4] مدل‌سازی شده است. در این مطالعه، از یک الگوریتم توزیع‌شده برای یافتن تعادل بازی استفاده شده است. به‌علاوه، از آنجا که ویژگی پیچیدگی مالکیت DERها به‌شدت بر تجارت انرژی P2P تأثیر می‌گذارد؛ یک طرح تجارت غیرمتمرکز بدون نیاز به دسترسی به اطلاعات خصوصی عوامل حاضر در ریزشبکه در [۱۶] ارائه شده و از طریق نوعی رویکرد مبتنی بر تئوری بازی غیرهمکارانه به بررسی این اثرات بر منافع شرکت‌کنندگان در معاملات P2P پرداخته شده است. در مقابل در [۱۷]، یک چارچوب تئوری بازی برای تجارت انرژی P2P در NGها با فرمول‌بندی فرایند معاملات به عنوان یک بازی ائتلافی ارائه شده است تا کارایی اقتصادی، کاهش هزینهٔ برق، بهره‌مندی از افزایش عرضهٔ برق و کمک به اپراتورهای شبکه برای اتخاذ بهترین تصمیمات اقتصادی و اجتماعی را در کنار تشویق مشتریان برای مشارکت در فرایند معاملات فراهم کند. در [۱۸] نیز یک روش مدیریت توان برای خوشه‌های NG با استفاده از یک مدل بازی همکارانه معرفی شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، مصرف توان و تأخیر زمان‌بندی بارها کمینه شده است. به‌علاوه در این مطالعه برای بهبود کارایی تجارت انرژی P2P، پیش‌بینی تقاضای بار و تولید خورشیدی با استفاده از شبکهٔ واحد بازگشتی دروازه‌ای[5] انجام شده است. همچنین، همکاری اجتماعی برای تجارت انرژی P2P در [۱۹]، با استفاده از بازی تشکیل ائتلاف بررسی شده است. این روش به پرسیومرها اجازه داده تا با مقایسهٔ مزایای استفاده از باتری‌هایشان، گروه‌های ائتلاف اجتماعی مناسب را برای معاملات P2P تشکیل دهند. در [۲۰]، ارائهٔ یک مدل سیستم در شبکهٔ توزیع ولتاژ پایین با استفاده از الگوریتمی برای تشکیل ائتلاف بزرگ[6] و پایدار در تجارت P2P براساس اولویت‌هایی مانند تقاضای انرژی، تولید، موقعیت جغرافیایی و قیمت بررسی شده است. این مدل به همتایان کمک کرده تا با تشکیل ائتلاف در هر بازهٔ زمانی، درآمد خود را بیشینه کنند. از سوی دیگر، در [۲۱]، بهینه‌سازی مقدار انرژی مورد معامله و قیمت خرید/فروش آن در بازارهای P2P توسط اجرای یک رویکرد رقابتی با دو حراج با استفاده از دو الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق چندعاملی دنبال شده است. همچنین، در [۲۲]، مسئلهٔ بهینه‌سازی چندهدفه برای بهبود برابری منافع مصرف‌کنندگان و کارایی تخصیص منابع در تجارت انرژی P2P با استفاده از شش الگوریتم تکاملی حل شده است.

براساس شکاف‌های شناسایی‌شده در مطالعات موجود، پیاده‌سازی کارآمد تجارت انرژی P2P در NGها به توسعهٔ مدل‌های تئوری بازی پیچیده‌تر نیازمند است تا بتواند تأثیر افزایش تولیدات تجدیدپذیر و تغییرات قیمت انرژی را در محیط‌های پویا و نامطمئن مدل‌سازی کند. این مدل‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که تعاملات پیچیده بین بازیگران مختلف را با در نظر گرفتن تأثیرات متقابل، نقش شبکهٔ بالادست و بهینه‌سازی مداوم در شرایط تغییرات سریع انرژی در بر بگیرند. به‌علاوه، از آنجا که رفتار بازیگران

1. Prosumer
2. Evolutionary Game
3. Stackelberg Game
4. Global Constraints
5. Gated Recurrent Unit Network
6. Grand Coalition

(NGها) و الگوی تولید و مصرف آن‌ها متأثر از سیاست‌های تغییر قیمت انرژی و رشد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است، هنوز نیاز به تحلیل و بررسی بیشتر در مورد تأثیر مکانیسم‌های تشویقی مختلف بر فرایندهای تصمیم‌گیری و رفتار مشتریان احساس می‌شود تا به بهبود مدیریت انرژی و کاهش هدررفت آن بینجامد و به پیشرفت در تأمین انرژی پایدارتر و مؤثرتر کمک کند.

در این پژوهش، به بررسی مفهوم معاملات انرژی P2P در یک جامعه همسایگی متصل به شبکهٔ بالادست متشکل از چندین NG که از نوع پرسیومر هستند، پرداخته شده است. این مسئلهٔ بهینه‌سازی چندهدفه از طریق رویکرد تئوری بازی غیرهمکارانه به نام الگوریتم NIRA، ارائه‌شده در [۲۳]، حل شده تا به توسعهٔ یک مدل جامع برای تحلیل پویایی ریزسیستم‌های انرژی با هدف تأکید بر ضرورت انعطاف‌پذیری و سازگاری با تغییرات در محیط انرژی بپردازد و امکان برقراری و بهبود معاملات انرژی P2P و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تأمین انرژی در جوامع محلی و NGها را مرتفع کند.

۲. روش کار

در این قسمت به معرفی ساختار پیشنهادی تجارت برق P2P در جامعه‌ای مبتنی بر NGها، به انضمام ارائهٔ مدل‌سازی ریاضی مسئله و روند پیاده‌سازی آن پرداخته شده است.

۲. ۱. ساختار پیشنهادی

نمای کلی ساختار تحت مطالعه مطابق شکل ۱ است. ساختار پیشنهادی متشکل از n عدد NG در یک سیستم همسایگی است که در بازار P2P مبتنی بر جامعه به خرید و فروش برق با یکدیگر و شبکهٔ بالادست می‌پردازند. با تجهیز هر NG به کنتور هوشمند و زیرساخت‌های ارتباطی، جریان دوطرفه تبادل داده بین NGها و مدیر جامعه برقرار است. مدیر جامعه وظیفهٔ انجام امور مالی و تسویهٔ بازار را ضمن برقراری قیود فنی سیستم همسایگی به عهده دارد. در این مطالعه، هر NG به پنل‌های PV پشت‌بامی که جزء منابع تجدیدپذیر غیرقابل‌کنترل هستند، تجهیز شده است. به‌علاوه، در کنار باتری به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی[1] (ES)، میکروتوربین[2] (MT) که نیز در دستهٔ منابع قابل کنترل قرار دارد، برای تأمین تقاضا هر NG به صورت محلی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. به این‌ترتیب، مجموعهٔ ادوات تولید در هر NG در رویارویی با عوامل عدم قطعیت، قابل راهبری هستند. در این ساختار، قیمت مبادلهٔ برق در بازار در بین همتایان بر پایهٔ تعرفهٔ تنظیمی زمان استفاده[3] (TOU) در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، تقاضای الکتریکی در هر NG در سیستم تحت مطالعه دربرگیرندهٔ دو دسته است:

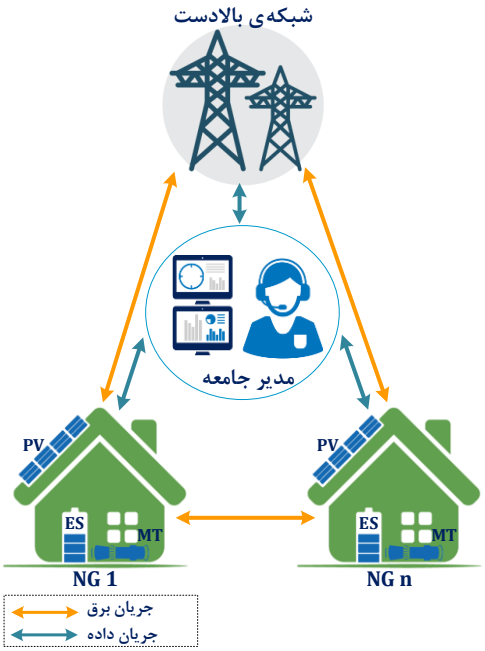
۱. بار غیرپاسخ‌گو[4] (NRL): این تقاضا به عنوان بار بحرانی و غیرقابل‌کنترل تعریف شده که حتماً باید در هر بازهٔ زمانی برآورده شود.
۲. بار پاسخ‌گو[5] (RL): با توجه به سیگنال‌های قیمت، انتقال این تقاضا به عنوان بار قابل کنترل به سایر بازه‌های زمانی طی روز امکان‌پذیر است.

در این مطالعه برای سادگی حل مسئله، فرض شده که NGهای همسایه همه به یک خط انتقال متصل به شین بی‌نهایت وصل هستند. همچنین، شبکهٔ بالادست در صورت نیاز، در تعاملات سیستم همسایگی ورود کرده تا با تأمین کسری یا خرید مازاد توان، تطبیق عرضه و تقاضا را فراهم کند. از این‌رو، از تلفات نیز صرف‌نظر شده است.

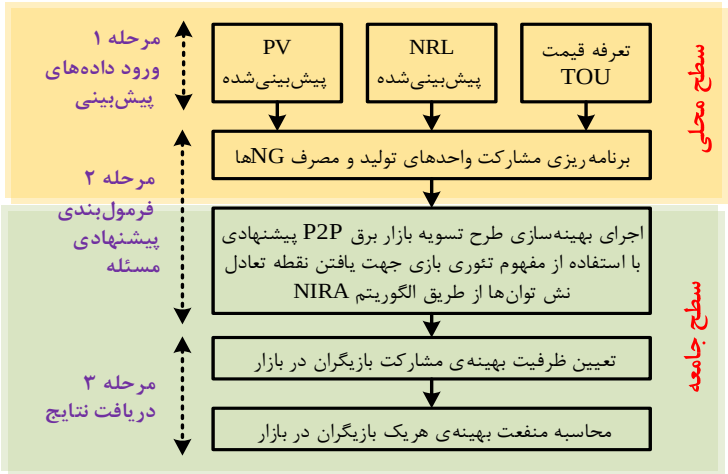
شکل ۲ بیانگر ساختار بازار پیشنهادی برای تجارت انرژی P2P در یک سیستم همسایگی است. در ساختار دوسطحی پیشنهادی، سطح محلی شامل ۱) دریافت داده‌های پیش‌بینی توان و قیمت و ۲) برنامه‌ریزی محلی NGها برای ورود به معاملات خرید و فروش انرژی است. در سطح جامعه، به منظور دستیابی به نتایج مطلوب با استفاده از توابع هدف و قیود مختص هر بازیگر و نیز سیستم همسایگی، مقادیر بهینه‌ای برای متغیرهای تعریف‌شده در سطح اول تعیین می‌شود.

