The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

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

An IGDT-Stochastic Hybrid Operation Model for Optimizing Energy Interactions in Cooperative Multi-Microgrids

Mohammadreza Daneshvar[1*] | Amjad Anvari-Moghaddam[2] | Mousa Marzband[3]

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Laboratory of Multi-Carrier Energy Networks Modernization, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: m.r.daneshvar@tabrizu.ac.ir
2. Professor, Department of Energy (AAU Energy), Aalborg University, 9220 Aalborg, Denmark. Email: aam@energy.aau.dk
3. Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah 21589, Saudi Arabia. Email: mousa.marzband@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 27 June 2026
Revised: 23 July 2026
Accepted: 23 September 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Renewable energy sources,
Cooperative multi-microgrids,
Transactive energy,
Energy interactions,
Optimization,
Information gap decision theory,
Stochastic programming.

ABSTRACT

The dramatic advances in the technologies of different energy systems have substantially transformed energy grids, resulting in undeniable interdependencies among multi-energy networks. In this regard, harvesting maximum clean energy from renewable sources has been accounted as a vital goal in the rising path of modern energy grids due to economic and environmental objectives. However, the adoption of renewables in the power production sector is not limited only to the mentioned benefits, but also optimizing energy interactions has appeared as a critical challenge in the presence of energy sources with stochastic outputs. Therefore, this paper proposes an IGDT-stochastic hybrid operational model to optimize energy interactions in cooperative multi-microgrids. The proposed model serves the optimization of energy interactions by relying on multifarious technologies in energy storage, conversion, trading, and management. On the other hand, it develops transactive energy technology to create the possibility of affordable energy sharing among microgrids, resulting in improving their flexibility in multi-energy management. To quantify effective uncertainties, the model benefits from the hybrid IGDT-stochastic method that offers risk-averse and risk-seeker strategies to scrutinize the robustness and opportunistic functions of the optimization problem. The results indicated that microgrids can meet the energy requirements of consumers by developing multi-energy interaction management models with minimum environmental pollution and costs. On the other hand, exerting the hybrid method in the developed model has resulted in 19.13% more cost than the base model, which is due to the robustness of microgrids against negative variations of uncertainties.

Cite this article: Daneshvar, M.; Anvari-Moghaddam, A. & Marzband, M. (2027). An IGDT-Stochastic Hybrid Operation Model for Optimizing Energy Interactions in Cooperative Multi-Microgrids. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 203-223. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.419319.1276

© Authors retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.419319.1276

Introduction

The need for sustainable and uninterrupted energy has accelerated the transition of traditional energy structures towards interconnected multi-energy grids in recent years. In this regard, the progress in energy technologies has increased the expectations to produce and deliver clean, affordable, and sustainable energy to different types of consumers. Although the formed endeavours have mostly relied on using renewable energy sources for power generation, the intermittence of such sources has increased the risk of continuous energy supply in decentralized grids. This issue highlighted the emptiness of hybrid models for optimizing various energy systems in grids with a high level of

stochastic sources that can be filled by developing innovative operation models for modern energy structures to effectively harvest carbon-free energy.

Materials and methods

This paper proposes an IGDT-stochastic hybrid operational model to optimize energy interactions in cooperative multi-microgrids. The methodology of this work relies on mathematically modeling both robustness and opportunistic functions of the IGDT method, along with presenting all the effective operational constraints. The objective function of the related optimization problem is the minimization of the total cost of cooperative microgrids. Moreover, all the operational limitations of energy systems, including wind turbines, battery energy storage systems, PV panels, electrolyzers, hydrogen storage systems, fuel cells, electric water boilers, solar water boilers, absorption chillers, reciprocating chillers, and AC power flows, are taken into account in the optimization problem.

Result

The results stated that the proposed hybrid operation model enabled cooperative microgrids to effectively manage their energy interactions in the presence of a high share of renewables at a minimum cost. On the other hand, the results highlighted the vital role of hybrid energy systems in empowering microgrids for establishing a continuous energy balance within a certain scheduling horizon. Moreover, applying the developed IGDT-stochastic hybrid technique provided appropriate conditions for the decision maker to determine its priorities in line with the robustness and opportunistic states. Indeed, this method enabled the system to properly model the fluctuations of various uncertain parameters with diverse stochastic behaviors within the scheduling horizon. Moreover, exerting the mentioned hybrid method has resulted in 19.13% more cost in the developed model than the base one, indicating that more costs are imposed on microgrids when they are robust against negative fluctuations of uncertainties in the risk-averse strategy.

Discussion and Conclusion

In energy infrastructure, the penetration of renewables is rising day by day to provide appropriate conditions for zero emissions and affordable energy production. However, the dependency of renewable output on climate change has created basic concerns in dynamically serving energy to end-users with diverse energy consumption behaviors. To this end, this paper developed an innovative hybrid operation model for the optimal exploitation of multi-microgrids in the deregulated environment. This model was empowered by different energy generation, conversion, and storage units to increase assurance of microgrids' enough capability in managing energy interactions under uncertainties. It also benefits the transactive energy technology to allow local energy exchange for cooperative microgrids, increasing their flexibility in participating in energy interactions. As all microgrids use a high volume of renewables for their environmental goals, uncertainties were an undeniable part of this study, negatively affecting the extraction of confident results for multifarious energy devices. For this aim, the hybrid IGDT-stochastic methodology was advanced to consider uncertain behaviors of uncertain parameters by focusing on modeling both robustness and opportunistic functions based on the risk-averse and risk-seeking strategies. The extracted results proved the effectiveness of the mentioned model in optimally managing energy interactions of cooperative microgrids in the renewable-penetrated structure of the energy network.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

یک مدل بهره‌برداری ترکیبی IGDT–تصادفی برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌های چندگانهٔ تعاونی

محمدرضا دانشور[۱*] | امجد انوری مقدم[۲] | موسی مرزبند[۳]

۱. نویسندهٔ مسئول، استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی مدرنیزه کردن شبکه‌های چند حاملی انرژی، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: m.r.daneshvar@tabrizu.ac.ir

۲. استاد تمام، دپارتمان انرژی (AAU Energy)، دانشگاه آلبورگ، ۹۲۲۰ آلبورگ، دانمارک. رایانامه: aam@energy.aau.dk

۳. استاد تمام، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه ملک عبدالعزیز، جده ۲۱۵۸۹، عربستان سعودی. رایانامه: mousa.marzband@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
منابع انرژی تجدیدپذیر،
ریزشبکه‌های چندگانهٔ تعاونی،
انرژی تعاملی،
تعاملات انرژی،
بهینه‌سازی،
تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی،
برنامه‌ریزی تصادفی.

چکیده

رشد چشمگیر در فناوری‌های مربوط به سیستم‌های مختلف انرژی سبب ایجاد تحول بزرگ در شبکه‌های انرژی شده که با ظهور سیستم‌های انرژی چندگانه باعث ایجاد وابستگی‌های انکارناپذیر بین شبکه‌های مختلف انرژی شده است. در این راستا، تولید حداکثری انرژی از طریق منابع انرژی پاک با توجه به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی به عنوان هدف کلیدی در رشد و توسعهٔ شبکه‌های مدرن انرژی آینده در نظر گرفته شده است، اما استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش تولید انرژی تنها به منافع اقتصادی و زیست‌محیطی ختم نمی‌شود، بلکه بهینه‌سازی تعاملات انرژی در حضور این منابع با خروجی تصادفی به چالش کلیدی تبدیل شده است. لذا، این مقاله نوعی مدل بهره‌برداری ترکیبی IGDT[1]–تصادفی نوینی را برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه تعاونی برای رفع چالش‌های یادشده توسعه می‌دهد. مدل پیشنهادی از فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی، تبدیل انرژی، تبادلات و مدیریت انرژی برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌ها بهره می‌برد. از طرف دیگر، مدل پیشنهادی از فناوری انرژی تعاملی به منظور ایجاد تبادلات انرژی به‌صرفه در بین ریزشبکه‌ها بهره می‌برد که باعث افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها در مدیریت انرژی چندگانه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود. همچنین، به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مسئله، از استراتژی‌های ریسک‌گریز و ریسک‌پذیر روش IGDT برای ارزیابی توابع مقاوم و فرصت مسئلهٔ بهینه‌سازی بهره گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی مسئله نشان داد ریزشبکه‌ها با بهره‌گیری از راه‌کارهای چندگانه مدیریت تعاملات انرژی می‌توانند انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان خود را با کمترین هزینه و در حضور سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین کنند. از طرف دیگر، بهره‌گیری از روش ترکیبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و در نظر گرفتن ریسک تغییرات تصادفی مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار در مدل پیشنهادی باعث افزایش ۱۹/۱۳ درصدی در هزینه‌های کل ریزشبکه‌ها نسبت به مدل پایه شد. این موضوع به دلیل مقاوم بودن ریزشبکه‌ها در برابر تغییرات عدم قطعیت‌دار رخ داده است، به طوری که با افزایش میزان مقاومت و ریسک‌گریزی، میزان هزینهٔ کل افزایش می‌یابد.

استناد: دانشور، محمدرضا؛ انوری مقدم، امجد و مرزبند، موسی (۱۴۰۵). یک مدل بهره‌برداری ترکیبی IGDT–تصادفی برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌های چندگانهٔ تعاونی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۲۰۳-۲۲۳.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.419319.1276

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.419319.1276

1. IGDT: Information gap decision theory

۱. مقدمه

امروزه، معایب گستردهٔ زیست‌محیطی و اقتصادی مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی در فرایند تولید انرژی بهره‌گیری حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید انرژی پاک در شبکه‌های مدرن انرژی را بیش از پیش ضروری کرده است [۱]. از آنجا که شبکه‌های مدرن انرژی آینده برای بهره‌برداری از سطح کامل منابع انرژی تجدیدپذیر هدف‌گذاری شده‌اند [۲]، نیاز به ساختار مطلوب شبکه که قادر به ارائهٔ سطح مناسبی از انعطاف‌پذیری برای افزایش اطمینان از عرضهٔ پیوسته انرژی باشد، برای شبکه‌های مدرن انرژی بیش از پیش ضروری است. بنابراین، ریزشبکه‌ها از جمله ساختارهای شبکه هستند که با ارائهٔ شرایط پایداری مناسب در حضور سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر امکان تحقق اهداف مختلف شبکه‌های مدرن انرژی آینده را فراهم می‌آورند [۳]. به بیان دیگر، ریزشبکه‌ها به عنوان بسترهای مناسب شبکه برای استفادهٔ حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش تولید انرژی به حساب می‌آیند، به طوری که امکان بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه را برای سیستم به ارمغان می‌آورند [۴].