1. Energy Storage
2. Microturbine
3. Time of Use
4. Non-responsive Load
5. Responsive Demand

به بیان دیگر، در سطح محلی، ابتدا داده‌های پیش‌بینی مربوط به تقاضای NRL، تولید واحد PV و همچنین قیمت برق TOU براساس طرح تعرفهٔ تنظیمی در هر ساعت مقداردهی می‌شود. سپس، به طور محلی برنامه‌ریزی داخلی واحدهای تولید و مصرف هر NG برای ورود به بازار از طریق الگوریتم برنامه‌ریزی مشارکت واحدها مبتنی بر پاسخ‌گویی تقاضا[1] (UCDR)، معرفی‌شده در [۲۴]، اجرا می‌شود. خروجی این بخش مشخص می‌کند که کدام‌یک از NGها در نقش خریدار و کدام‌یک در نقش فروشنده در بازار حاضر می‌شوند. در سطح جامعه نیز فرایند بهینه‌سازی طرح تسویهٔ بازار برق P2P پیشنهادی با استفاده از مفهوم تئوری بازی از طریق اجرای رویکرد NIRA دنبال می‌شود تا نقطهٔ تعادل نش تعاملات خرید و فروش توان به عنوان نقطهٔ بهینه قابل تعیین باشد. سپس، با پردازش اطلاعات و بهره‌گیری از مفهوم تئوری بازی، منفعت بهینهٔ هریک از بازیگران در بازار مشخص می‌شود. هدف از پیاده‌سازی این سیستم، ارائهٔ مدلی جامع برای شبکه‌های NG یا خانه‌های هوشمند است که در آن، بازیگران ذی‌نفع می‌توانند با همتایان خود برای کسب سود بیشتر رقابت کنند. در این ساختار بازار، هر NG به‌سهولت می‌تواند به بازار پیشنهادی وارد یا از آن خارج شود.



شکل ۱. نمای کلی ساختار تحت مطالعه



شکل ۲. نمای کلی از ساختار بازار پیشنهادی

1. Unit-commitment Based on Demand Response

در این چارچوب، بازیگران شرکت‌کننده در بازار شامل NGهای خریدار و فروشنده در کنار شبکهٔ بالادست هستند. به طوری که NGهای فروشنده به دنبال به حداکثر رساندن سود خود از طریق فروش انرژی به سایرین و NGهای خریدار در پی کم کردن هزینه‌های خود با استفاده از مدیریت تقاضا هستند. به‌علاوه، شبکهٔ بالادست به دنبال ترغیب مالکان منازل هوشمند برای بهره‌گیری هرچه بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر است. به این‌منظور، شبکهٔ بالادست با هدف کاهش عدم تعادل توان، مازاد انرژی تولیدی NGها را بعد از شرکت در تعاملات P2P خریداری کرده و در مواقعی که تولیدات سیستم همسایگی پاسخ‌گوی نیاز NGهای خریدار نباشد، شبکه به فروش و تأمین تقاضای آن‌ها اقدام می‌کند. بنابراین، انگیزهٔ NGها برای سرمایه‌گذاری در نصب DERهای تجدیدپذیر افزایش یافته و درنهایت، کارایی سیستم ارتقا می‌یابد.

درخور یادآوری است، در دوره‌های زمانی‌که تولیدات محلی NGها از میزان انرژی مورد نیازشان فراتر رود، انرژی مازاد تولید شده ممکن است براساس وضعیت شارژ باتری[1] (SOC) برای شارژ بیشتر منبع ES در NGها و یا تأمین تقاضای RL به‌کار رود. همچنین این انرژی مازاد ممکن است براساس برنامه‌ریزی محلی هر NG، برای فروش به شبکهٔ بالادست و یا سایر NGها در بازار پیشنهادی سیستم همسایگی عرضه شود.

۲. ۲. فرمول‌بندی ریاضی مسئله

در این بخش به بیان مدل‌سازی ریاضی المان‌های تولید و مصرف در NGهای شرکت‌کننده در مسئلهٔ تجارت انرژی P2P و همچنین، توابع هدف و قیود بازیگران پرداخته شده است [۱۶، ۲۳، ۲۵ و ۲۶].

۲. ۲. ۱. مدل‌سازی تجهیزات

روابط ریاضی ۱ تا ۷ بیانگر مدل‌سازی ریاضی DERهای نصب‌شده برای تولید و ذخیره‌سازی برق در NGها و همچنین، انواع بارهای مصرفی آن‌ها است.

$$P_{t,i}^{PV} = \eta_i^{PV} \times A_i^{PV} \times G_t, t = 1, 2, ...24, i = 1, 2, .., n \quad (۱)$$

در رابطهٔ ۱، $P_{t,i}^{PV}$ توان تولیدی پنل‌های PV در NG ام i در بازهٔ زمانی t است. همچنین، η_i^{PV} بازده PV، A_i^{PV} مساحت پنل‌های PV در NG ام i و G_t شدت تابش خورشید در بازهٔ زمانی t است.

$$E_{(t+1),i}^{ES} = E_{t,i}^{ES} + \left(\left(\eta_i^{ES+} \times P_{t,i}^{ES+} \right) - \frac{P_{t,i}^{ES-}}{\eta_i^{ES-}} \right) \times \Delta t \quad (۲)$$

در رابطهٔ یادشده، $E_{t,i}^{ES}$ ظرفیت انرژی ES در NG ام i در زمان t، η_i^{ES+} و η_i^{ES-} بازده شارژ و دشارژ ES، $P_{t,i}^{ES+}$ و $P_{t,i}^{ES-}$ توان شارژ و دشارژ ES در NG ام i در زمان t است.

با توجه به اینکه در هر بازهٔ زمانی t، ES مستقر در NG ام i یا در حالت شارژ و یا دشارژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، مد فعالیت این المان برحسب متغیر باینری شارژ ($X_{t,i}^{ES+}$) به صورت رابطهٔ ۳ تعریف شده است:

$$X_{t,i}^{ES+} \in \{0,1\}$$

$$\forall X_{t,i}^{ES+} = 1 \rightarrow P_{t,i}^{ES+} = \frac{E_{(t+1),i}^{ES} - E_{t,i}^{ES}}{\eta_i^{ES+}}, \; P_{t,i}^{ES-} = 0 \quad (۳)$$

$$\forall X_{t,i}^{ES+} = 0 \rightarrow P_{t,i}^{ES+} = 0, \; P_{t,i}^{ES-} = \eta_i^{ES-} \times \left(E_{(t+1),i}^{ES} - E_{t,i}^{ES} \right)$$

برای جلوگیری از شارژ و تخلیه بیش از حد، وقتی که سطح SOC در NG ام i به بالاترین و پایین‌ترین حد برسد، ES به حالت آماده‌باش[2] تغییر وضعیت می‌دهد.

1. State-of-charge
2. Stand-by Mode

$$SOC_{t,i}^{ES} = \frac{E_{t,i}^{ES}}{E_{Tot,i}^{ES}} \quad (۴)$$

در رابطهٔ ۴ SOC حالت شارژ ES در NG iام است که در لحظهٔ t ($SOC_{t,i}^{ES}$) برابر با حاصل تقسیم مقدار انرژی ذخیره‌شده در لحظهٔ t ($E_{t,i}^{ES}$) روی مقدار ظرفیت کل باتری در NG iام ($E_{Tot,i}^{ES}$) برحسب kWh است.

$P_{t,i}^{MT}$ توان تولیدی MT در NG iام در زمان t، با توجه به رابطهٔ ۵ قابل محاسبه است که در آن، $F_{i,t}$ جریان سوخت و a_0، a_1 و a_2 ضرایب ثابت هستند.

$$P_{t,i}^{MT} = a_0 + a_1 \times F + a_2 \times F^2 \quad (۵)$$

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تقاضای برق مصرفی ساکنان NG iام در زمان t ($P_{i,t}^{D}$)، متشکل از تقاضای غیرقابل قطع NRL در لحظهٔ t ($P_{t,i}^{NRL}$) و تقاضای قابل کنترل RL مطابق با رابطهٔ ۶ است:

$$P_{i,t}^{D} = P_{t,i}^{NRL} + \left(X_{t,i}^{RL+} \times P_{t,i}^{RL+}\right) - \left((1 - X_{t,i}^{RL+}) \times P_{t,i}^{RL-}\right) \quad (۶)$$

از آنجا که در هر بازهٔ زمانی t در NG iام، تأمین RL ($P_{t,i}^{RL+}$) یا انتقال آن ($P_{t,i}^{RL-}$) به دوره‌های زمانی با قیمت ارزان‌تر امکان پذیر است؛ این تقاضا، یا در مد تأمین و یا در مد انتقال در هر بازهٔ زمانی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. مد تأمین این تقاضا با توجه به متغیر باینری $X_{t,i}^{RL+}$ به صورت رابطهٔ ۷ تعریف شده است:

$$\begin{aligned} &X_{t,i}^{RL+} \in \{0,1\} \\ &\forall X_{t,i}^{RL+} = 1 \rightarrow \text{RL in meeting mode},\ \ 0 \le P_{t,i}^{RL+} \le \zeta \times P_{t,i}^{NRL},\ \ P_{t,i}^{RL-} = 0 \\ &\forall X_{t,i}^{RL+} = 0 \rightarrow \text{RL in shifting mode},\ \ P_{t,i}^{RL+} = 0,\ \ 0 \le P_{t,i}^{RL-} \le \zeta \times P_{t,i}^{NRL} \end{aligned} \quad (۷)$$

ζ نشان‌دهندهٔ این است که مقدار RL به عنوان بخشی از بار NRL در نظر گرفته شده است.

۲. ۲. ۲. توابع هدف

با توجه به روابط ۸، اگر NGها از مازاد تولید داخلی برخوردار باشند به عنوان NG فروشنده (NG-) در بازار مشارکت می‌کنند و اگر با کمبود در تأمین تقاضای داخلی مواجه باشند به عنوان NG خریدار (NG+) در بازار حاضر هستند که میزان مشارکت با توجه به تفاضل عرضه و تقاضای داخلی هر NG ($\Delta P_{t,i}^{NG}$) در مد فروش یا خرید مشخص می‌شود.

$$\begin{aligned} &\Delta P_{t,i}^{NG} = P_{t,i}^{PV} + P_{t,i}^{MT} + P_{t,i}^{ES-} + P_{t,i}^{RL-} - (P_{t,i}^{ES+} + P_{t,i}^{NRL} + P_{t,i}^{RL+}) \\ &\forall \Delta P_{t,i}^{NG} > 0 \rightarrow \text{NG}_i \text{ in selling mode} \\ &\forall \Delta P_{t,i}^{NG} < 0 \rightarrow \text{NG}_i \text{ in buying mode} \end{aligned} \quad (۸)$$

۲. ۲. ۲. ۱. NGهای فروشنده

در روابط ۹ و ۱۰ بیشینه‌سازی سود به عنوان تابع هدف بازیگران NG فروشنده در جامعه از تفاضل درآمد حاصل از فروش مازاد برق تولیدی و هزینه‌های بهره‌برداری در هر ساعت حاصل می‌شود.

$$\max\ \ J_{t,i}^{NG-} = \mathrm{R}_{t,i}^{NG-} - \mathrm{C}_{t,i}^{NG-},\ \ t \in \{1,2,...,24\},\ \ i \in \{1,2,...,n\} \quad (۹)$$

$$\mathrm{R}_{t,i}^{NG-} = \pi_t^{TOU} \times (P_{t,i}^{P2P-} + P_{t,i}^{P2G}) \times \Delta t \quad (۱۰)$$

در روابط یادشده، $\mathrm{R}_{i,t}^{NG-}$ مجموع درآمد ناشی از فروش برق توسط NG فروشندهٔ iام در زمان t در سیستم همسایگی است که در آن $P_{t,i}^{P2P-}$ و $P_{t,i}^{P2G}$ به‌ترتیب میزان برق فروخته‌شده توسط NG iام به سایر همتایان و شبکهٔ بالادست است. همچنین، π_t^{TOU} قیمت تبادلات برق برپایهٔ زمان استفاده در بین شرکت‌کنندگان در بازار P2P در زمان t است.

$$\mathrm{C}_{t,i}^{NG-} = \pi^{f} \times P_{t,i}^{MT} \times \Delta t \quad (۱۱)$$

در این مطالعه، از هزینهٔ بهره‌برداری PV در مقایسه با هزینهٔ بهره‌برداری سایر ریزمنابع، با توجه به ناچیز بودن آن صرف‌نظر شده است. با توجه به رابطهٔ ۱۱، $C_{i,t}^{NG-}$ هزینهٔ تأمین سوخت ریزمنبع MT در NG iام در زمان t برای تولید محلی برق و π^{f} قیمت سوخت گاز طبیعی به ازای تولید یک کیلووات‌ساعت برق است که طی یک شبانه‌روز ثابت در نظر گرفته شده است.

۲. ۲. ۲. ۲. NGهای خریدار

در رابطهٔ ۱۲، کمینه‌سازی هزینه به عنوان تابع هدف بازیگران NG خریدار jام در جامعه در نظر گرفته شده که ناشی از هزینه‌های بهره‌برداری واحد MT و همچنین، خرید برق از همتایان طی انجام معاملات P2P در سیستم همسایگی در کنار خرید برق از شبکهٔ بالادست در زمان t است.

$$\min \ \mathrm{J}_{t,j}^{NG+} = \mathrm{C}_{t,j}^{NG+}, \ t \in \{1,2,...,24\}, \ j \in \{1,2,...,n\} \quad (۱۲)$$

$$\mathrm{C}_{t,j}^{NG+} = \left(\left(\pi^{f} \times P_{t,j}^{MT}\right) + \left(\pi_{t}^{TOU} \times \left(P_{t,j}^{P2P+} + P_{t,j}^{G2P}\right)\right)\right) \times \Delta t \quad (۱۳)$$

در رابطهٔ ۱۳، $P_{t,j}^{P2P+}$ و $P_{t,j}^{G2P}$ به‌ترتیب میزان برق خریداری‌شده در بازار توسط NG jام در زمان t از سایر همتایان و شبکهٔ بالادست است.

۲. ۲. ۲. ۳. شبکهٔ بالادست

با توجه به روابط ۱۴ـ ۱۶، بیشینه‌سازی سود (J_{t}^{G}) به عنوان تابع هدف شبکهٔ بالادست در جامعه از تفاضل درآمد R_{t}^{G} حاصل از میزان برق فروخته‌شده به NGها و هزینهٔ C_{t}^{G} برپایهٔ میزان برق خریداری‌شده از آن‌ها در لحظهٔ t تعریف شده است.

$$\max \ \mathrm{J}_{t}^{G} = \mathrm{R}_{t}^{G} - \mathrm{C}_{t}^{G}, \ t \in \{1,2,...,24\} \quad (۱۴)$$

$$\mathrm{R}_{t}^{G} = \pi_{t}^{TOU} \times \sum_{j} P_{t,j}^{G2P} \times \Delta t \quad (۱۵)$$

$$\mathrm{C}_{t}^{G} = \pi_{t}^{TOU} \times \sum_{i} P_{t,i}^{P2G} \times \Delta t \quad (۱۶)$$

۲. ۲. ۳. قیود

تصمیمات بهینهٔ هر NG تابع شرایط فنی و محدودیت‌های ریزمنابع و بارهای محلی آن ضمن برآوردن قیود کلی سیستم همسایگی در تطابق بین عرضه و تقاضا در جامعهٔ مورد مطالعه است. در ادامه، قیود مورد بررسی در مسئلهٔ بهینه‌سازی ارائه شده است:

۲. ۲. ۳. ۱. قیود تعادل توان

NGها می‌توانند در صورت مواجهه با کمبود برق، آن را از شبکهٔ بالادست و یا NGهای همتا در سیستم همسایگی خریداری کنند. همچنین، قادرند در صورت رویارویی با مازاد تولید محلی بعد از تأمین تقاضایشان، برق اضافی را در ESها ذخیره کنند یا به سایر NGهای همتا و شبکهٔ بالادست بفروشند. بنابراین، ضمن مشارکت بهینه در بازار، قید تعادل بین عرضه و تقاضای برق در هر NG iام باید برآورده شود:

$$\begin{cases} \forall \Delta P_{t,i}^{NG} > 0 \rightarrow \Delta P_{t,i}^{NG} = P_{t,i}^{P2P-} + P_{t,i}^{P2G} \\ \forall \Delta P_{t,j}^{NG} < 0 \rightarrow \Delta P_{t,j}^{NG} = P_{t,j}^{P2P+} + P_{t,j}^{G2P} \end{cases}, \ i \neq j, i \ \& \ j \in \{1,2,...,n\} \quad (۱۷)$$

از سوی دیگر، با توجه به فرض نبود تلفات در سیستم همسایگی تحت مطالعه، تطبیق عرضه و تقاضا نیز در کل سیستم باید برقرار باشد:

$$\sum_{i}\left(P_{t,i}^{P2P-}+P_{t,i}^{P2G}\right)=\sum_{j}\left(P_{t,j}^{P2P+}+P_{t,j}^{G2P}\right),\ i\neq j,i\ \&\ j\in\{1,2,...,n\} \quad (۱۸)$$

۲. ۲. ۳. ۲. قیود نامنفی شبکه

در این پژوهش، برای نشان دادن میزان توان مبادله‌شده بین NGها و شبکهٔ بالادست در بازار، به‌ترتیب از دو متغیر $P_{t,i}^{P2G}$ و $P_{t,j}^{G2P}$ در مد فروش و خرید استفاده شده است. این متغیرها باید غیرمنفی باشند:

$$0\le P_{t,i}^{P2G},\ \ i\in\{1,2,...,n\} \quad (۱۹)$$

$$0\le P_{t,j}^{G2P},\ \ j\in\{1,2,...,n\} \quad (۲۰)$$

۲. ۲. ۳. ۳. قیود نامنفی تبادلات توان P2P

$$0\le P_{t,i}^{P2P-},\ \ i\in\{1,2,...,n\} \quad (۲۱)$$

$$0\le P_{t,j}^{P2P+},\ \ j\in\{1,2,...,n\} \quad (۲۲)$$

۲. ۲. ۳. ۴. قیود بهره‌برداری ES

می‌توان از طریق ESها، برق را در دوره‌های زمانی با قیمت پایین ذخیره کرد و در دوره‌های اوج مصرف برای کاهش قبوض انرژی در NGها، آزاد کرد و یا بعد از تأمین تقاضای محلی در هر NG، انرژی اضافی تولیدشده توسط سیستم‌های PV و MT را ذخیره کرد و از طریق مشارکت در معاملات P2P و P2G به فروش رساند. در این راستا، باید به محدودیت‌های عملیاتی ESها مانند قیود نرخ شارژ/دشارژ و ظرفیت SOC توجه کرد.

$$0\le P_{t,i}^{ES+}\le \overline{P}_i^{ES+},\ \ \forall t \quad (۲۳)$$

$$0\le P_{t,i}^{ES-}\le \overline{P}_i^{ES-},\ \ \forall t \quad (۲۴)$$

$$SOC_{(t+1),i}^{ES}-SOC_{t,i}^{ES}=\frac{\left(\eta_i^{ES+}\times P_{t,i}^{ES+}\right)-\frac{P_{t,i}^{ES-}}{\eta_i^{ES-}}}{E_{Tot,i}^{ES}}\times\Delta t \quad (۲۵)$$

$$\underline{SOC}_i^{ES}\le SOC_{t,i}^{ES}\le \overline{SOC}_i^{ES} \quad (۲۶)$$

۲. ۲. ۳. ۵. قید بهره‌برداری MT

MT در لحظهٔ t تحت شرایط زیر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که در آن $\underline{P}_i^{MT}$ و $\overline{P}_i^{MT}$ به‌ترتیب حداقل و حداکثر توان خروجی در زمانی است که MT نصب‌شده در NG iام در حال فعالیت باشد.

$$\underline{P}_i^{MT}\le P_{t,i}^{MT}\le \overline{P}_i^{MT},\quad \forall t \quad (۲۷)$$

۲. ۲. ۳. ۶. قید بهره‌برداری PV

محدودیت کاهش توان PV در زمان t براساس حداکثر توان PV نصب‌شده در NG iام به شرح زیر است:

$$0\le P_{t,i}^{PV}\le \overline{P}_i^{PV},\quad \forall t \quad (۲۸)$$

۲. ۲. ۳. ۷. قیود کنترل RL

این تقاضا در مد تأمین و یا انتقال در هر بازهٔ زمانی با توجه به قیود زیر کنترل می‌شود که در آن k_δ و k_θ حداکثر RL- و RL+ بین دو دورهٔ متوالی برای همهٔ بازه‌های زمانی است.

$$-k_{\delta} \le P_{t,i}^{RL-} - P_{(t-1),i}^{RL-} \le k_{\delta} \quad (۲۹)$$

$$-k_{\theta} \le P_{t,i}^{RL+} - P_{(t-1),i}^{RL+} \le k_{\theta} \quad (۳۰)$$

۲. ۳. فرایند پیاده‌سازی ساختار پیشنهادی

فلوچارت پیاده‌سازی ساختار پیشنهادی در شکل ۳ ارائه شده که از دو واحد اصلی به نام‌های واحد UCDR و واحد NIRA تشکیل شده است. نحوهٔ پیاده‌سازی هریک از این واحدها به همراه وظیفه و هدف پیاده‌سازی آن‌ها در ادامه تشریح شده است. به‌علاوه، شبه‌کد روند پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در الگوریتم ۱ توضیح داده شده است.

۲. ۳. ۱. واحد UCDR

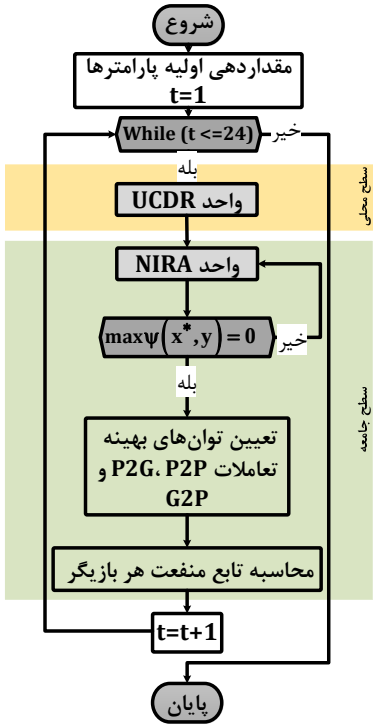
این واحد در حقیقت به برنامه‌ریزی داخلی DERهای محلی هر NG جهت شرکت در بازار تبادل انرژی P2P ضمن پاسخ‌گویی به تقاضای داخلی‌اش می‌پردازد. یعنی در سطح محلی، وظیفهٔ مدیریت انرژی داخلی هر NG به عهدهٔ این واحد است. به‌علاوه، عملکرد این واحد تحت تأثیر مقادیر ورودی اعمال‌شده از قبیل توان PV، مقدار تقاضای NRL و قیمت برق است. در هر بازهٔ زمانی، ابتدا مقدار متوسط قیمت برق در یک روز با مقدار قیمت برق TOU مقایسه می‌شود. سپس، با مقایسهٔ مقدار توان تولیدی PV و توان مصرفی NRL در هر بازهٔ زمانی، سه حالت ممکن به شرح زیر رخ می‌دهد:

- مقدار کل توان تولیدیPV برابر با مقدار کل توان مصرفی NRL باشد؛
- مقدار کل توان تولیدیPV بیشتر از مقدار کل توان مصرفی NRL باشد؛
- مقدار کل توان تولیدیPV کمتر از مقدار کل توان مصرفی NRL باشد.