در سال‌های اخیر، تحقیقات صورت‌گرفته در زمینهٔ بهره‌بردای بهینه از ریزشبکه‌ها عمدتاً با در نظر گرفتن اهداف مختلف مانند کمینه کردن هزینه‌ها در قالب‌های مختلف بهینه‌سازی سیستم هستند. در این راستا، تحقیقات مختلف از دیدگاه‌های متفاوتی بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند، به طوری که از فناوری‌های مختلف برای دستیابی به اهداف اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی بهره گرفته شده است. به عنوان مثال، در مرجع [۵] مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد صحیح[1] با هدف بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها جهت تعیین مقادیر بهینهٔ سیستم‌های مختلف انرژی ارائه شده است. در این مطالعه، سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی به دنبال کمینه کردن هزینه‌های سالیانهٔ انرژی و به صورت هم‌زمان افزایش تاب‌آوری سیستم مورد مطالعه است. در مرجع [۶]، استراتژی مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری در بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها برای کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی پیشنهاد شده است. سیستم مدیریت انرژی محدودشده با فرکانس برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌های جزیره‌ای در مرجع [۷] پیشنهاد شده که در آن تأثیر کوتاه‌مدت تغییرات مربوط به توان تولیدی در بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها به همراه عملکرد سیستم تنظیم فرکانس مدل شده است. معماری مدیریت انرژی دو لایه برای بهره‌برداری از اینترنت انرژی در ریزشبکه‌های هیبرید در مرجع [۸] پیشنهاد شده که در لایهٔ سایبری آن یک سیستم تشخیص نفوذ دوسطحی برای شناسایی حملات سایبری مختلف در ساختار اندازه‌گیری پیشرفته پیشنهاد شده است. بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در مرجع [۹] با پیشنهاد نوعی روش نوین برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مربوط به شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز باتری صورت گرفته است. در مطالعهٔ یادشده، مدل پیشنهادی برای بهبود درآمد مربوط به ریزشبکه‌ها از طریق مشارکت در بازار تبادلی انرژی نظیر به نظیر هدف‌گذاری شده است. در مرجع [۱۰] چارچوب کنترلی مبتنی بر ریسک و امنیت برای برنامه‌ریزی زمان واقعی انرژی ریزشبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. در مطالعهٔ یادشده، مدل سه‌سطحی با هدف انجام ارزیابی‌های اقتصادی و ریسک به همراه مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مختلف ارائه شده است. مرجع [۱۱] چارچوب بهره‌برداری دوسطحی را برای مدیریت انرژی سمت عرضه و تقاضای انرژی در ریزشبکهٔ جزیره‌ای پیشنهاد کرده است. در این مطالعه، نوعی الگوریتم غیرمتمرکز نوبتی مبتنی بر نظریهٔ بازی با هدف مدیریت تعاملات بین سطوح چارچوب پیشنهادی ارائه شده است. روش بهره‌برداری دوسطحی از ریزشبکه‌ها در مرجع [۱۲] پیشنهاد شده است که علاوه بر در نظر گرفتن حالت دینامیکی تشکیل ریزشبکه‌ها، بهینه‌سازی هماهنگ‌شده‌ای را برای توان‌های اکتیو و راکتیو با هدف افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع پس از خاموشی ارائه می‌دهد. در نظر گرفتن حالت دینامیکی سیستم به عنوان فاکتور مهم در مرجع [۱۳] نیز برای نیروگاه بادی در شرایط اقلیمی متنوع و با در نظر گرفتن شاخص پایداری لحاظ شده است. این در حالی است که در برخی مراجع دیگر از جمله [۱۴]، ساختارهای هاب انرژی به عنوان رویکردی مطمئن برای تسهیل گذار به سمت سیستم‌های انرژی پایدار معرفی شده‌اند. در این‌خصوص، مرجع [۱۵] چارچوب بهینه‌سازی اقتصادی ـ فنی مبتنی بر سناریو را برای هاب انرژی‌های خانگی در شرایط آب‌وهوایی متنوع به منظور سرعت بخشیدن به تغییر به سمت سیستم‌های انرژی پایدار و کم‌کربن توسعه داده است. از طرف

1. Mixed integer linear optimization model

دیگر، برای فراهم کردن شرایط مناسب به منظور بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر با سطح نفوذ بالا، مرجع [۱۶] استراتژی کنترلی پویایی را برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌های ترکیبی ارائه می‌دهد که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود و وابستگی آن به شبکهٔ اصلی را کاهش می‌دهد. علاوه بر توسعهٔ استراتژی‌های مختلف کنترلی برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها، برخی مطالعات از مکانیزم‌های تبادلات انرژی برای بهبود بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، مرجع [۱۷] مکانیزم تبادل انرژی نوینی را برای ریزشبکهٔ هوشمند مجهزشده به سیستم ذخیره‌ساز و منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد کرده که هدف اصلی آن، بهبود خدمات انرژی است. همچنین در مرجع [۱۸]، استراتژی تبادلات انرژی مبتنی بر مکانیزم انرژی تعاملی[1] برای هماهنگی ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی چندحاملی در سیستم انرژی به‌هم‌پیوسته ناحیه‌ای توسعه پیدا کرده که هدف اصلی آن، بهره‌برداری انعطاف‌پذیر ریزشبکه‌ها است.

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، از ریزشبکه‌ها به عنوان ساختار مناسب برای استفاده از انواع مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر برای دستیابی به اهداف مختلف به‌ویژه اقتصادی و زیست‌محیطی بهره گرفته شده، اما دستیابی به اهداف یادشده نیازمند در نظر گرفتن شرایط واقع‌بینانهٔ سیستم به منظور دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت است. دلیل این امر نیز به وابسته بودن خروجی منابع انرژی پاک به شرایط آب‌وهوایی و عدم قطعیت در تولید انرژی توسط آن‌ها برمی‌گردد. با توجه به این موضوع، از روش‌های مختلف مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در مسئلهٔ بهره‌برداری بهینهٔ ریزشبکه‌ها در مطالعات اخیر استفاده شده است. در این رابطه، یکی از روش‌های معمول برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها روش برنامه‌ریزی تصادفی[2] است که امکان مطالعهٔ سیستم را در سناریوهای مختلف پارامتر عدم قطعیت‌دار به ارمغان می‌آورد [۱۹]. به عنوان نمونه، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندسطحی برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها در مرجع [۲۰] پیشنهاد شده که در آن از منابع انرژی تجدیدپذیر با خروجی متغیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بهره گرفته شده است. بهره‌برداری تصادفی زمان واقعی و چندسطحی ریزشبکه‌های چندحاملی در مرجع [۲۱] با استفاده از روش‌های مدل کنترلی پیش‌بین ترکیبی[3] و برنامه‌ریزی پویای تقریبی[4] و با هدف کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری صورت گرفته است. در مرجع [۲۲]، راهکار مبتنی بر سنجش فشاری[5] برای مسئلهٔ مدیریت انرژی غیر خطی سیستم ذخیره‌ساز در بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها ارائه شده که در آن از روش مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای در نظر گرفتن توان تولیدی تصادفی مربوط به منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه تغییرات تصادفی بار استفاده شده است. علاوه بر مراجع یادشده، تحقیقات متعدد دیگری مانند [۲۳-۲۶] از روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی بهینهٔ ریزشبکه‌ها بهره برده‌اند که اغلب برای مدل‌سازی نزدیک به واقعیت سیستم جهت تحلیل دستیابی به اهدافی مانند کاهش هزینه‌های انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی صورت گرفته است. در مطالعات مربوط به بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها، گروه دیگری از مراجع از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم[6] برای ارائهٔ مدل مقاوم در برابر تغییرات پارامترهای عدم قطعیت‌دار استفاده کرده‌اند. در این‌خصوص، مرجع [۲۷] ار روش بهینه‌سازی مقاوم برای توسعهٔ استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین با هدف کاهش اثرات نامطلوب خروجی تصادفی منابع انرژی تجدیدپذیر و ارائهٔ مدل مقاوم بهره برده است. بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌های چندگانه با استفاده از بهینه‌سازی مقاوم توزیع شده[7] و با هدف مدیریت بهینهٔ انرژی در مرجع [۲۸] صورت گرفته که در آن از روش انرژی تعاملی برای کمینه کردن هزینه‌های انرژی استفاده شده است. روش بهینه‌سازی مقاوم تطبیقی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در مرجع [۲۹] پیشنهاد شده، به طوری که از روش تبادلات انرژی تعاملی نیز برای کمینه کردن هزینه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری از شبکه استفاده شده است. مراجع [۳۰-۳۳] نیز از روش بهینه‌سازی مقاوم به عنوان روش پایه برای توسعهٔ روش مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در مسئلهٔ بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با هدف ارائهٔ ساختار مقاوم بهره برده‌اند. علاوه بر روش‌های متداول یادشده برای

1. Transactive energy
2. Stochastic programming
3. Hybrid model predictive control
4. Approximate dynamic programming
5. Compressive sensing
6. Robust optimization
7. Distributionally robust optimization

مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، از روش‌های ترکیبی دیگری نیز در تحقیقات مختلف برای مدل‌سازی رفتار تصادفی پارامترهای عدم قطعیت‌دار استفاده شده است. برای مثال، روش بهینه‌سازی با محدودیت احتمالی[1] ترکیب شده با روش بهینه‌سازی مقاوم توزیع شده در مراجع [۳۴] و [۳۵] برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با هدف مدیریت بهینهٔ انرژی در سیستم مجهز شده با منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. علاوه بر مراجع یادشده، از روش بهینه‌سازی با محدودیت احتمالی در مرجع [۳۶] نیز برای حل مسئلهٔ پخش بار با هدف تنظیم بهتر پروفیل ولتاژ در ریزشبکه‌ها بهره گرفته شده است.

با توجه به مطالعات بررسی‌شده در زمینهٔ بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها، ملاحظه می‌شود که به‌رغم ارائهٔ مدل‌های بهره‌برداری و بهینه‌سازی مختلف برای ریزشبکه‌ها جهت رفع چالش‌های مربوطه، هنوز برخی شکاف‌های تحقیقاتی اساسی در این زمینه باقی مانده‌اند که توجه به آن‌ها باعث تسهیل مدرنیزه کردن شبکه‌های انرژی خواهد شد. با اینکه شبکه‌های مدرن انرژی آینده برای مجهز شدن به ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدیدپذیر با هدف تولید کامل انرژی پاک مجهز شده‌اند، ارائهٔ مدل‌های کامل بهره‌برداری برای استفاده حداکثری از منابع انرژی پاک در تحقیقات اخیر برای شبکه‌های چندحاملی انرژی نادیده گرفته شده است. این در حالی است که تولید ۱۰۰ درصدی انرژی پاک به عنوان یکی از اهداف اصلی و ضروری برای شبکه‌های مدرن انرژی به حساب می‌آید. از طرف دیگر، سیستم‌های انرژی که مجهز به ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدیدپذیر هستند نیازمند استراتژی تصمیم‌گیری بهینه هستند، به طوری که بتواند تصمیم‌گیرنده را قادر به اتخاذ تصمیم‌های بهینه و هدفمند در حضور سطح بالایی از منابع انرژی تصادفی بکند. با این‌حال، به دلیل وجود میزان بالایی از عدم قطعیت‌ها در سیستم، تا کنون استراتژی تصمیم‌گیری بهینه که بتواند تعاملات انرژی بین ریزشبکه‌های تعاونی را بهبود بخشیده و باعث افزایش کارایی سیستم‌های چند عاملی بشود در تحقیقات اخیر ارائه نشده است. موضوع دیگر قابل توجه برای شبکه‌های انرژی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده از روش‌های مختلف بهبود انعطاف‌پذیری سیستم است، به طوری که علاوه بر مدیریت انرژی جامع، بتوانند از فناوری‌های مختلف مانند تبادلات و تبدیلات انرژی بهره ببرند. از آنجا که استفاده از روش‌های مختلف تحت چارچوب یکپارچه برای شبکه‌های انرژی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر ضروری است، تا به حال ارائهٔ چنین چارچوب جامعی برای بهبود انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان عرضهٔ انرژی در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است.