سپس، این واحد در هر بازهٔ زمانی متناسب با هر یک از حالت‌های رخداده یادشده و طبق قیود تعریف‌شده در خصوص شارژ یا تخلیهٔ ES تصمیم‌گیری می‌کند. به‌علاوه، مشخص می‌کند که MT در هر NG با چه ظرفیتی بهتر است وارد مدار شود تا مالک NG متحمل کمترین هزینهٔ ممکنه شوند و بالاترین سود را با حضور در بازار کسب کنند. همچنین، این واحد قادر خواهد بود تا در صورت لزوم RL را به بازهٔ زمانی دیگری که قیمت برق پایین‌تر است منتقل کرده تا NG با هزینهٔ کمتری روبه‌رو شود. به این‌ترتیب در پایان هر دوره برنامه‌ریزی مشخص می‌شود که آیا مقدار توان تولیدی در هر NG، پاسخ‌گوی نیاز مصارف داخلی‌اش است یا خیر. به بیان دیگر، در صورت رویارویی با کمبود تولید، مشخص می‌شود که هر NG به چه میزان توان نیازمند است و به‌عکس در صورتی که یک NG با مازاد تولید مواجه شود، مقدار انرژی قابل عرضه‌اش در بازار مشخص می‌شود. بنابراین، این نتایج با توجه به قیود فنی و اقتصادی مربوط به هر المان نصب‌شده در هر NG، بیانگر پیشنهاد مشارکتش در تعاملات خرید و فروش انرژی در بازار P2P هستند. جزئیات بیشتر در مورد نحوهٔ عملکرد این واحد در [۲۴] ارائه شده است.

۲. ۳. ۲. واحد NIRA

در بازار پیشنهادی، تمامی بازیگران از طریق تبادل برق به صورت P2P با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. ماهیت ساختار معاملات مطرح‌شده، متناسب با تئوری بازی با n بازیگر در یک بازی غیرهمکارانه بوده که در آن هر شرکت‌کننده به دنبال حداکثرسازی منافع خود از طریق یک فرایند تصمیم‌گیری پراکنده است. این بازی ایستا با n بازیگر می‌تواند همواره با استفاده از روش خاص تئوری بازی یعنی NIRA حل شود [۲۷]. ممکن است در چنین بازی هر شرکت‌کننده تا حدی یا کاملاً از منافع متضاد با رقبایش برخوردار باشد؛ به طوری که هر بازیگر i تلاش می‌کند تابع منفعت خود (Φ_i) را با تنظیم استراتژی‌هایش به حداکثر برساند. این واحد برپایهٔ بردار x^0 که نشان‌دهندهٔ مقادیر اولیهٔ متغیرهای تصمیم‌گیری یعنی ظرفیت پیشنهادی مشارکت بازیگران است، شروع به کار کرده و به دنبال محاسبهٔ بردار x^* یعنی تعادل نش است که بیانگر مقادیر بهینهٔ متغیرهای تصمیم‌گیری (ظرفیت بهینهٔ مشارکت بازیگران در تعاملات خرید و فروش) است. وظایف کلی این واحد به شرح زیر است و جزئیات آن در [۲۳] ارائه شده است.



شکل ۳. الگوریتم پیشنهادی برای پیاده‌سازی ساختار بازار

۱. بهینه‌سازی تابع نیکایدو ـ ایزودا ($\Psi(x,y)$): این تابع نشان‌دهندهٔ میزان انحراف از نقطهٔ تعادل نش در بازی بین بازیگران است. هدف از بهینه‌سازی این تابع، رساندن آن به حداقل و در نتیجه، رسیدن به نقطهٔ تعادل نش است.

۲. اعمال الگوریتم آزادسازی و بهبود تابع پاسخ بهینه ($Z(x)$): این الگوریتم به منظور یافتن راه‌حل‌های بهینه برای تابع $\Psi(x,y)$ و به‌روزرسانی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شود.

در ادامه، تعیین منفعت بهینهٔ بازیگران با توجه به مقادیر بهینهٔ متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف آن‌ها قابل محاسبه است. هدف نهایی سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، رسیدن به نقطهٔ تعادل نش در بازی بین NGها است که در آن هر NG با توجه به توان تولیدی و نیاز مصرفی خود، بهینه‌ترین استراتژی را برای تبادل توان با سایر NGها و شبکهٔ بالادست انتخاب کند. این امر به کاهش هزینهٔ NGهای خریدار و افزایش سود NGهای فروشنده منجر می‌شود.

الگوریتم ۱: شبه‌کد مربوط به پیاده‌سازی روش پیشنهادی

- مقداردهی اولیهٔ پارامترها برای هر NG:
  - اطلاعات پیش‌بینی ساعتی مربوط به توان تولیدی PV، تقاضای NRL و π_t^{TOU} به‌انضمام حد بالا و پایین عملکرد DERها و سطح اولیهٔ SOC.

While t≤24

- واحد UCDR [۲۴]:
  - تعیین مقدار ظرفیت مشارکت MT؛
  - تعیین توان شارژ و دشارژ ES؛
  - تعیین مقدار بار تغذیه‌شده +RL؛
  - تعیین مقدار کمبود و یا مازاد توان تولیدی؛
  - تعیین وضعیت متغیر باینری شارژ؛
  - تعریف استراتژی شروع x^0 برای ارائهٔ پیشنهاد مشارکت در تعاملات خرید و فروش توان.

- واحد NIRA [۲۳]:

- تعریف پارامترهای مورد نیاز رویکرد NIRA دربرگیرندهٔ بردار ابعاد بازیگران، کران بالا و پایین فعالیت بازیگران، تلرانس دقت پاسخ، حداکثر تعداد تکرارهای مجاز الگوریتم، انتخاب روش تعیین گام بهینه‌سازی (α)، تلرانس اتمام برنامهٔ مربوط به نقص قیود، مقدار تابع و X؛
- تعریف توابع هدف بازیگران (Φi)؛
- تعریف توابع قیود بازیگران؛
- تشکیل تابع نیکایدو ایزودا $\Psi(x,y)$؛
- محاسبهٔ نقطهٔ نش x^* با رعایت قیود؛
- بیشینه‌سازی تابع نیکایدو ایزودا و تشکیل تابع پاسخ بهینه $Z(x)$؛
- اعمال الگوریتم آزادسازی و بهبود تابع پاسخ بهینه؛

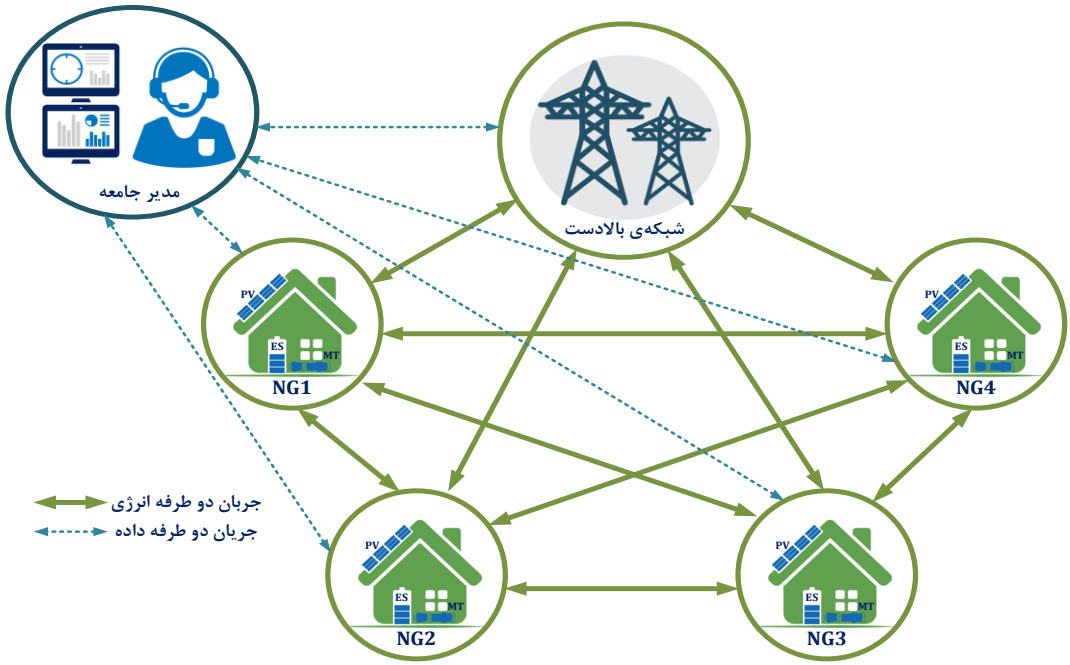
- تعیین داده‌های خروجی:

- تعیین نقطهٔ تعادل نش x^*؛
- محاسبهٔ مقادیر سود بازیگران برپایهٔ x^*؛

پایان حلقهٔ While.

۳. مطالعهٔ موردی

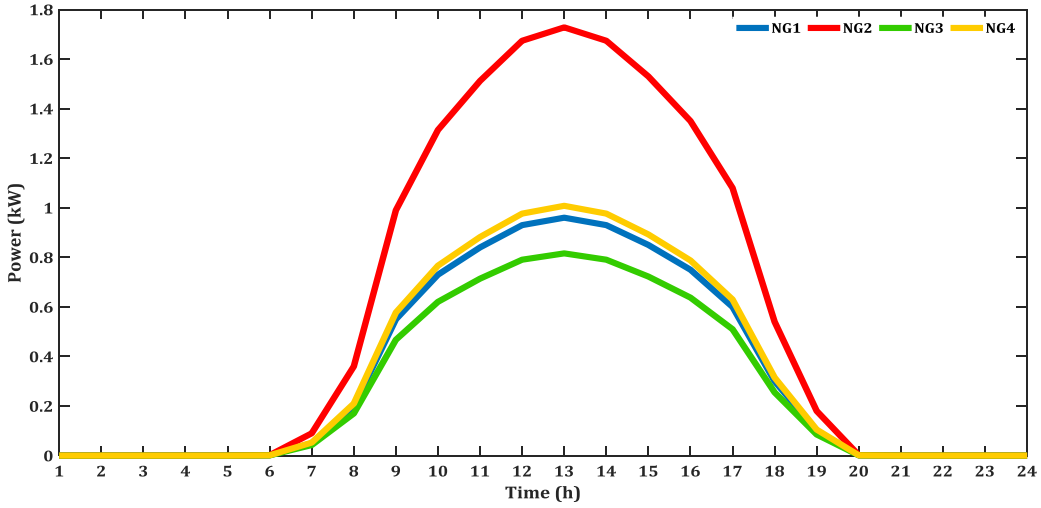
سیستم تحت مطالعه در شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده که متشکل از چهار NG و شبکهٔ بالادست است. NGها با یکدیگر به صورت P2P در تعامل هستند. این ساختار دارای دو لایهٔ ارتباط فیزیکی و مجازی برای انتقال توان الکتریکی و انتقال اطلاعات است. در سیستم مورد نظر، NGها از ادوات تولیدی مانند PV، MT و ES بهره می‌برند و همچنین، دارای دو نوع بار مصرفی RL و NRL هستند. این تنوع در DERها به NGها امکان می‌دهد تا به طور مستقل و یا از طریق تعاملات P2P در سیستم همسایگی، نیاز بارهای محلی خود را برآورده سازند. درخور یادآوری است که در این پژوهش، به منظور جلوگیری از اعمال پیچیدگی بیشتر به مدل ارائه‌شده، عدم قطعیت داده‌های تجدیدپذیر، بار و قیمت لحاظ نشده است.