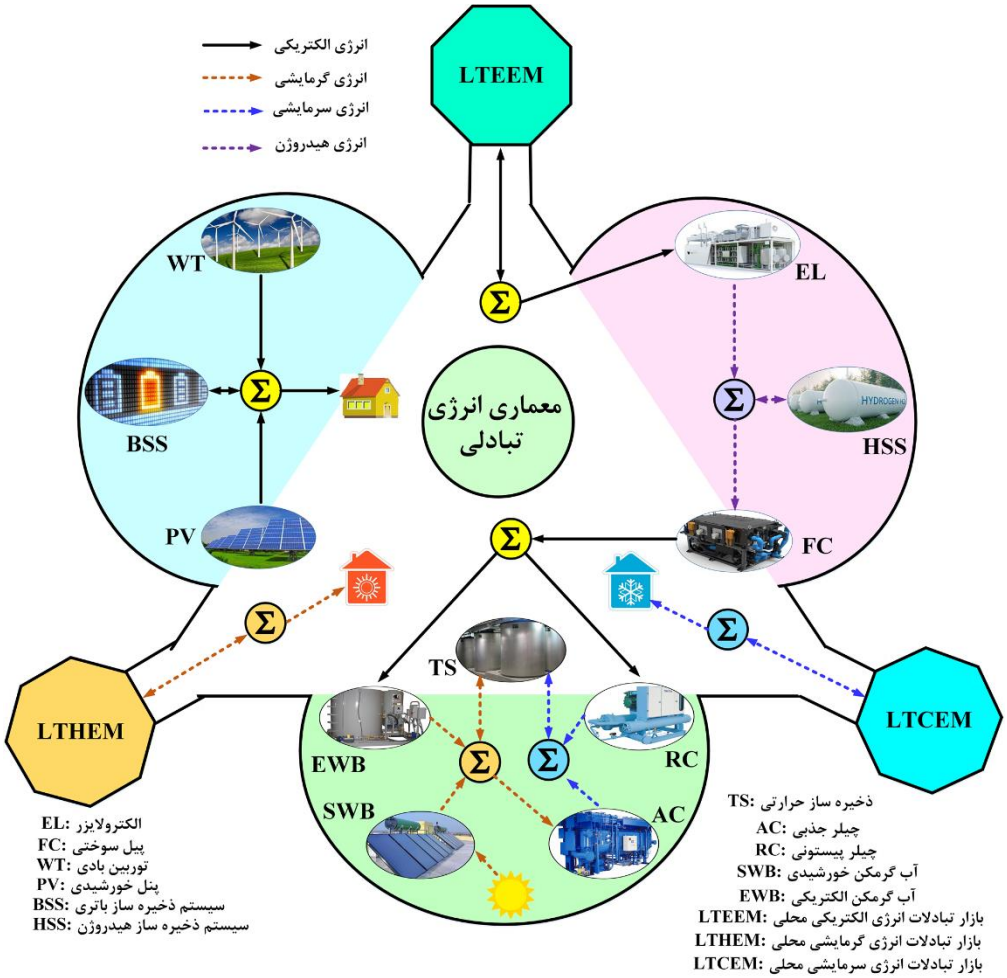
در پاسخ به شکاف‌های تحقیقاتی توضیح‌داده‌شده، این مقاله یک مدل بهره‌برداری جامعی را برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه تعاونی پیشنهاد می‌کند. مدل پیشنهادی به دلیل بهره بردن از فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی، تبدیل انرژی، تبادلات و مدیریت انرژی قادر به پشتیبانی از ساختار مجهزشده به سطح کامل منابع انرژی پاک است، به طوری که شرایط مناسبی را برای ریزشبکه‌ها جهت تولید کامل انرژی پاک فراهم می‌کند. از طرف دیگر، این مقاله چارچوب جامعی را برای بهبود انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها در حضور ۱۰۰ درصد منابع انرژی پاک ارائه می‌دهد، به طوری که علاوه بر استفاده از برنامه‌های مدیریت انرژی، از مدل‌های مبتنی بر فناوری انرژی تعاملی نیز برای ایجاد تبادلات انرژی هدفمند بین ریزشبکه‌ها در سطح محلی بهره می‌برد. همچنین، با توجه به مجهز شدن سیستم به سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر، مطالعهٔ ریسک بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در محیط عدم قطعیت‌دار لازم و ضروری است. بنابراین، با هدف مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مطالعه و تحلیل ریسک بهره‌برداری از ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع انرژی تصادفی، این مقاله روش ترکیبی IGDT–تصادفی مبتنی بر استراتژی‌های ریسک‌گریز و ریسک‌پذیر را برای ارزیابی توابع مقاوم و فرصت در مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به ریزشبکه‌های تعاونی توسعه می‌دهد. در حقیقت، از آنجا که رفتار تصادفی پارامترهای عدم قطعیت‌دار مختلف با یکدیگر متفاوت است، لذا به بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی به منظور مدل‌سازی مناسب عدم قطعیت‌های مختلف تأثیرگذار در مسئلهٔ بهینه‌سازی نیاز داریم. به همین‌منظور، از روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های سرعت باد و شدت تابش خورشید استفاده شده و از روش IGDT نیز برای مدل‌سازی عدم قطعیت مربوط به قیمت انرژی بهره گرفته شده است.

1. Chance-constrained optimization

۲. ساختار کلی ریزشبکه‌های تعاونی

با توجه به لزوم تولید انرژی پاک برای کاهش چشمگیر اثرات منفی استفاده از سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، این مقاله ساختار مبتنی بر انرژی‌های چندحاملی را ارائه می‌دهد که از ۱۰۰ درصد منابع انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی بهره می‌برد. در بخش الکتریکی ساختار پیشنهادی، ریزشبکه‌ها به پنل‌های خورشیدی[۱] و توربین‌های بادی[۲] برای تولید کامل انرژی پاک مجهز شده‌اند. منظور از تولید کامل انرژی پاک در تحقیق حاضر این است که ساختار ریزشبکه نشان‌داده‌شده در شکل ۲ به هیچ منبع تولیدکنندهٔ انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی مجهز نشده است و لذا تمام انرژی که در داخل ریزشبکه تولید می‌شود از نوع انرژی پاک است. از سیستم ذخیره‌کنندهٔ انرژی الکتریکی[۳] برای کاهش اثرات نامطلوب نوسانات غیر قابل کنترل خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. انرژی الکتریکی تولیدشده در ریزشبکه‌ها نه تنها برای تبادلات انرژی بین ریزشبکه‌های دیگر در سطح محلی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، بلکه می‌تواند برای مبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی نیز در نظر گرفته شود. هر یک از ریزشبکه‌ها می‌توانند در زمان‌هایی که میزان تولید انرژی آن‌ها بیشتر از مصرف انرژی است، بخشی از انرژی اضافی خود را در بازار تبادلات انرژی محلی با ریزشبکه‌هایی که به دریافت انرژی نیاز دارند، مبادله بکند. در عوض، در ساعت‌های دیگر همان روز، ریزشبکه همان مقداری که انرژی به بازار تبادلات انرژی محلی داده بود را از بازار برای مدیریت انرژی خود دریافت می‌کند. این موضوع باعث افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها در مدیریت بهینهٔ انرژی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود. در این تحقیق، به دلیل مجهز شدن ریزشبکه‌ها به ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدیدپذیر، ریزشبکه‌ها از سیستم‌های تبدیل‌کنندهٔ انرژی نیز برای افزایش انعطاف‌پذیری سیستم بهره می‌برند. به بیان دیگر، بخشی از اضافه تولید انرژی الکتریکی در ریزشبکه‌ها می‌تواند توسط واحد الکترولایزر[۴] برای تولید هیدروژن مصرف شود. هیدروژن تولیدشده در سیستم ذخیره‌کنندهٔ هیدروژن[۵] برای استفاده در ساعت‌های مورد نیاز دیگر ذخیره می‌شود. با هدف افزایش اطمینان از عرضهٔ پیوستهٔ انرژی الکتریکی در حضور سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر، از واحد پیل سوختی[۶] نیز برای تولید انرژی الکتریکی بهره گرفته شده است، به طوری که این واحد از هیدروژن ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. در بخش انرژی حرارتی، از گرم‌کن‌های برقی[۷] و خورشیدی[۸] برای تولید انرژی گرمایشی و چیلرهای جذبی[۹] و پیستونی[۱۰] بری تولید انرژی سرمایشی بهره گرفته شده است. در این راستا، از سیستم ذخیره‌ساز انرژی حرارتی برای ذخیرهٔ انرژی حرارتی در ساعت‌ها با تولید اضافی استفاده شده است که اطمینان از عرضهٔ انرژی حرارتی را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، مشابه انرژی الکتریکی، ریزشبکه‌ها می‌توانند در تبادلات محلی انرژی‌های گرمایشی و سرمایشی مشارکت داشته باشند و امکان مبادلات انرژی حرارتی با شبکه اصلی نیز برای ریزشبکه‌ها جهت افزایش انعطاف‌پذیری عملکرد آن‌ها در نظر گرفته شده است. در این‌خصوص، شکل ۱ ساختار به‌هم‌پیوسته را برای ریزشبکه‌های تعاونی نشان می‌دهد. توسعهٔ ساختار به‌هم‌پیوسته به ریزشبکه‌ها این امکان را می‌دهد تا بتوانند از امکان در دسترس بودن انوع مختلف حامل‌های انرژی مانند انرژی الکتریکی، هیدروژن، گرمایشی و سرمایشی استفادهٔ مطلوبی داشته باشند. به بیان دیگر، ریزشبکه‌ها در ساختار به‌هم‌پیوسته انرژی می‌توانند گزینه‌های بیشتری بر اساس حامل‌های مختلف انرژی برای مدیریت بهینهٔ انرژی خود داشته باشند که نه تنها به کاهش هزینه‌های کلی آن‌ها منجر می‌شود، بلکه انعطاف‌پذیری سیستم را در برابر تغییرات عدم قطعیت‌دار منابع انرژی تجدیدپذیر بهبود می‌بخشد.

1. PV panels (PV)
2. Wind turbines (WT)
3. Battery storage system (BSS)
4. Electrolyzer (EL)
5. Hydrogen storage system (HSS)
6. Fuel cell (FC)
7. Electric water boiler (EWB)
8. Solar water boiler (SWB)
9. Absorption chiller (AC)
10. Reciprocating chiller (RC)



شکل ۱. ساختار به‌هم‌پیوسته و یکپارچهٔ ریزشبکه‌های تعاونی

۳. مدل‌سازی ریاضیاتی مسئلهٔ بهینه‌سازی

در این تحقیق، هدف اصلی مسئلهٔ بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه‌های کل سیستم است. بنابراین، تابع هدف مسئلهٔ بهینه‌سازی مربوط به مدل پایه با لحاظ هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم‌های مختلف انرژی به صورت رابطهٔ ۱ است.

$$f_m = \sum_{\tau=1}^{N_\tau}(\square_{El}^{BSS}(\tau)+\square_{El}^{T,EM}(\tau)) - \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{El}^{Ex}(\tau).P^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau - \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{El}^{Se}(\tau).P^{L}(m,\tau).\Delta\tau + \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\square_{He}^{T,EM}(\tau)$$
$$-\sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{He}^{Ex}(\tau).H^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau - \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{He}^{Se}(\tau).H^{L}(m,\tau).\Delta\tau + \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\square_{Co}^{T,EM}(\tau) - \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{Co}^{Ex}(\tau).C^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau \quad (۱)$$
$$-\sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{Co}^{Se}(\tau).C^{L}(m,\tau).\Delta\tau + \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\square_{Ga}^{T,EM}(\tau) - \sum_{t=1}^{N_\tau}\mu_{Ga}^{Ex}(\tau).G^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau - \sum_{\tau=1}^{N_\tau}\mu_{Ga}^{Se}(\tau).G^{L}(m,\tau).\Delta\tau$$

در رابطهٔ ۱، $\square_{El}^{BSS}(\tau)$ هزینهٔ بهره‌برداری از واحد باتری را نشان می‌دهد. $\square_{El}^{T,EM}(\tau)$، $\square_{He}^{T,EM}(\tau)$، $\square_{Co}^{T,EM}(\tau)$ و $\square_{Ga}^{T,EM}(\tau)$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ هزینهٔ کل مدیریت انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی و گازی هستند. $\mu_{El}^{Ex}(\tau)$، $\mu_{He}^{Ex}(\tau)$، $\mu_{Co}^{Ex}(\tau)$ و $\mu_{Ga}^{Ex}(\tau)$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ قیمت تبادلات انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی و گازی هستند. $\mu_{El}^{Se}(\tau)$، $\mu_{He}^{Se}(\tau)$، $\mu_{Co}^{Se}(\tau)$ و $\mu_{Ga}^{Se}(\tau)$ به‌ترتیب قیمت فروش انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی و گازی به مصرف‌کننده را نشان می‌دهند. $P^{Ex}(m,\tau)$، $H^{Ex}(m,\tau)$، $C^{Ex}(m,\tau)$ و $G^{Ex}(m,\tau)$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ میزان تبادلات انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی و گازی هستند. $P^{L}(m,\tau)$، $H^{L}(m,\tau)$، $C^{L}(m,\tau)$ و $G^{L}(m,\tau)$ نیز مقادیر بار مصرفی انرژی الکتریکی، گرمایشی، سرمایشی و گازی را نشان می‌دهند.