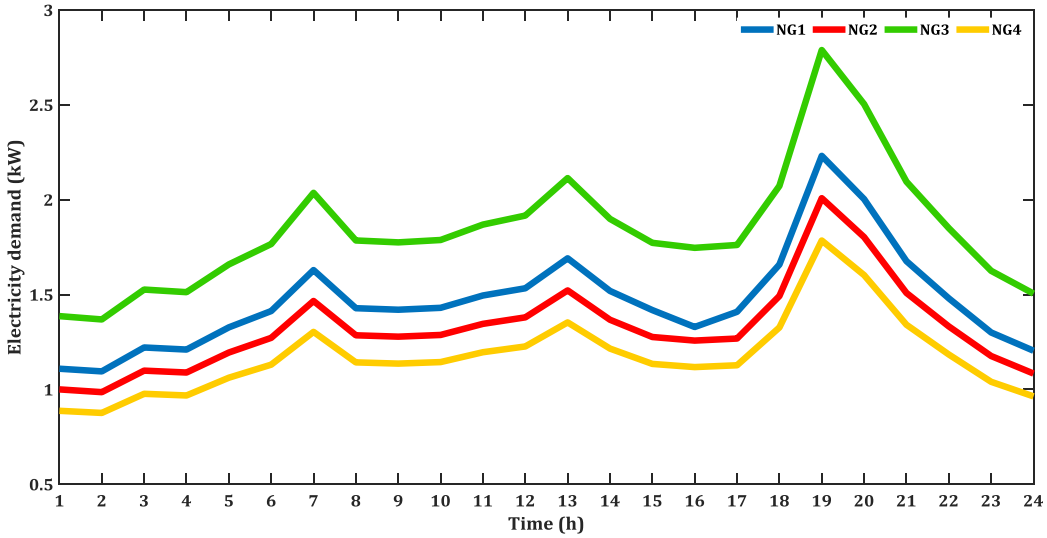
شکل ۴. نمایش شماتیکی از سیستم تحت مطالعه

در ساختار معرفی‌شده، یک مدیر جامعه وجود دارد که مسئولیت نظارت بر اجرا و تسویهٔ توزیع انرژی را به عهده دارد. در طرح پیشنهادی، هر NG مکلف است که در اولین گام، بارهای محلی غیرپاسخ‌گوی خود را از طریق منابع تولید داخلی‌اش تأمین کند. NGها در هر بازهٔ زمانی ممکن است با وضعیت کمبود یا مازاد تولید مواجه شوند که این وضعیت به حجم تولید منابع و میزان تقاضای بار محلی آن‌ها بستگی دارد. در شرایطی که یک NG با مازاد تولید روبه‌رو شود، تمایل دارد که انرژی مازاد خود را برای فروش به بازار عرضه کند. در مقابل، در صورت مواجهه با کمبود تولید، NG تمایل دارد که این کمبود را با خرید از بازار جبران کند.

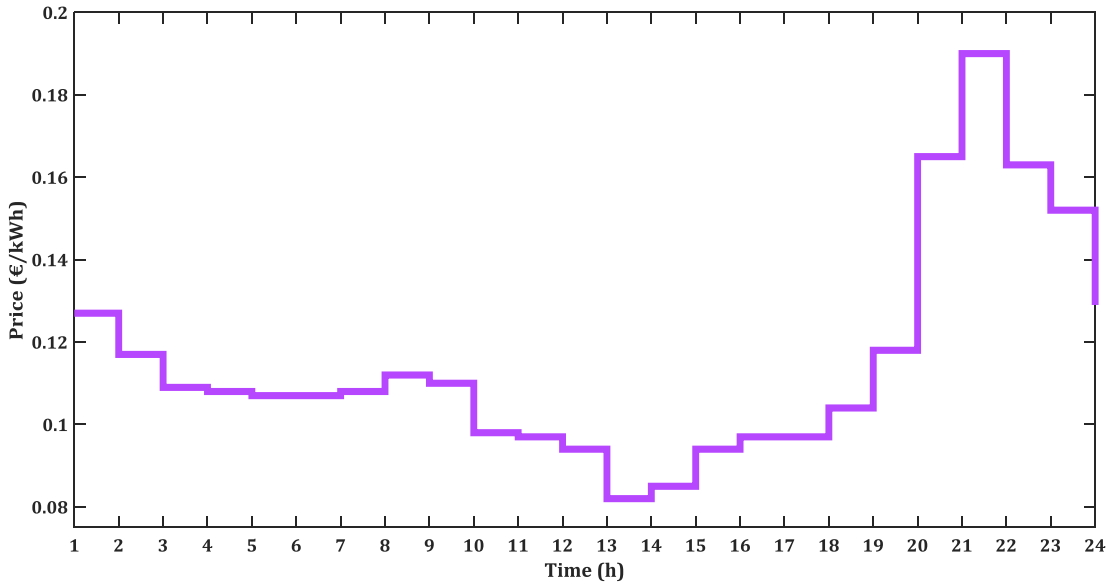
در این مطالعه، ظرفیت تولیدی سیستم PV و بارهای مصرفی در NGهای مختلف، متفاوت در نظر گرفته شده اما بیشینهٔ ظرفیت تولیدیMT در همهٔ NGها یکسان است. سیستم PV براساس مشخصات یادشده در [۲۸ و ۲۹] و همچنین، سیستم MT و ES براساس مشخصات یادشده در [۲۵] انتخاب شده‌اند. پروفایل تولید سیستم PV و تقاضای NRL در NGهای مختلف به‌ترتیب در شکل و ۶ نشان داده شده است. پروفایل قیمت برق در یک روز نوعی براساس طرح تعرفهٔ تنظیمی TOU که مربوط به ناحیهٔ کالابریا در کشور ایتالیا است و در شکل ۷ نشان داده شده است [۳۰]. به‌علاوه، داده‌های مربوط به قیمت سوخت در این مطالعه در شکل ۸ ارائه شده است. این قیمت‌ها مربوط به سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ میلادی در کشور ایتالیا است و از مرجع [۳۱] اخذ شده است. از سوی دیگر، داده‌های ورودی مورد نیاز برای تشکیل بازی پیشنهادی و اجرا از طریق رویکرد NIRA در جدول نمایش داده شده است.



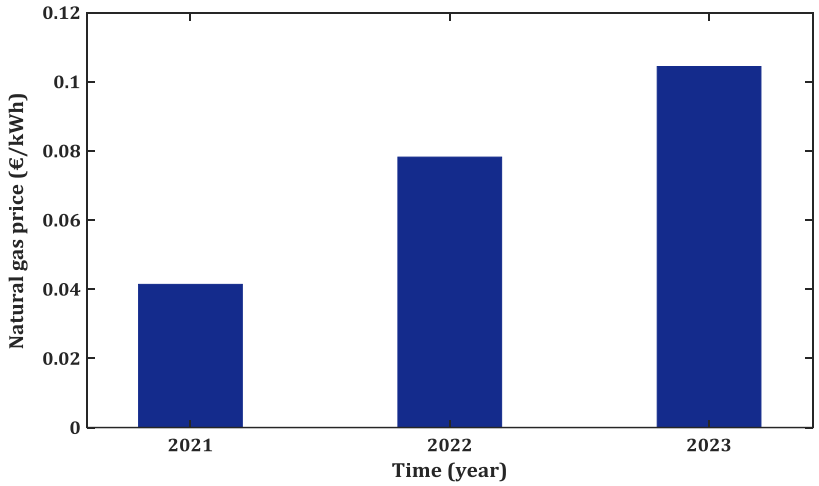
شکل ۵. پروفایل تولید پنل PV در NGهای مختلف



شکل ۶. پروفایل تقاضای NRL در NGهای مختلف



شکل ۷. نمودار قیمت برق براساس TOU



شکل ۸. پروفایل قیمت سوخت گاز طبیعی

جدول ۱. اطلاعات ورودی برای ساختار بازی پیشنهادی

داده‌های ورودی	مقدار
تعداد NGها	۴
تعداد بازیگران	۵
نوع بازی	ایستا
مدل رقابت	تعادل کارنو
بردار ابعاد بازیگران	[۵،۵،۵،۵،۲]
کران بالای فعالیت بازیگران	بی‌نهایت
کران پایین فعالیت بازیگران	۰
تلرانس دقت	$۱۰^{-۵}$
حداکثر تعداد تکرارهای مجاز الگوریتم	۱۰۰

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به منظور ارزیابی کارایی رویکرد پیشنهادی، به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعاملات بازاری از نوع P2P، همتا به شبکه[1] (P2G) و شبکه به همتا[2] (G2P) در شبکهٔ تحت مطالعه در سناریوهای زیر پرداخته شده است:

۱. سناریوی نرمال: سیستم مورد مطالعه در این سناریو شامل ۴ عدد NG متصل به شبکهٔ بالادست در یک سیستم همسایگی است که در شرایط عادی تحت قیمت سوخت برابر با ۰/۰۴۱۴ €/kWh مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

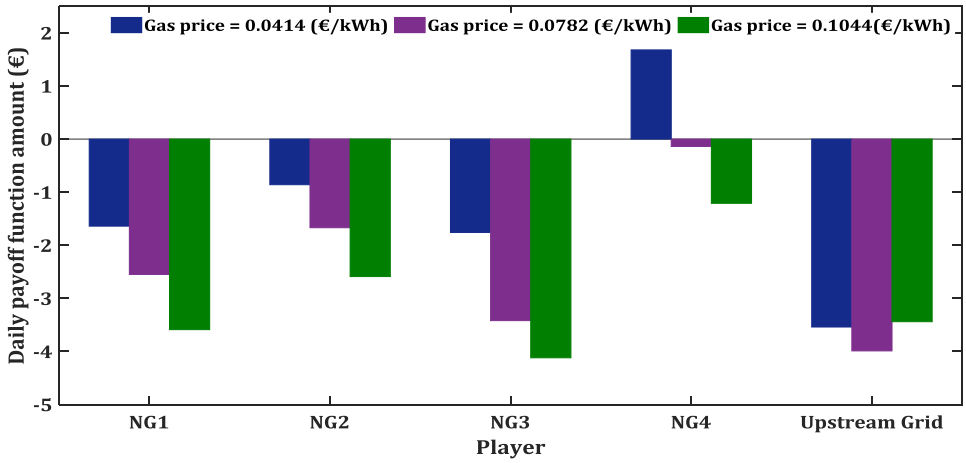
۲. سناریوی رشد قیمت سوخت: سیستم معرفی‌شده در سناریوی نرمال تحت قیمت‌های سوخت ۱) ۰/۰۷۸۲ €/kWh و ۲) ۰/۱۰۴۴ €/kWh مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳. سناریوی رشد تولیدات تجدیدپذیر: سیستم معرفی‌شده در سناریوی نرمال تحت رشد ۱) ۵۰ درصد و ۲) ۱۰۰ درصد تولیدات PV در NGها مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴. سناریوی بهره‌برداری در مد فعالیت جزیره‌ای: سیستم معرفی‌شده در سناریوی نرمال در حالت بهره‌برداری در شرایط انفصال از شبکهٔ بالادست مورد مطالعه قرار گرفته است.