در این تحقیق، به دلیل متفاوت بودن الگوی تغییراتی مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار، از ترکیب روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی (SP[1]) و روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی (IGDT) استفاده شده است. روش IGDT امکان در نظر گرفتن تغییرات مطلوب و نامطلوب مربوط به تغییرات پارامتر عدم قطعیت‌دار را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد. به بیان دیگر، این روش دارای دو تابع مقاومت[2] و فرصت[3] است که بر اساس استراتژی‌های ریسک‌گریز[4] و ریسک‌پذیر[5] تغییرات مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار را مورد بررسی قرار می‌دهند. در این مطالعه، با توجه به اینکه تغییرات مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار سرعت باد و شدت تابش خورشیدی طی شبانه‌روز تغییرات شدیدتری دارند، به طوری که در نظر گرفتن بهترین یا بدترین این تغییرات در مدل‌سازی و عدم رخداد احتمالی آن در واقعیت می‌تواند اختلاف زیادی در بخش تولید انرژی مسئلهٔ برنامه‌ریزی با حالت رخداد واقعی آن ایجاد بکند، لذا، نیازمند در نظر گرفتن سناریوهای مختلف با احتمال رخداد مشخص از تغییرات مختلف مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار یادشده هستیم تا نتایج نزدیک به واقعیت از مدل‌سازی احتمالاتی منابع انرژی تجدیدپذیر اخذ شود. بنابراین، برای مدل‌سازی رفتار تصادفی پارامترهای عدم قطعیت‌دار مربوط به منابع انرژی تجدیدپذیر از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه رفتار تصادفی قیمت انرژی دارای تغییرات شدید خارج از الگوی پیش‌بینی شده نیست، لذا، از روش IGDT برای در نظر گرفتن تغییرات مطلوب و نامطلوب آن به منظور فراهم کردن شرایط مقاوم و فرصت برای تصمیم‌گیرنده استفاده شده است. در این راستا، در فرایند مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی، ابتدا تعداد زیادی سناریو که نشان‌دهندهٔ حالت‌های مختلف تغییرات مربوط به پارمترهای عدم قطعیت‌دار هستند، تولید شده و با توجه به بار محاسباتی زیاد، پیچیدگی و زمان‌بر بودن حل مسئله در حضور تعداد زیاد سناریو، از روش کاهش سناریو برای انتخاب سناریوها با احتمال وقوع زیاد استفاده شده است. در این راستا، تابع هدف بعد از اعمال روش برنامه‌ریزی تصادفی به صورت رابطهٔ ۲ است.

$$F_m = \sum_{s=1}^{N_s} \varepsilon_s^{SP} . f\left(m, s\right) \tag{۲}$$

در رابطهٔ یادشده، ε_s^{SP} احتمال وقوع هر سناریو s را نشان می‌دهد. پس از اعمال روش برنامه‌ریزی تصادفی و محاسبهٔ مقدار انتظاری تابع هدف در رابطهٔ ۲، روش IGDT به صورت زیر برای مدل‌سازی مسئله اعمال می‌شود. درخور یادآوری است، به‌کارگیری روش ترکیبی IGDT–تصادفی به صورت فوق در تحقیقات مختلف اخیر برای مدل‌سازی احتمالاتی مسائل گوناگون حوزهٔ انرژی توسعه پیدا کرده است [۳۷–۳۹].

۳–۱. تابع مقاومت

در تابع مقاومت، تابع هدف بیشینه کردن میزان انحراف از مقدار پیش‌بینی‌شده پارامتر عدم قطعیت‌دار است، به طوری که هزینهٔ کل از مقدار هزینهٔ انتظاری پایین‌تر باشد. بنابراین، مسئلهٔ بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع مقاومت به صورت روابط ۳ ـ ۷ خواهد بود.

$$\text{Max } \Phi^{Ro} \tag{۳}$$

$$S.t. \tag{۴}$$

$$\Re \le \Re^{Ro} = (1+\wp)\Re^0 \tag{۵}$$

$$\Re = \max_{\Delta\mu^{Ex}(\tau)} \left\{ \begin{array}{l} \square - \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{\tau=1}^{N_\tau} (\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \\ +\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau \end{array} \right\} \tag{۶}$$

1. Stochastic programming (SP)
2. Robustness function
3. Opportunity function
4. Risk-averse strategy
5. Risk-seeker strategy

$$-\Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \le \Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) \le \Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \quad (۷)$$

در روابط یادشده، Φ^{Ro} میزان انحراف از مقدار پیش‌بینی‌شده پارامتر عدم قطعیت‌دار را نشان می‌دهد. $\Re^{Ro}$ مقدار تابع هدف در استراتژی ریسک گریز را نشان می‌دهد. بخش باقی‌مانده تابع هدف را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، مسئلهٔ بهینه‌سازی تک‌سطحی به دوسطحی تبدیل شده که نیازمند تبدیل مجدد به مسئلهٔ تک‌سطحی است. برای تبدیل مجدد مسئله به تک‌سطحی، بدترین حالت تغییرات مربوط به قیمت انرژی با توجه به مقدار تبادلات انرژی به صورت رابطهٔ ۸ در نظر گرفته شده است.

$$\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) = \begin{cases} \Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) & P^{Ex}(m,\tau) \le 0 \\ -\Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) & P^{Ex}(m,\tau) \ge 0 \end{cases} \quad (۸)$$

با توجه به رابطهٔ یادشده، بدترین حالت مربوط به قیمت انرژی در دو حالت فوق می‌تواند به صورت روابط ۹ و ۱۰ تعریف شود.

$$(\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) + \Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau) \le 0 \quad (۹)$$

$$(\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) - \Phi^{Ro}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau) \le 0 \quad (۱۰)$$

۳-۲. تابع فرصت

در تابع فرصت، تغییرات مطلوب مربوط به پارامتر عدم قطعیت‌دار در نظر گرفته می‌شود، به طوری که هدف کمینه کردن تغییرات مربوط به پارامتر عدم قطعیت‌دار از مقدار پیش‌بینی‌شده آن است.

$$\text{Min } \Phi^{Op} \quad (۱۱)$$

$$S.t. \quad (۱۲)$$

$$\Re \le \Re^{Op} = (1-\wp)\Re^{0} \quad (۱۳)$$

$$\Re = \min_{\Delta\mu^{Ex}(\tau)} \left\{ \begin{array}{l} -\sum_{m=1}^{N_m}\sum_{\tau=1}^{N_\tau}(\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \\ +\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau).\Delta\tau \end{array} \right\} \quad (۱۴)$$

$$-\Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \le \Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) \le \Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) \quad (۱۵)$$

در روابط ۱۱ تا ۱۵، Φ^{Op} میزان انحراف از مقدار پیش‌بینی‌شدهٔ پارامتر عدم قطعیت‌دار را نشان می‌دهد. $\Re^{Op}$ مقدار تابع هدف در استراتژی ریسک‌پذیر را نشان می‌دهد. مشابه تابع مقاومت، مسئلهٔ بهینه‌سازی تک‌سطحی به دوسطحی تبدیل شده که نیازمند تبدیل مجدد به مسئلهٔ تک‌سطحی است. این بار برای تبدیل مجدد مسئله به تک‌سطحی، بهترین حالت تغییرات مربوط به قیمت انرژی با توجه به مقدار تبادلات انرژی به صورت رابطهٔ ۱۶ در نظر گرفته شده است.

$$\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) = \begin{cases} -\Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) & P^{Ex}(m,\tau) \le 0 \\ \Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau) & P^{Ex}(m,\tau) \ge 0 \end{cases} \quad (۱۶)$$

با توجه به رابطهٔ ۱۶، بهترین حالت مربوط به قیمت انرژی در دو حالت یادشده می‌تواند به صورت روابط ۱۷ و ۱۸ تعریف شود.

$$(\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) + \Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau) \ge 0 \quad (۱۷)$$

$$(\Delta\mu_{El}^{Ex}(\tau) - \Phi^{Op}\hat{\mu}_{El}^{Ex}(\tau)).P^{Ex}(m,\tau) \ge 0 \quad (۱۸)$$

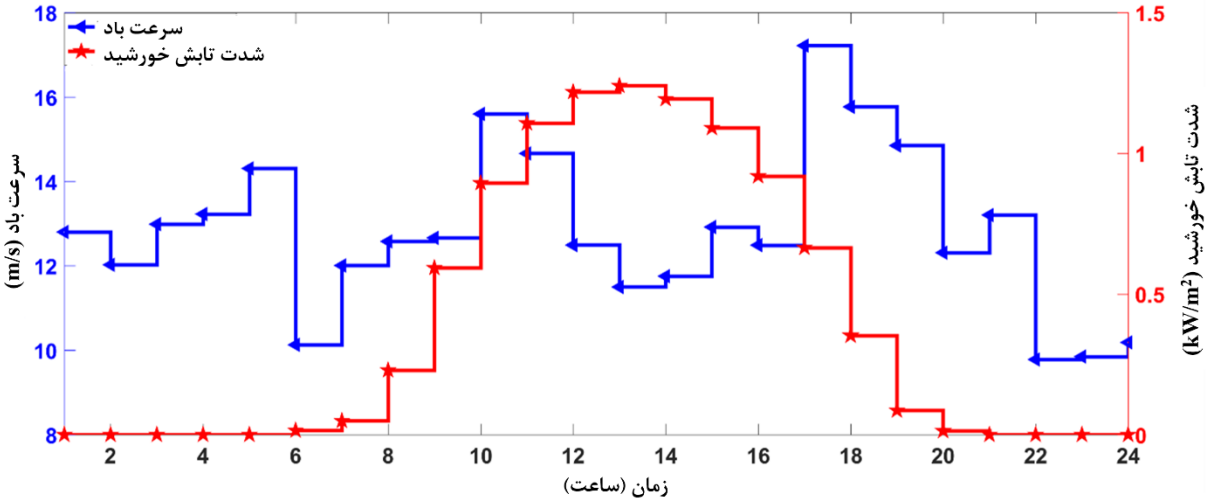
۳-۳. محدودیت‌ها

در این تحقیق، از توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی برای تولید انرژی پاک استفاده شده است، به طوری که محدودیت‌های مربوط به آن‌ها در مرجع [۴۰] در دسترس است. از واحد ذخیره‌ساز باتری برای کاهش اثرات منفی مربوط به نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر بهره گرفته شده که نحوهٔ مدل‌سازی آن در مرجع [۴۱] ارائه شده است. از واحدهای الکترولایزر، سیستم ذخیره‌ساز

هیدروژن، متان‌سازی و پیل سوختی در بخش تبدیل انرژی بهره گرفته شده و نحوهٔ مدل‌سازی ریاضیاتی آن‌ها در مرجع [۴۲] ارائه شده است. در این تحقیق، از برنامه‌های پاسخگویی بار مانند جابه‌جایی بار و قطع بار برای مدیریت انرژی در سمت تقاضا بهره گرفته شده که روابط ریاضیاتی آن‌ها در مرجع [۴۱] ارائه شده است. در شبکه‌های انرژی، در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به شبکه برای اطمینان از قابل پیاده‌سازی بودن مدل‌های پیشنهادی امری ضروری است. بنابراین، در این تحقیق، از پخش بار AC برای لحاظ کردن محدودیت‌های مربوط به شبکهٔ الکتریکی اعم از قیود پخش توان‌های اکتیو و راکتیو، قید تغییرات استاندارد توان ظاهری، قید تغییرات مجاز ولتاژ و زاویه آن در مدل‌سازی مسئله بهره گرفته شده است [۴۳]. در شبکهٔ گرمایش و سرمایش ناحیه‌ای، از گرم کن‌های الکتریکی و خورشیدی برای تولید انرژی گرمایشی و از چیلرهای جذبی و پیستونی برای تولید انرژی سرمایشی استفاده می‌شود، به طوری که مدل‌سازی ریاضیاتی آن‌ها در مرجع [۴۴] ارائه شده است. همچنین، از واحد ذخیره‌ساز حرارتی برای افزایش اطمینان از عرضهٔ پیوستهٔ انرژی حرارتی برای مصرف‌کنندگان بهره گرفته شده، به طوری که مدل‌سازی ریاضیاتی آن به همراه مدل‌سازی فناوری انرژی تعاملی در مرجع [۴۵] در دسترس است.