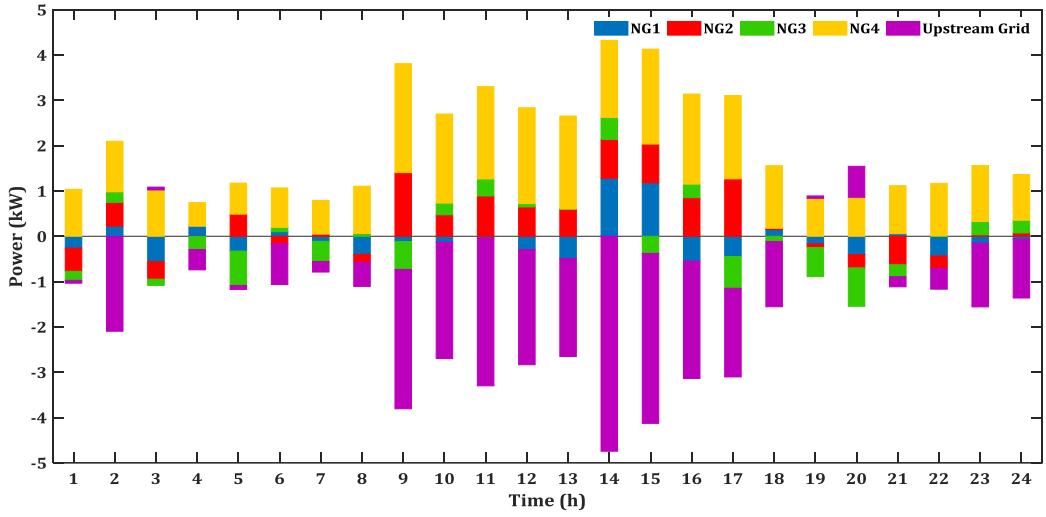
تابع منفعت بازیگران برحسب € طی ۲۴ ساعت با توجه به نرخ‌های متفاوت قیمت سوخت در شکل ۹ نشان داده شده است. درخور یادآوری است در این پژوهش، بازیگر اول تا پنجم به‌ترتیب متناظر با NG1، NG2، NG3، NG4 و شبکهٔ بالادست است.

با توجه به شکل ۹، به واسطهٔ بالا رفتن قیمت سوخت از نرخ ۰/۰۴۱۴ به ۰/۰۷۸۲، بازیگران مختلف (NG1 تا NG4) به‌ترتیب به میزان ۵۵، ۹۴، ۹۴ و ۱۰۸ درصد کاهش سودآوری را تجربه کرده‌اند که بیانگر تحمل هزینه‌های بیشتر توسط آن‌ها است. همچنین، با رشد تقریبی ۱۵۰ درصد در قیمت سوخت، بازیگران اول تا چهارم به‌ترتیب با ۱۱۹، ۲۰۰، ۱۳۳ و ۱۷۲ درصد افت منفعت نسبت به سناریوی نرمال روبه‌رو بوده‌اند. در این بین، شبکهٔ بالادست، به واسطهٔ رشد ۹۰ درصد قیمت سوخت، ابتدا متحمل ۱۳ درصد ضرر شده، اما با ۱/۵ برابر شدن نرخ سوخت MTها، این بازیگر از ۳ درصد افزایش منفعت برخوردار بوده است. به این‌ترتیب می‌توان گفت که در صورتی که افزایش قیمت سوخت، درنهایت به نفع شبکهٔ بالادست بوده؛ اما بر منافع پرسیومرها تأثیر مستقیم و منفی داشته و باعث کاهش عایدی و افزایش هزینه‌های آن‌ها شده است. به بیان دیگر، با افزایش بیش از حد نرخ سوخت، NGها تمایل کمتری را به تولید برق از طریق DERهای کنترل‌شدهٔ خود در تأمین بار مصرفی‌شان نشان داده و ترجیح داده‌اند بخش بیشتری از تقاضای خود را از طریق خرید از شبکهٔ بالادست با نرخ پایین‌تر قیمت برق نسبت به قیمت سوخت تأمین کنند. این شرایط به بهبود منفعت شبکهٔ بالادست منجر شده است.

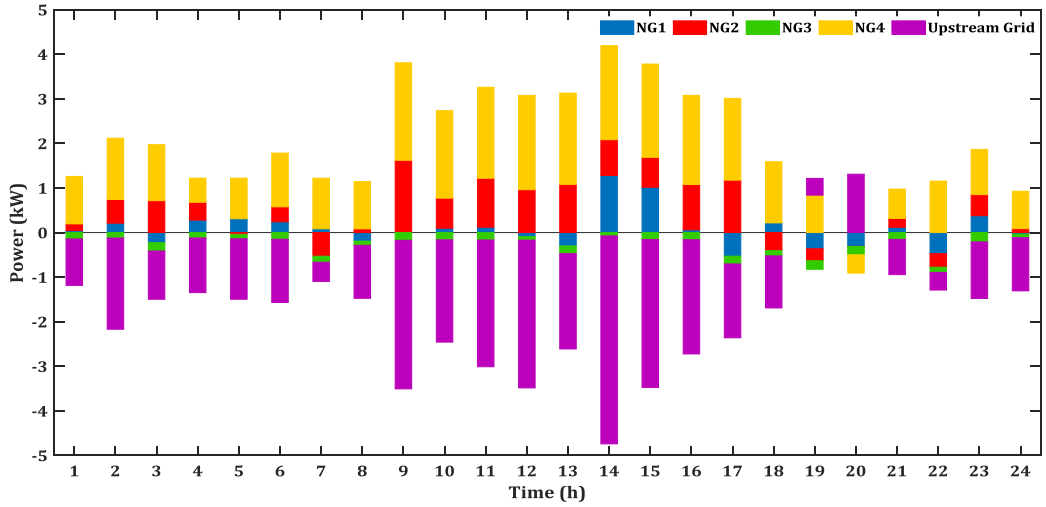


شکل ۹. تابع منفعت بازیگران تحت تأثیر رشد قیمت سوخت

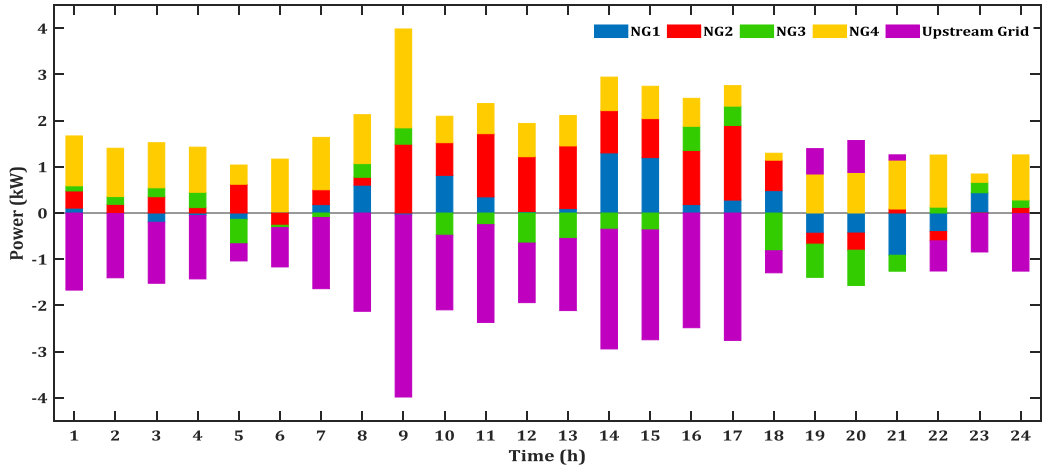
1. Peer to Grid
2. Grid to Peer



(۱۰-الف)



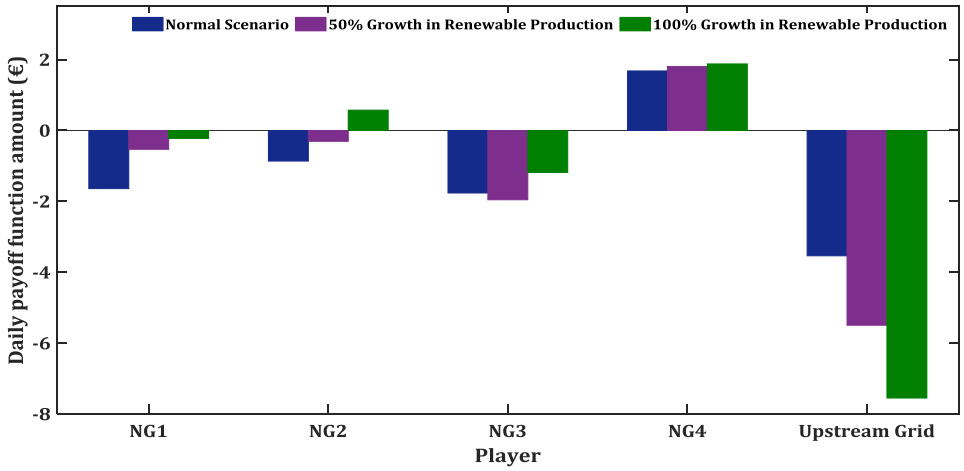
(۱۰-ب)



(۱۰-ج)

شکل ۱۰. سهم مشارکت بازیگران در تعاملات بازاری در (الف): سناریوی نرمال، (ب)سناریوی ۹۰ درصد رشد قیمت سوخت و (ج) سناریوی ۱۵۰ درصد رشد قیمت سوخت

در شکل ۱۰، سهم مشارکت بازیگران در تعاملات P2P، P2G و G2P تحت بهره‌برداری در سناریوی نرمال و سناریوی ۹۰ و ۱۵۰ درصد رشد قیمت سوخت MTها در یک بازهٔ ۲۴ساعته نشان داده شده است. بازیگران با رنگ‌های مختلف در نمودار مشخص شده‌اند. در این نمودار، مشارکت بازیگران براساس توان خریداری‌شده از و یا فروخته‌شده به آن‌ها، برحسب kW نشان داده شده است. اعداد مثبت بیانگر سهم توان قابل فروش و اعداد منفی بیانگر سهم توان قابل خرید هستند. همان طور که در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است، در سناریوی نرمال، NG4 با توان مصرفی پایین‌تر، ۸۴ درصد از تقاضای بازار و همچنین NG2، ۱۶ درصد از نیاز بازار را با حضور در تعاملات P2G و P2P تأمین کرده‌اند. در مقابل، شبکهٔ بالادست به خرید ۸۸ درصد از توان مازاد NGها اقدام کرده و سطح مشارکت NG3 و NG1 در معاملات خرید از بازار به‌ترتیب ۷ و ۴/۵ درصد بوده است. از سوی دیگر، مطابق با شکل ۱۰-ب، با افزایش ۹۰ درصد نرخ سوخت، دوباره وظیفهٔ تأمین بخش عمدهٔ تقاضای بازار به میزان ۷۷ درصد به عهدهٔ بازیگر چهارم یعنی NG4 بوده است. در رتبهٔ بعدی، NG2 پس از NG4، ۲۸ درصد از نیاز بازار را برآورده کرده است. به‌علاوه، در این شرایط، NG1 نیز در اکثر بازه‌های زمانی نقش فروشنده را در بازار ایفا کرده و تأمین ۱۰ درصد از تقاضای بازار را به عهده داشته است؛ اگرچه در این حالت هم شبکهٔ بالادست در اکثر بازه‌های زمانی خریدار عمده محسوب شده و ۹۶ درصد از توان مازاد بازیگران را خریداری کرده است. پس از شبکهٔ بالادست، NG3 با ۱۶/۵ درصد خرید، از بیشترین سطح مشارکت در خرید برخوردار بوده است. با توجه به شکل ۱۰-ج، به‌ترتیب ۵۶، ۳۸ و ۱۷درصد از تقاضای بازار توسط NG4، NG2 و NG1 از طریق تعاملات P2G و P2P تأمین شده است. در مقابل، در معاملات خرید از بازار، سهم مشارکت شبکهٔ بالادست ۹۵ درصد بوده و در این حالت هم، بیشترین سطح مشارکت به عنوان خریدار پس از شبکهٔ بالادست متعلق به NG3 به میزان ۱۶ درصد است. مقایسهٔ نمودارهای شکل ۱۰ نشان می‌دهد در حالی که با رشد تقریبی دو و سه برابری قیمت سوخت، سطح مشارکت NG4 در معاملات فروش با کاهش همراه بوده، این تغییرات به حضور پررنگ‌تر NG1 و NG2 به عنوان فروشنده در بازار منجر شده است. در مقابل، همواره شبکهٔ بالادست در نقش خریدار عمده در بازار ظاهر شده است. از سوی دیگر، ملاحظه می‌شود که بیشترین میزان خرید و فروش برق در ساعت‌های ۹ تا ۱۷ صورت گرفته که با بازه‌های زمانی مرتبط با تولید عمده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر هم‌پوشانی دارد. این تغییرات، نقش انعطاف‌پذیری سیستم و اهمیت بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر را آشکار می‌سازد.

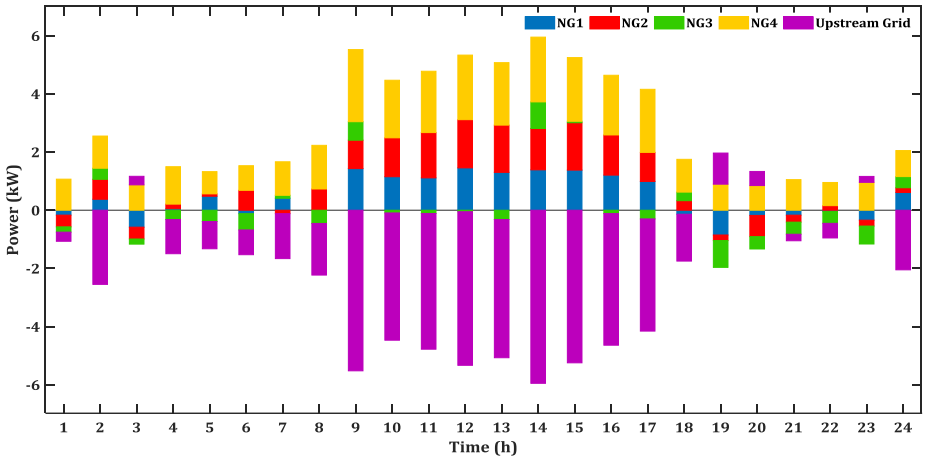


شکل ۱۱. تابع منفعت بازیگران تحت تأثیر رشد تولیدات تجدیدپذیر

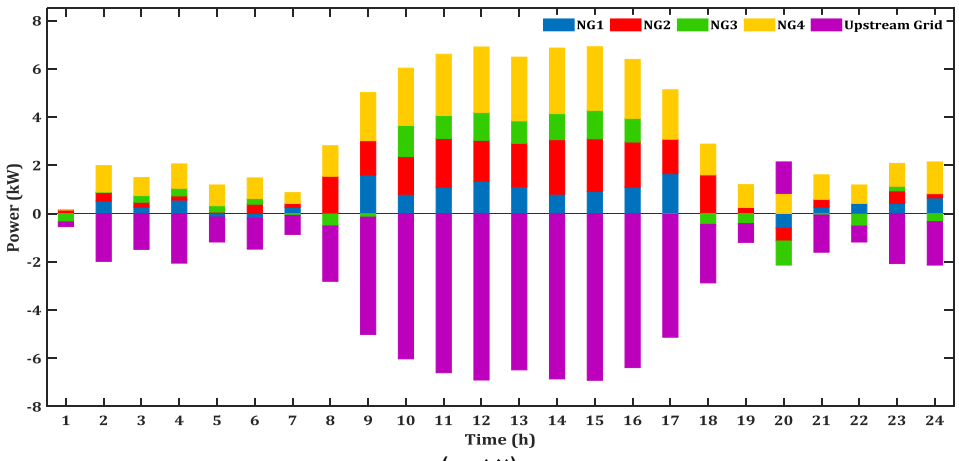
تغییرات تابع منفعت بازیگران مختلف تحت تأثیر بالا رفتن سطح تولیدات منابع تجدیدپذیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصد تولیدات تجدیدپذیر، تابع منفعت بازیگران مختلف را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است، به طوری که NGهای با ظرفیت بالای منابع تجدیدپذیر از کاهش هزینهٔ بیشتری بهره‌مند شده‌اند. با ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش تولیدات تجدیدپذیر، بازیگر اول (NG1) به‌ترتیب از ۶۷ و ۸۶ درصد صرفه‌جویی اقتصادی برخوردار شده است. بازیگر دوم (NG2) نیز با همین میزان افزایش تولیدات، به‌ترتیب ۶۵ و ۱۶۶ درصد بهبود در منفعتش را تجربه کرده است. در مقابل، بازیگر سوم (NG3) با ۵۰ درصد افزایش تولیدات تجدیدپذیر به ۱۱ درصد کاهش منفعت و با ۱۰۰ درصد افزایش تولیدات تجدیدپذیر، به ۳۳ درصد

بهبود منفعت دست یافته است. بازیگر چهارم (NG4) نیز با ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد افزایش تولیدات تجدیدپذیر به‌ترتیب ۷ و ۱۲ درصد بهبود منفعت را کسب کرده است. از سوی دیگر، شبکهٔ بالادست با افزایش تولیدات تجدیدپذیر با زیان‌دهی روبه‌رو شده و هزینه‌های خرید آن از بازار به‌ترتیب ۵۵ و ۱۱۴ درصد افزایش یافته است، زیرا بازیگران به واسطهٔ افزایش تولیدات انرژی محلی خود با مازاد تولید مواجه شده‌اند و برای حفظ تعادل در سیستم همسایگی، این مازاد تولید توسط شبکهٔ بالادست خریداری شده است.

در شکل ۱۲، سهم مشارکت بازیگران در تعاملات P2P، P2G و G2P به واسطهٔ افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصد تولیدات تجدیدپذیر در NGها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقایسه با سناریوی نرمال، افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصد تولیدات تجدیدپذیر در NGها باعث تغییرات چشمگیری در میزان حضور آن‌ها به‌ویژه در بازهٔ زمانی بین ساعت ۹ تا ۱۷ شده است. NG1 از یک خریدار عمده به یک فروشنده مهم تبدیل شده و میزان مشارکتش در فروش نسبت به سناریوی نرمال با رشد بین ۲۰ تا ۲۴ درصد همراه بوده است. NG2 نیز با بالا رفتن مقدار تولیدات تجدیدپذیر، به‌ترتیب به ۷ و ۱۱ درصد بهبود در سطح مشارکت فروش دست یافته است. با دو برابر شدن تولیدات تجدیدپذیر، NG3 از یک بازیگر خریدار به یک بازیگر فروشنده تغییر نقش داده و توانسته از شرایط جدید به نفع خود بهره‌مند شود. در مقابل، با ۱/۵ و ۲ برابر شدن تولیدات تجدیدپذیر، NG4، افت ۳۳ و ۴۱ درصد در سطح مشارکت فروش را تجربه کرده است. این امر باعث شده این بازیگر پذیرای بیشترین تأثیر منفی در میان رقبای خود باشد. به بیان دیگر، از آنجا که رشد تولیدات تجدیدپذیر محلی در تمام NGها منجر به بهبود خودکفایی آن‌ها و نیز سطح رقابت شده؛ اما از سهم مشارکت بازیگر چهارم به عنوان تأمین‌کنندهٔ عمده در بازار کاسته است. در مقابل، عمدتاً شبکهٔ بالادست به عنوان خریدار عمل کرده و نقش کلیدی را در مدیریت مازاد تولید سایر بازیگران ایفا کرده است.



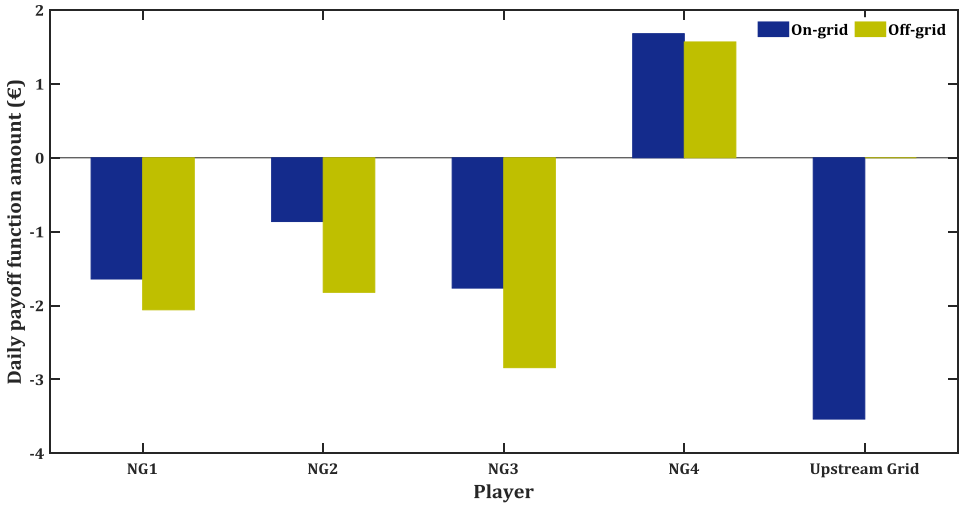
(۱۲-الف)



(۱۲-ب)

شکل ۱۲. سهم مشارکت بازیگران درتعاملات بازاری با (الف) ۵۰ درصد و (ب) ۱۰۰ درصد افزایش تولیدات تجدیدپذیر

نتایج تغییرات تابع منفعت بازیگران تحت تأثیر بهره‌برداری ساختار تحت مطالعه در مد فعالیت جزیره‌ای و سناریوی نرمال در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در حالت عدم اتصال به شبکهٔ بالادست، تابع منفعت NG1 و NG3 با کاهش به میزان ۲۵ و ۶۱ درصد روبه‌رو بوده که معادل افزایش هزینه‌های این بازیگران به همین نسبت است. به‌علاوه، NG2 و NG4 به‌ترتیب با ۱۱۰ و ۶/۷ درصد ضرر، بیشترین و کمترین تأثیر منفی را در میان رقبای خود با حضور در مد فعالیت جزیره‌ای تجربه کرده‌اند که بیانگر کمترین و بیشترین میزان انعطاف‌پذیری بازیگران در تطبیق توان تولیدی و مصرفی در این سیستم همسایگی است. این نتایج به ضرورت حضور شبکهٔ بالادست برای حفظ تعادل اقتصادی و عملیاتی NGها اشاره دارد و بیانگر آن است که عدم حضور این بازیگر، تأثیرات قابل توجهی بر منافع NGها داشته است.