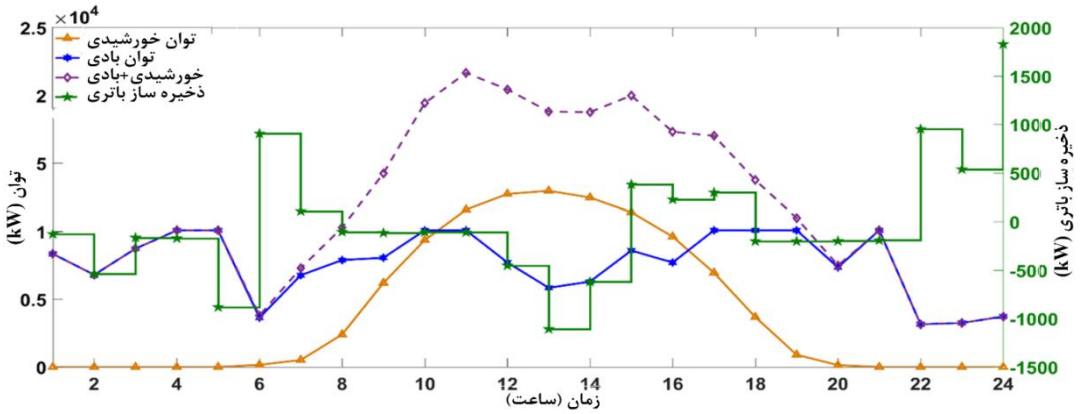
۴. نتایج شبیه‌سازی

در این تحقیق، مدلی جدید برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌های تعاونی مجهز شده به ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در این مطالعه، هر ریزشبکه به توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی برای تولید انرژی الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با هدف افزایش اطمینان از عرضه بدون قطع انرژی مجهز شده است. میزان خروجی مربوط به توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به صورت مستقیم وابسته به میزان سرعت باد و شدت تابش خورشید است. شکل ۲ میزان سرعت باد و شدت تابش خورشید طی روز را نشان می‌دهد.



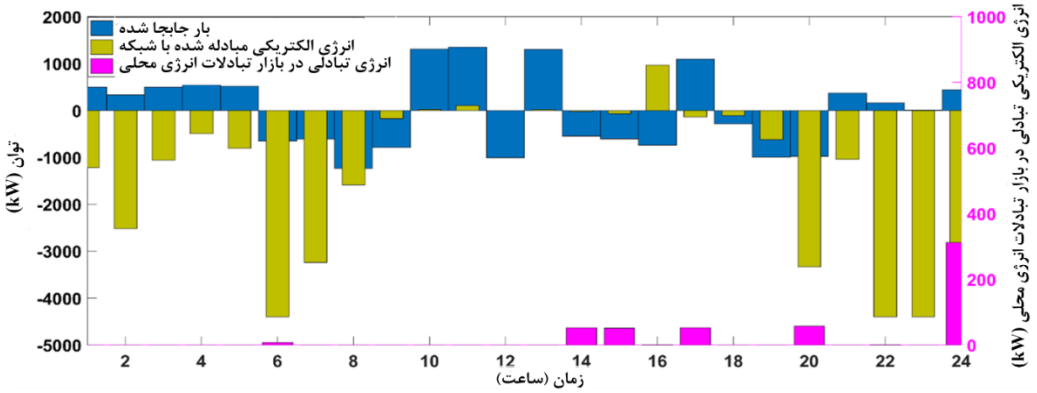
شکل ۲. میزان سرعت باد و شدت تابش خورشید

پس از شبیه‌سازی مسئلهٔ مربوطه در نرم‌افزار گمز، مقدار تابع هدف برای مدل‌های پایه و پیشنهادی به‌ترتیب برابر با ۱۲۳۸۷۶۶/۹۸۸ و ۱۵۳۱۷۸۴/۹۳۱ دلار به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هزینهٔ کل مربوط به مدل ترکیبی بیشتر از مدل پایه است که دلیل این امر به این موضوع برمی‌گردد که در نظر گرفتن ریسک مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار باعث ارائهٔ مدل مقاوم‌تر و در نتیجه، هزینهٔ بیشتر برای تصمیم‌گیرنده شده است. این موضوع برای بازه تغییرات مختلف پارامترهای عدم قطعیت‌دار در توابع مقاومت و فرصت متفاوت بوده، به طوری که مقدار تابع هدف برای تغییرات مختلف آن‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. علاوه بر این، نتایج مربوط به برنامه‌ریزی بهینهٔ سیستم‌های الکتریکی در شکل ۳ نشان داده شده است.



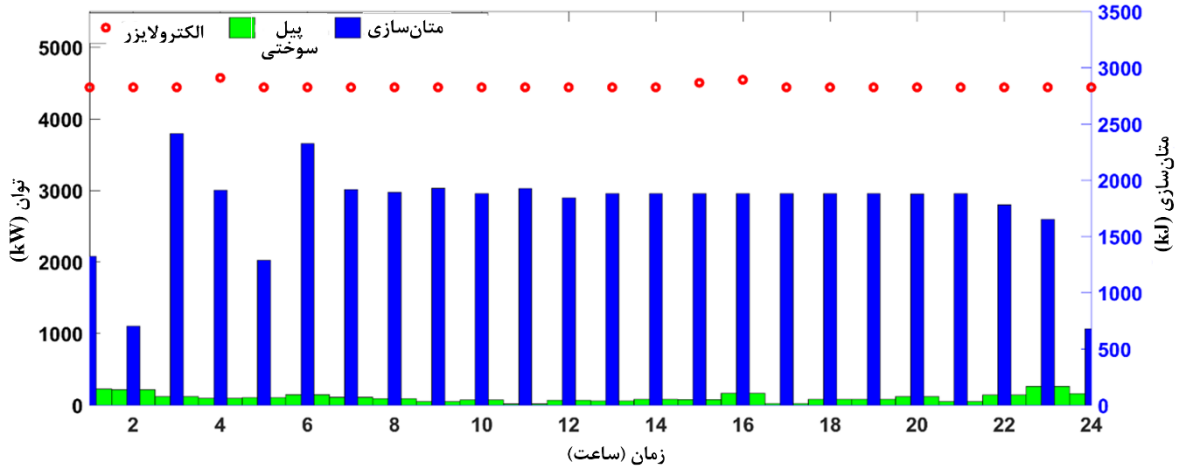
شکل ۳. برنامه‌ریزی بهینهٔ سیستم‌های الکتریکی

مطابق شکل ۳ ملاحظه می‌شود که توربین‌های بادی تنها منابع انرژی تجدیدپذیر تولیدکنندهٔ انرژی پاک در ساعت‌های اولیه و انتهایی روز هستند. این در حالی است که از ساعت ۶ صبح به بعد شاهد افزایش میزان شدت تابش خورشید هستیم، به طوری که رفته‌رفته به تولید پنل‌های خورشیدی اضافه شده است. در این راستا، پنل‌های خورشیدی به عنوان منابع غالب تولیدکنندهٔ انرژی پاک در ریزشبکه به شمار می‌روند، به طوری که دارای بیشترین خروجی انرژی الکتریکی در ساعت‌های پیک بار هستند. تولید بیشتر انرژی در ساعت‌های پرمصرف باعث کمک به سیستم در حفظ تعادل انرژی می‌شود و احتمال قطعی بر اثر کمبود انرژی در ساعت‌های یادشده را کاهش می‌دهد. در این مطالعه، از سیستم ذخیره‌ساز باتری نیز برای پشتیبانی از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور فراهم کردن شرایط مناسب برای عرضهٔ انرژی الکتریکی استفاده شده است. مطابق شکل ۳، ملاحظه می‌شود که سیستم ذخیره‌ساز باتری در ساعت‌های اولیه صبح به‌ویژه ۶ تا ۸ صبح به دلیل افت تولید توربین‌های بادی و افزایش مصرف انرژی در حالی که هنوز تولید پنل‌های خورشیدی چشمگیر نیست شروع به فعالیت در حالت دشارژ کرده است، به طوری که باعث حفظ تعادل انرژی در سیستم شود. در ساعت‌های میانی ظهر که ریزشبکه‌ها دارای تولید انرژی مطلوبی به واسطهٔ خروجی حداکثری پنل‌های خورشیدی هستند، سیستم ذخیره‌ساز در حالت شارژ قرار گرفته است تا بتواند با ذخیرهٔ مقدار مطلوبی انرژی پاسخگوی بخشی از کمبود تولید انرژی در ساعت‌های دیگر روز باشد. این امر با توجه به کاهش شدید تولید انرژی در ساعت‌های انتهایی شب مشهود است، به طوری که شاهد دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در ساعت‌های انتهایی روز به منظور جبران بخشی از کمبود تولید انرژی در ریزشبکه‌ها هستیم. در سیستم‌های مجهزشده به سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز به‌تنهایی نمی‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش قابل توجه سطح اطمینان از عرضهٔ پیوسته انرژی باشد. بنابراین، در این مطالعه از تبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی و تبادلات انرژی بین ریزشبکه‌ها در سطح محلی به همراه برنامهٔ پاسخگویی بار نیز برای حفظ تعادل انرژی در سیستم بهره گرفته شده است. شکل ۴ میزان جابه‌جایی بار را به همراه تبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی و در بازار تبادلات انرژی محلی نشان می‌دهد.