شکل ۱۳. تابع منفعت بازیگران در صورت اتصال به و انفصال از شبکهٔ بالادست

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور مدیریت بهینهٔ انرژی در سیستم‌های همسایگی از تئوری بازی غیرهمکارانه (الگوریتم NIRA) استفاده شده است. این سیستم همسایگی متشکل از چندین NG متصل به شبکهٔ بالادست است. NGها به واسطهٔ مشارکت در بازار انرژی P2P، به‌دنبال خودکفایی در تأمین انرژی محلی و همچنین، کسب درآمد هستند. رویکرد پیشنهادی به بازیگران با اهداف غیرهمسو اجازه می‌دهد تا از طریق مبادلهٔ توان الکتریکی با یکدیگر رقابت کنند؛ به این‌ترتیب دستیابی به یک سیستم تجارت برق کارآمد و منصفانه در سطوح ولتاژ پایین امکان‌پذیر خواهد بود.

با این‌حال، عوامل خارجی مانند قیمت سوخت، بر میزان تولیدات منابع قابل کنترل NGها و همچنین، سطح مشارکتشان در تعاملات بازاری تأثیر منفی دارد که با بهره‌مندی بیشتر از تولیدات تجدیدپذیر قابل جبران است. به بیان دیگر، افزایش بهره‌برداری محلی منابع تجدیدپذیر می‌تواند به خودکفایی NGها در تأمین انرژی و دستیابی آن‌ها به منافع اقتصادی کمک کند.

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه نشان می‌دهد، تغییرات در سطح تولید منابع تجدیدپذیر و قیمت سوخت تأثیرات بارزی بر پویایی سیستم انرژی داشته، به طوری که تغییر در سطح تولیدات محلی تجدیدپذیر به حضور متفاوت برخی مشارکت‌کنندگان در بازار منجر شده است. به واسطهٔ ۱/۵ و ۲ برابر شدن تولیدات تجدیدپذیر در مطالعهٔ موردی صورت‌گرفته، برخی NGها به جای خرید از بازار به عنوان فروشنده در تعاملات بازاری حاضر شدند؛ اگرچه این شرایط به نفع فروشندگان عمده مانند NG4 نبوده و به کاهش ۳۳ ـ ۴۱ درصد سهم مشارکتش انجامیده است. از سوی دیگر، افزایش قیمت سوخت نیز باعث تغییراتی در الگوی تولید و مصرف شده است، به طوری که برخی شرکت‌کنندگان افزایش عایدی و برخی ضرر بیشتر را تجربه کرده‌اند. در این بین، نقش کلیدی شبکهٔ بالادست در حفظ تعادل اقتصادی و عملیاتی سیستم انکارناپذیر است؛ چراکه فعالیت در مد جزیره‌ای به کاهش منافع تمام بازیگران منجر شده است. به‌علاوه، نتایج حاصل از مطالعهٔ موردی صورت‌گرفته در حالت

انفصال از شبکهٔ بالادست نشان داده میزان کاهش منافع NGها بین ۶/۷ تا ۱۱۰ درصد متغیر بوده است. این نتایج به تأثیر مستقیم کاهش سطح رقابت بر مزایای ذی‌نفعان ناشی از کاهش تعداد بازیگران فعال در بازار اشاره دارد.

از این‌رو، در این مقاله بر اهمیت رویکرد سیستمی در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی ریزسیستم‌ها تأکید شده است، زیرا دستیابی به یک سیستم انرژی پایدار، انعطاف‌پذیر و کارآمد با درک عمیق تعاملات متقابل و پیچیدهٔ عوامل مختلف و نیز توانمندی سیستم در انطباق تحت تغییرات سریع امکان‌پذیر است. با توجه به معضلات حاضر در حوزهٔ انرژی و تغییرات اقلیمی، در کارهای آتی می‌توان به بررسی جامع‌تر و دقیق‌تر مدیریت حامل‌های انرژی در ریزسیستم‌های چندعاملی تحت توسعهٔ مدل‌سازی با بهبود تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت پرداخت.

منابع

[1] Sahebi H, Khodoomi M, Seif M, Pishvaee MS, Hanne T. The benefits of peer-to-peer renewable energy trading and battery storage backup for local grid. J Energy Storage. 2023;63(September 2022).

[2] Tushar W, Yuen C, Mohsenian-Rad H, Saha T, Poor HV, Wood KL. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: The potential of game-theoretic approaches. IEEE Signal Process Mag. 2018;35(4):90–111.

[3] Zambroni de Souza AC, Castilla M. Microgrids design and implementation. Microgrids Design and Implementation. 2018. 1–538 p.

[4] Chowdhury S, Chowdhury SP, Crossley P. Microgrids and active distribution networks [Internet]. Microgrids and Active Distribution Networks. Institution of Engineering and Technology; 2009. 1–298 p.

[5] Maaref MK, Salehi J. Peer-to-Peer Electricity Trading in Microgrids with Renewable Sources and Uncertainty Modeling Using IGDT. J Oper Autom Power Eng. 2024;12(3):195–205.

[6] Tushar W, Saha TK, Yuen C, Smith D, Poor HV. Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview. IEEE Trans Smart Grid. 2020;11(4):3185–200.

[7] Sousa T, Soares T, Pinson P, Moret F, Baroche T, Sorin E. Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. Renew Sustain Energy Rev. 2019;104:367–78.

[8] Moret F, Pinson P. Energy Collectives: A Community and Fairness Based Approach to Future Electricity Markets. IEEE Trans Power Syst. 2019;34(5):3994–4004.

[9] Morstyn T, Teytelboym A, McCulloch MD. Designing decentralized markets for distribution system flexibility. IEEE Trans Power Syst. 2019;34(3):1–12.

[10] Zhang Z, Tang H, Wang P, Huang Q, Lee WJ. Two-Stage Bidding Strategy for Peer-to-Peer Energy Trading of Nanogrid. IEEE Trans Ind Appl. 2020;56(2):1000–9.

[11] Dong J, Dou X, Liu D, Bao A, Wang D, Zhang Y, et al. Energy trading support decision model of distributed energy resources aggregator in day-ahead market considering multi-stakeholder risk preference behaviors. Front Energy Res. 2023;11(April):1–18.

[12] Paudel A, Chaudhari K, Long C, Gooi HB. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: A game-theoretic model. IEEE Trans Ind Electron. 2019;66(8):6087–97.

[13] Thomas A, Abraham MP, G AM. Analysis of Peer-to-Peer Energy Trading in a Dynamic Environment Using Stackelberg Game. In: 2021 Seventh Indian Control Conference (ICC). IEEE; 2021. p. 412–7.

[14] Cui S, Wang YW, Shi Y, Xiao JW. A New and Fair Peer-to-Peer Energy Sharing Framework for Energy Buildings. IEEE Trans Smart Grid. 2020;11(5):3817–26.

[15] Cui S, Xiao JW. Game-based peer-to-peer energy sharing management for a community of energy buildings. Int J Electr Power Energy Syst. 2020;123:106204.

[16] Luo X, Shi W, Jiang Y, Liu Y, Xia J. Distributed peer-to-peer energy trading based on game theory in a community microgrid considering ownership complexity of distributed energy resources. J Clean Prod. 2022;351:131573.

[17] Huang H, Nie S, Lin J, Wang Y, Dong J. Optimization of peer-to-peer power trading in a microgrid with distributed PV and battery energy storage systems. Sustain. 2020;12(3):923.

[18] Lee S, Jin H, Vecchietti LF, Hong J, Park KB, Son PN, et al. Cooperative decentralized peer-to-peer electricity trading of nanogrid clusters based on predictions of load demand and PV power generation using a gated recurrent unit model. IET Renew Power Gener. 2021;15(15):3505–23.

[19] Tushar W, Saha TK, Yuen C, Azim MI, Morstyn T, Poor HV, et al. A coalition formation game framework for peer-to-peer energy trading. Appl Energy. 2020;261:114436.

[20] Malik S, Duffy M, Thakur S, Hayes B, Breslin J. A priority-based approach for peer-to-peer energy trading using cooperative game theory in local energy community. Int J Electr Power Energy Syst. 2022;137:107865.

[21] Pereira H, Gomes L, Vale Z. Peer-to-peer energy trading optimization in energy communities using multi-agent deep reinforcement learning. Energy Informatics. 2022;5(S4):44.

[22] Imahori M, Hase R, Shinomiya N. A Multi-Objective Optimization Method on Consumer ' s Benefit in Peer-to-peer Energy Trading. Fifteenth Int Conf Syst. 2020;(c):56–61.

[23] Marzband M, Javadi M, Domínguez-García JL, Moghaddam MM. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties. IET Gener Transm Distrib. 2016;10(12):2999–3009.
[24] Javadi M, Marzband M, Mirhosseini Moghaddam M. Optimal energy management of microgrids in the retail market with bidding strategy based on game theory approach considering coalition formation among generation units. Tabriz J Electr Eng. 2016;46(4):95–107. *[Persian]*
[25] Javadi M, Baghramian A. Electricity trading of multiple home microgrids through V2X based on game theory. Sustain Cities Soc. 2024;101:105046.
[26] Zhang H, Zhang S, Hu X, Cheng H, Gu Q, Du M. Parametric optimization-based peer-to-peer energy trading among commercial buildings considering multiple energy conversion. Appl Energy. 2022;306:118040.
[27] Su W, Huang AQ. A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers. Appl Energy. 2014;119:341–50.
[28] Kynigos M, Yerasimou Y, Efthymiou V, Georghiou GE. Design of a Nanogrid for Increasing Energy Efficiency of Buildings. IET Conf Proc. 2020;2020(5):308–11.
[29] energysage [Internet]. Solar Panel Buyer's Guide. Available from: https://www.energysage.com/solar-panels/rec/2544/REC400AA_Pure
[30] Gerhardsen T. energyprices.eu. Electricity spot price in Italy. Available from: https://www.energyprices.eu/electricity/italy-calabria
[31] statista [Internet]. Natural gas prices pre-tax for household consumers in Italy from 2nd half 2012 to 1st half 2023. Available from: https://www.statista.com/statistics/785605/natural-gas-prices-for-household-consumers-in-italy/