شکل ٤. میزان جابه‌جایی بار، تبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی و در بازار تبادلات انرژی محلی

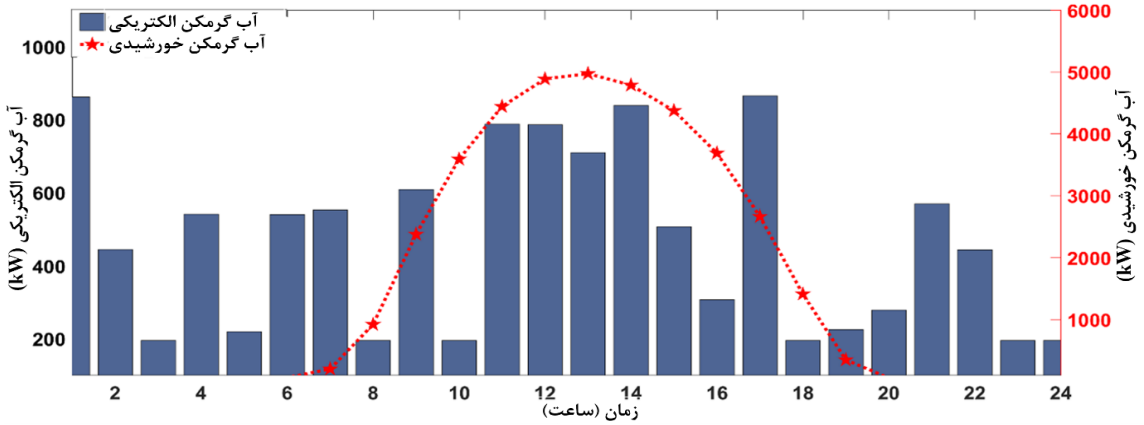
مطالعهٔ حاضر از برنامهٔ جابه‌جایی بار به عنوان برنامهٔ پاسخگویی بار بهره گرفته است. با توجه به شکل ۴ درمی‌یابیم که بخشی از بار مربوط به ساعت‌ها با تولید انرژی ناکافی مانند ۶ تا ۱۰ صبح به ساعت‌های کم‌باری یا دارای تولید انرژی کافی مانند برخی از ساعت‌های ظهر جابه‌جا شده‌اند. این موضوع انعطاف‌پذیری سیستم برای مواجههٔ مطلوب با شرایط مختلف در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد. علاوه بر استفاده از برنامه‌های مدیریت انرژی، از تبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی و تبادلات انرژی بین ریزشبکه‌ها در بازار مبادلات انرژی محلی نیز برای افزایش توانمندی ریزشبکه‌ها در مدیریت بهینهٔ انرژی بهره گرفته شده است. در این راستا، شکل ۴ نشان می‌دهد در ساعت‌های ابتدایی و انتهایی روز که میزان تولید انرژی توسط پنل‌های خورشیدی صفر است، از ظرفیت دریافت انرژی از شبکهٔ اصلی برای برقراری تعادل بین تولید و مصرف انرژی بهره گرفته شده است. این در حالی است که بخشی از اضافه تولید انرژی در ساعت‌های میانی روز نیز برای بیشینه کردن درآمد ریزشبکه‌ها به شبکهٔ اصلی فروخته شده است. همچنین، شکل ۴ نشان می‌دهد در برخی از ساعت‌های شبانه‌روز از امکان تبادلات انرژی در بازار تبادلات انرژی محلی بین ریزشبکه‌ها بر اساس فناوری انرژی تعاملی نیز بهره گرفته شده است. تبادلات انرژی محلی در ساعات با بحران انرژی می‌تواند سیستم را در راستای حفظ تعادل انرژی پشتیبانی بکند. در ساعت‌های میانی روز که میزان تولید پنل‌های خورشیدی در سطح مطلوبی قرار دارد، بخشی از انرژی تولیدشده به بازار تبادلات انرژی محلی تزریق می‌شود و در ساعت‌های انتهایی روز که میزان تولید انرژی پاک در کمترین سطح قرار دارد، دوباره انرژی الکتریکی از بازار تبادلات انرژی محلی جهت تعادل بار دریافت می‌شود. علاوه بر راهکارهای یادشده که توانایی ریزشبکه‌ها را برای مدیریت بهینهٔ انرژی افزایش می‌دهند، بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در ساختار چندحاملی انرژی به آن‌ها این امکان را می‌دهد تا از واحدهای تبدیل‌کنندهٔ انرژی نیز برای تبدیل انواع مختلف انرژی به یکدیگر بهره ببرند. در این رابطه، شکل ۵ میزان خروجی مربوط به واحدهای الکترولایزر، پیل سوختی و متان‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. میزان خروجی مربوط به واحدهای الکترولایزر، پیل سوختی و متان‌سازی

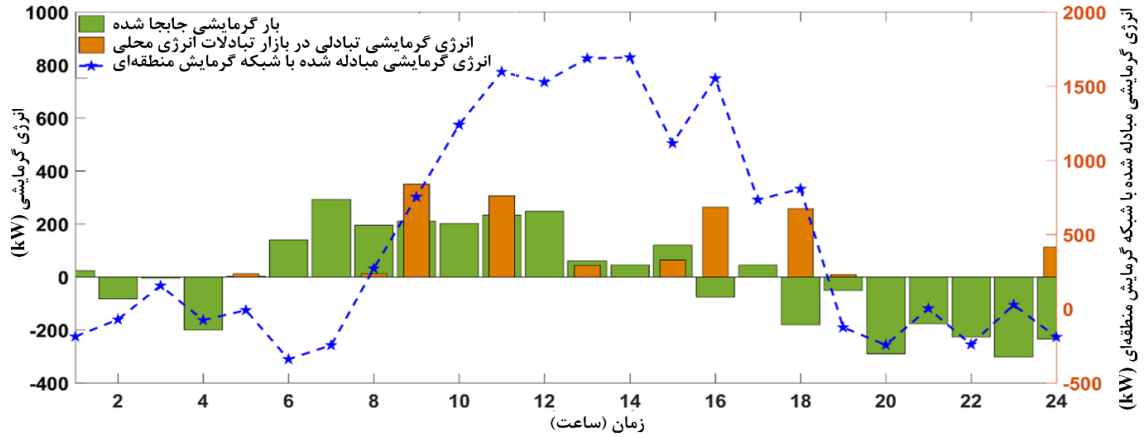
شکل ۵ نشان می‌دهد واحد پیل سوختی در ساعت‌های اولیه و انتهایی روز بیشترین تولید انرژی الکتریکی را داشته است. دلیل این امر نیز به نیاز بیشتر ریزشبکه‌ها به تولید انرژی در ساعت‌های یادشده به دلیل عدم کفایت در تولید انرژی توسط سایر واحدهای تولیدکنندهٔ انرژی مانند پنل‌های خورشیدی برمی‌گردد. این در حالی است که واحد متان‌سازی در ساعت‌های اولیه صبح دارای نوسان در تولید انرژی گازی بوده است که علت این موضوع به محدودیت دسترسی به مقدار هیدروژن دریافتی از واحد الکترولایزر برمی‌گردد. اما از ساعت ۸ صبح به بعد شاهد رفتار تقریباً ثابتی از واحد متان‌سازی در تولید انرژی گاز هستیم، به طوری که مقدار تولید آن در ساعت‌های انتهایی شب کاهش پیدا کرده است. از طرف دیگر، واحد الکترولایزر به دلیل محدودیت در میزان مصرف انرژی الکتریکی برای تولید هیدروژن، دارای تغییرات تقریباً ثابتی در میزان مصرف انرژی الکتریکی طی شبانه‌روز بوده است. با توجه به بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در ساختار به‌هم‌پیوسته شبکه‌های چندحاملی انرژی، از واحدهای

تولیدکنندهٔ انرژی گرمایشی نیز در ریزشبکه‌ها برای تولید انرژی گرمایشی بهره گرفته شده است. بنابراین، شکل ۶ میزان تولید انرژی گرمایشی توسط آب‌گرمکن‌های خورشیدی و الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ٦. میزان تولید انرژی گرمایشی توسط آب‌گرمکن‌های خورشیدی و الکتریکی

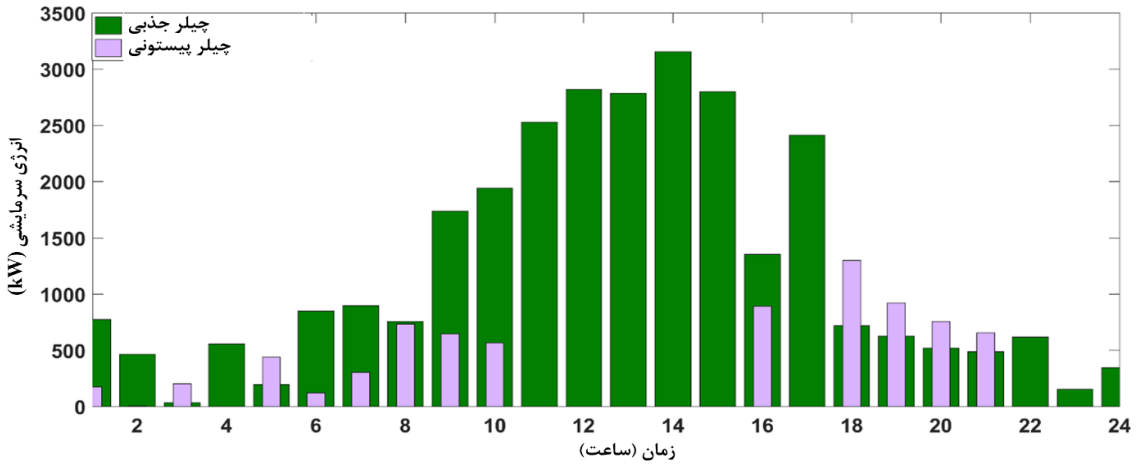
شکل ۶ نشان می‌دهد آب‌گرمکن الکتریکی دارای بیشترین تولید انرژی گرمایشی در ساعت‌های میانی ظهر است. در حقیقت، آب‌گرمکن الکتریکی از انرژی الکتریکی برای تولید انرژی گرمایشی استفاده می‌کند و این موضوع باعث تولید کمتر این واحد در ساعت‌های ابتدایی و انتهایی روز به دلیل کمبود انرژی الکتریکی در دسترس در سیستم شده است. اما، در ساعت‌های میانی روز به دلیل تولید مطلوب انرژی الکتریکی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر، شاهد تولید بیشتر انرژی گرمایشی توسط آب‌گرمکن الکتریکی هستیم. از طرف دیگر، آب‌گرمکن خورشیدی که از شدت تابش خورشید برای تولید انرژی گرمایشی بهره می‌برد، دارای بیشترین تولید انرژی گرمایشی در ساعت‌های میانی ظهر است که شدت تابش خورشید در حداکثر مقدار خود قرار دارد. در بخش انرژی گرمایشی نیز مشابه انرژی الکتریکی، از برنامهٔ پاسخگویی بار و تبادلات انرژی با شبکهٔ اصلی و در سطح محلی برای مدیریت بهینهٔ انرژی گرمایشی ریزشبکه‌ها بهره گرفته شده است. شکل ۷ مقدار انرژی گرمایشی مصرفی جابه‌جاشده را به همراه تبادلات انرژی گرمایشی با شبکهٔ اصلی و در سطح محلی نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقدار انرژی گرمایشی جابه‌جاشده به همراه تبادلات انرژی گرمایشی با شبکهٔ اصلی و در سطح محلی

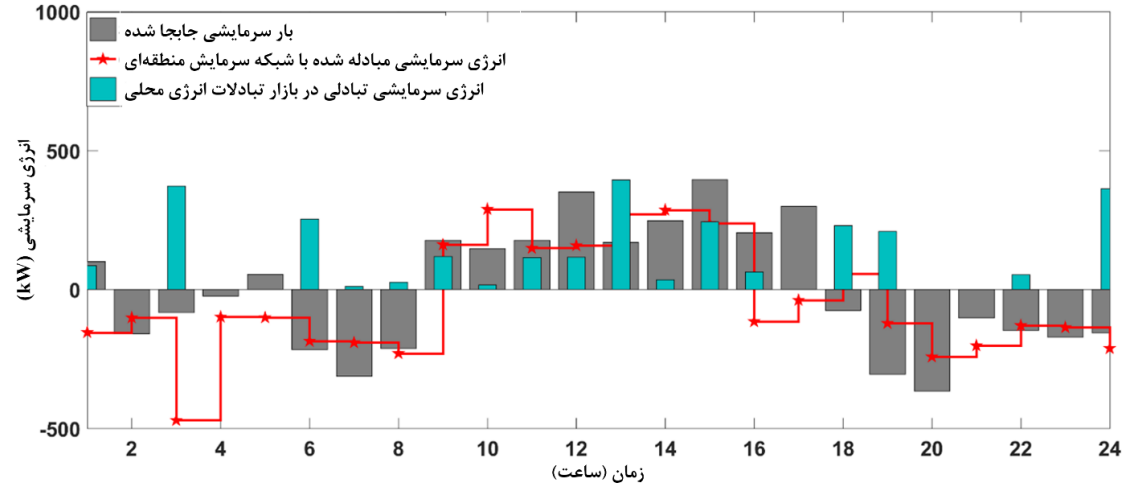
مطابق شکل ۷ ملاحظه می‌شود که بخشی از بار مصرفی در ساعت‌های انتهایی شب جهت تأمین به ساعت‌های دیگر روز که تولید انرژی گرمایشی بیشتر دارند جابه‌جا شده است. در واقع، از برنامهٔ جابه‌جایی بار به عنوان یکی از برنامه‌های پاسخگویی بار برای جابه‌جایی هدفمند بار از ساعت‌ها با تولید انرژی کمتر به ساعت‌ها با تولید انرژی بیشتر استفاده شده است. این در حالی است که ریزشبکه‌ها در ساعت‌های ابتدایی و انتهایی روز بخشی از انرژی گرمایشی خود را از شبکهٔ اصلی خریداری کرده‌اند و به

دلیل تولید انرژی گرمایشی بیشتر در ساعت‌های میانی روز، بخشی از اضافه تولید انرژی گرمایشی را نیز به شبکهٔ اصلی با هدف بیشینه کردن درآمد خود فروخته‌اند. در این راستا، از امکان تبادلات انرژی محلی بر مبنای فناوری انرژی تعاملی نیز در برخی از ساعت‌های روز به‌ویژه ساعت‌های میانی برای برقراری پویای تعادل انرژی گرمایشی بهره گرفته شده است. بخش دیگر مربوط به ساختار به‌هم‌پیوستهٔ شبکه‌های چندحاملی انرژی بخش انرژی سرمایشی است. در این رابطه، شکل ۸ میزان تولید انرژی سرمایشی توسط چیلرهای جذبی و پیستونی را نشان می‌دهد.



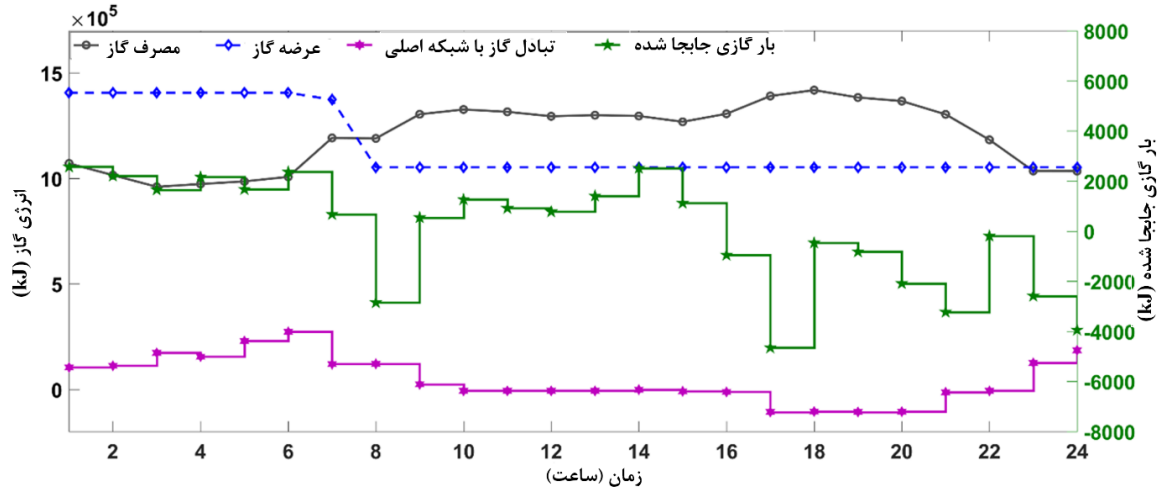
شکل ۸. میزان تولید انرژی سرمایشی توسط چیلرهای جذبی و پیستونی

چیلرهای جذبی و پیستونی به عنوان واحدهای تولیدکنندهٔ انرژی سرمایشی در ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. چیلر جذبی از انرژی گرمایشی برای تولید انرژی سرمایشی استفاده می‌کند. شکل ۸ نشان می‌دهد بیشترین میزان تولید انرژی سرمایشی در ساعت‌های میانی ظهر است، به طوری که سیستم در ساعت‌های فوق بیشترین تولید انرژی گرمایشی را دارد. از طرف دیگر، چیلر پیستونی از انرژی الکتریکی برای تولید انرژی سرمایشی بهره می‌برد. با توجه به نیاز سیستم برای تولید انرژی سرمایشی در ساعت‌های اولیه صبح و ساعت‌های بعد از ظهر، شاهد بیشترین تولید انرژی سرمایشی توسط چیلر پیستونی در ساعت‌های یادشده هستیم. در بخش انرژی سرمایشی نیز مشابه بخش‌های الکتریکی و گرمایشی، از برنامهٔ جابه‌جایی بار به همراه امکان تبادلات انرژی سرمایشی با شبکهٔ اصلی و بین ریزشبکه‌ها در سطح محلی برای مدیریت بهینهٔ انرژی سرمایشی بهره گرفته شده است. شکل ۹ مقدار انرژی سرمایشی جابه‌جا شده را به همراه مقدار انرژی سرمایشی تبادل شده با شبکهٔ اصلی و مبادله‌شده بین ریزشبکه‌ها در سطح محلی را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مقدار انرژی سرمایشی جابه‌جاشده، تبادل‌شده با شبکهٔ اصلی و بین ریزشبکه‌ها در سطح محلی

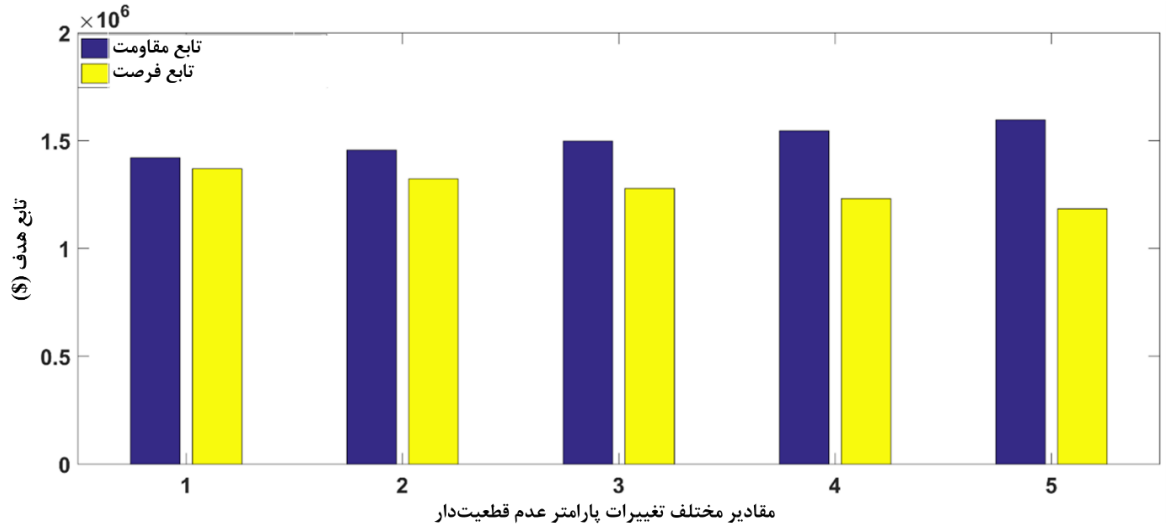
بر اساس شکل ۹ ملاحظه می‌شود که برنامهٔ پاسخگویی بار امکان جابه‌جایی بخشی از بار سرمایشی ساعت‌های ابتدایی و انتهایی روز با میزان تولید انرژی سرمایشی کمتر را به ساعت‌های میانی روز با تولید بیشتر انرژی سرمایشی فراهم کرده است. در این راستا، به دلیل تولید انرژی سرمایشی کمتر در ساعت‌های ابتدایی و انتهایی روز، بخشی از انرژی سرمایشی مورد نیاز برای ساعت‌های فوق از شبکهٔ اصلی خریداری شده است. علاوه بر این، در ساعت‌های ظهر نیز به دلیل تولید مطلوب انرژی سرمایشی، بخشی از اضافه تولید انرژی سرمایشی به شبکهٔ اصلی فروخته شده است. در بخش انرژی سرمایشی نیز از ظرفیت تبادلات انرژی سرمایشی در سطح محلی استفاده شده است. در حقیقت، ریزشبکه‌ها در بیشتر ساعت‌های روز بخشی از انرژی سرمایشی خود را برای تبادل در بازار تبادلات انرژی محلی استفاده کرده‌اند، به طوری که این امر به ریزشبکه‌ها در برقراری تعادل انرژی سرمایشی کمک کرده است. بخش دیگر از شبکهٔ به‌هم‌پیوسته چندحاملی انرژی را شبکهٔ گازی تشکیل می‌دهد. شکل ۱۰ مقدار عرضه و تقاضای گاز را به همراه میزان گاز جابه‌جاشده و تبادلی با شبکهٔ اصلی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. مقدار عرضه و تقاضای گاز به همراه میزان گاز جابه‌جاشده و تبادلی با شبکهٔ اصلی

شکل ۱۰ نشان می‌دهد از ساعت ۱ تا ۸ صبح، به دلیل بیشتر بودن میزان عرضهٔ گاز نسبت به تقاضای آن، بخشی از اضافه تولید گازی به شبکهٔ اصلی فروخته شده است، به طوری که این امر باعث بهبود شرایط اقتصادی برای ریزشبکه‌ها شده است. این در حالی است که از ساعت ۸ صبح به بعد، به دلیل بیشتر بودن میزان مصرف انرژی گازی نسبت به عرضهٔ آن، شاهد تأمین بخشی از انرژی گاز مورد نیاز مصرف‌کنندگان از طریق شبکهٔ اصلی هستیم. در این راستا، از برنامهٔ جابه‌جایی بار در بخش گازی نیز به منظور مدیریت بهتر انرژی گازی بهره گرفته شده است. به بیان دیگر، بخشی از بار مصرفی در ساعت‌های انتهایی روز به ساعت‌های ابتدایی روز با میزان تولید انرژی گازی بیشتر جابه‌جا شده‌اند.

در این تحقیق، با توجه به مجهز شدن ریزشبکه‌ها به ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید سطح بالایی از انرژی پاک، سیستم با میزان قابل توجهی از عدم قطعیت مربوط به این منابع روبه‌رو است. این موضوع ریسک تصمیم‌گیری بهینه را برای تصمیم گیرنده بالا برده است. به بیان دیگر، با توجه به تغییرات مطلوب و نامطلوب مربوط به خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر، نیازمند مدل‌سازی عدم قطعیت‌های یادشده در سیستم برای دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت هستیم. در این مطالعه، از توابع مقاومت و فرصت مربوط به روش IGDT برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بهره گرفته شده است. شکل ۱۱ میزان هزینهٔ کل ریزشبکه‌ها در توابع مقاومت و فرصت را به ازای مقادیر مختلف از تغییرات پارامتر عدم قطعیت‌دار نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. میزان هزینهٔ کل ریزشبکه‌ها در توابع مقاومت و فرصت به ازای مقادیر مختلف از تغییرات پارامتر عدم قطعیت‌دار

با توجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که افزایش بازه تغییرات مربوط به پارامتر عدم قطعیت‌دار در تابع مقاومت باعث افزایش هزینهٔ کل برای ریزشبکه‌ها شده است. به بیان دیگر، هر چه تغییرات نامطلوب مربوط به پارامتر عدم قطعیت‌دار بیشتر باشد، شاهد افزایش چشمگیر در هزینهٔ کل ریزشبکه‌ها خواهیم بود که علت این امر به استفاده بیشتر از سایر منابع تأمین‌کنندهٔ انرژی مانند خرید انرژی از شبکهٔ اصلی یا بهره‌برداری بیشتر از منابع هزینه‌بر مانند سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برمی‌گردد. از طرف دیگر، با افزایش تغییرات مطلوب مربوط به پارامتر عدم قطعیت‌دار شاهد کاهش هزینهٔ کل ریزشبکه‌ها در تابع فرصت هستیم. به بیان دیگر، تابع فرصت حالت خوشبینانه تغییرات مربوط به پارامترهای عدم قطعیت‌دار را در نظر می‌گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

در ساختار شبکه‌های انرژی، میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل فراهم کردن شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی مطلوب روزبه‌روز در حال افزایش است، اما وابسته بودن خروجی این منابع به تغییرات زیست‌محیطی چالش‌های اساسی را به منظور عرضهٔ قابل اطمینان انرژی در حضور آن‌ها ایجاد کرده است. به همین‌منظور، این مقاله یک مدل بهره‌برداری نوینی را برای بهینه‌سازی تعاملات انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه تعاونی توسعه داد. مدل پیشنهادی از راهکارهای مختلف ذخیره‌سازی، تبدیل، تبادلات و مدیریت انرژی به منظور افزایش توانایی ریزشبکه‌ها برای عملکرد منعطف در حضور منابع انرژی تصادفی بهره برد. این مدل از فناوری انرژی تعاملی برای افزایش انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری بهینهٔ ریزشبکه‌ها استفاده کرد، به طوری که تبادلات انرژی به‌صرفه در میان ریزشبکه‌ها در این ساختار فراهم شد. استفاده از فناوری انرژی تعاملی باعث شد تا ریزشبکه‌ها بتوانند در زمان‌هایی با میزان توان تولیدی بالاتر، بخشی از توان اضافی خود را به بازار تبادلات انرژی محلی تزریق کنند و در ساعت‌هایی که با کاهش تولید مواجه بودند، بتوانند همان مقدار انرژی که قبلاً تزریق کرده بودند را دوباره از بازار تبادلات انرژی محلی برای تأمین انرژی مورد نیاز خود دریافت کنند. با توجه به تأثیر انکارناپذیر عدم قطعیت‌ها در دستیابی به نتایج قابل اتکا، از روش ترکیبی IGDT–تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از طریق توسعهٔ استراتژی‌های ریسک‌گریز و ریسک‌پذیر استفاده شد و توابع مقاومت و فرصت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد ریزشبکه‌ها توانستند تعاملات انرژی مختلف را در حضور سطح بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر با کمترین هزینه مدیریت کنند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان داد استفاده از سیستم‌های هیبرید انرژی قابلیت ریزشبکه‌ها در مدیریت بهینهٔ انرژی را به منظور برقراری تعادل انرژی طی شبانه‌روز افزایش داد. علاوه بر این، استفاده از روش ترکیبی مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در مدل پیشنهادی باعث افزایش ۱۹/۱۳ درصدی در هزینه‌های کل ریزشبکه‌ها نسبت به مدل پایه شد که به دلیل مقاوم بودن ریزشبکه‌ها در برابر تغییرات عدم قطعیت‌دار و ریسک‌گریزی ریزشبکه‌ها رخ داده است.

تقدیر و تشکر

از حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری تقدیر و تشکر می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجلهٔ دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

محمدرضا دانشور: مفهوم‌سازی، ارائهٔ ایدهٔ مقاله، تحقیق و کدنویسی، رسم شکل‌ها و نمودارها، مدیریت مقاله، نظارت، تهیهٔ منابع، شبیه‌سازی، استخراج نتایج و تحلیل آن‌ها، اعتبارسنجی، نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله.

امجد انوری مقدم: مشاورهٔ علمی، نظارت بر اجرا، ارزیابی مقاله، بازبینی و اصلاح نهایی.

موسی مرزبند: مشاورهٔ علمی، نظارت بر اجرا، ارزیابی مقاله، بازبینی و اصلاح نهایی.

منابع مالی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

منابع

[1]. M. S. Mastoi and M. Hassan, "Integrating corporate social responsibility and renewable energy adoption: A pathway to sustainable performance in ecologically fragile regions," *Energy Strategy Reviews*, vol. 65, p. 102272, 2026.

[2]. H. Payne, P. Moriarty, A. P. Kani, W. Soong, and K. Peter, "Multi-nodal optimisation of energy storage requirements for 100% renewable energy grid: A South Australian case study," *Energy*, p. 141123, 2026.

[3]. N. Chowdhury, M. Calais, and G. Shafiullah, "Optimization approaches for renewable microgrid applications with hydrogen and battery energy storage–A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 170, p. 122744, 2026.

[4]. P. A. Gbadega, Y. Sun, and O. A. Balogun, "Enhanced multi-objective particle swarm optimization for optimal energy management of grid-connected hybrid renewable microgrids," *e-Prime – Nexus of Electrical, Electronic, and Intelligent Engineering*, vol. 17, p. 201168, 2026/09/01/ 2026.

[5]. H. Masrur, M. Shafie-Khah, M. J. Hossain, and T. Senjyu, "Multi-Energy Microgrids Incorporating EV Integration: Optimal Design and Resilient Operation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 5, pp. 3508-3518, 2022.

[6]. R. Wang *et al.*, "Energy-Management Strategy of Battery Energy Storage Systems in DC Microgrids: A Distributed Dynamic Event-Triggered $ H_ {∞} $ Consensus Control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021.

[7]. S. Córdova, C. A. Cañizares, Á. Lorca, and D. E. Olivares, "Frequency-Constrained Energy Management System for Isolated Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.

[8]. M. Mohammadi, A. Kavousi-Fard, M. Dabbaghjamanesh, A. Farughian, and A. Khosravi, "Effective management of energy internet in renewable hybrid microgrids: A secured data driven resilient architecture," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1896-1904, 2021.

[9]. B. Gu *et al.*, "Optimal Charge/Discharge Scheduling for Batteries in Energy Router-based Microgrids of Prosumers via Peer-to-Peer Trading," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022.

[10]. S. Nikkhah, I. Sarantakos, N.-M. Zografou-Barredo, A. Rabiee, A. Allahham, and D. Giaouris, "A Joint Risk-and Security-Constrained Control Framework for Real-Time Energy Scheduling of Islanded Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 5, pp. 3354-3368, 2022.

[11]. S. M. Azzam, T. Elshabrawy, and M. Ashour, "A Bi-level Framework for Supply and Demand Side Energy Management in an Islanded Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022.

[12]. S. Cai, Y. Xie, Q. Wu, M. Zhang, X. Jin, and Z. Xiang, "Active and Reactive Power Coordinated Two-Stage MG Scheduling for Resilient Distribution Systems under Uncertainties," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.

[13]. E. Abbasian Hamedani, M. Mirrazavi, A. Farhadi, A. Akbari, and H. Yousefi, "Dynamic Exergy Performance Assessment of a 1-MW Wind Power Plant Under Diverse Climatic Conditions," *Journal of Sustainable Energy Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 627-645, 2026.

[14]. E. Abbasian Hamedani, P. Khodaparast, E. Hosseini, T. Mahmudy, and A. Bahrami Yajloo, "A mini-review of energy hub: concept, components, classifications, and applications," *Energy Reports*, vol. 15, p. 108886, 2026/06/01/ 2026.

[15]. E. Abbasian Hamedani, A. Roghani Araghi, A. Hajinezhad, and H. Yousefi, "A scenario-based techno-economic optimization framework for power-to-X residential energy hubs across diverse climate conditions," *Energy*, vol. 356, p. 141155, 2026/08/01/ 2026.

[16]. Á. Navarro-Rodríguez, P. García, C. Gómez-Aleixandre, and C. Blanco, "Cooperative Primary Control of a Hybrid AC/DC Microgrid based on AC/DC Virtual Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022.

[17]. S. Li, J. Zhu, and H. Dong, "A novel energy sharing mechanism for smart microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 6, pp. 5475-5478, 2021.

[18]. Z. Yang, J. Hu, X. Ai, J. Wu, and G. Yang, "Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 4-17, 2020.
[19]. H. Liu and W. Tang, "Dynamic battery degradation-informed optimal microgrid scheduling: A prediction-aware two-stage stochastic programming approach with spatiotemporal correlation scenario generation," *Journal of Energy Storage*, vol. 165, p. 122231, 2026.
[20]. P. Aaslid, M. Korpås, M. M. Belsnes, and O. B. Fosso, "Stochastic optimization of microgrid operation with renewable generation and energy storages," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 3, pp. 1481-1491, 2022.
[21]. Z. Li, L. Wu, Y. Xu, S. Moazeni, and Z. Tang, "Multi-stage real-time operation of a multi-energy microgrid with electrical and thermal energy storage assets: A data-driven MPC-ADP approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 213-226, 2021.
[22]. H. Liang, H. Hua, Y. Qin, M. Ye, S. Zhang, and J. Cao, "Stochastic optimal energy storage management for energy routers via compressive sensing," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 2192-2202, 2021.
[23]. K. Antoniadou-Plytaria, D. Steen, O. Carlson, B. Mohandes, and M. A. F. Ghazvini, "Scenario-based Stochastic Optimization for Energy and Flexibility Dispatch of a Microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.
[24]. H. Mehrjerdi, R. Hemmati, S. Mahdavi, M. Shafie-Khah, and J. P. Catalão, "Multicarrier Microgrid Operation Model Using Stochastic Mixed Integer Linear Programming," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4674-4687, 2021.
[25]. S. M. Sadek, W. A. Omran, M. M. Hassan, and H. E. Talaat, "Data driven stochastic energy management for isolated microgrids based on generative adversarial networks considering reactive power capabilities of distributed energy resources and reactive power costs," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 5397-5411, 2020.
[26]. F. Garcia-Torres, C. Bordons, J. Tobajas, R. Real-Calvo, I. Santiago, and S. Grieu, "Stochastic optimization of microgrids with hybrid energy storage systems for grid flexibility services considering energy forecast uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5537-5547, 2021.
[27]. Z. Zhao *et al.*, "Distributed robust model predictive control-based energy management strategy for islanded multi-microgrids considering uncertainty," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 2107-2120, 2022.
[28]. Y. Cao *et al.*, "Optimal energy management for multi-microgrid under a transactive energy framework with distributionally robust optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 599-612, 2021.
[29]. B. Wang, C. Zhang, C. Li, G. Yang, and Z. Y. Dong, "Transactive Energy Sharing in a Microgrid via an Enhanced Distributed Adaptive Robust Optimization Approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 2279-2293, 2022.
[30]. Y. Zhou, Q. Zhai, and L. Wu, "Optimal operation of regional microgrids with renewable and energy storage: Solution robustness and nonanticipativity against uncertainties," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.
[31]. J. Li, M. E. Khodayar, J. Wang, and B. Zhou, "Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 6, pp. 5172-5184, 2021.
[32]. Z. Chu, N. Zhang, and F. Teng, "Frequency-constrained resilient scheduling of microgrid: a distributionally robust approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 6, pp. 4914-4925, 2021.
[33]. L. Wang, Z. Zhu, C. Jiang, and Z. Li, "Bi-level robust optimization for distribution system with multiple microgrids considering uncertainty distribution locational marginal price," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1104-1117, 2020.
[34]. H. Sun, Z. Gao, W. Szeto, J. Long, and F. Zhao, "A distributionally robust joint chance constrained optimization model for the dynamic network design problem under demand uncertainty," *Networks and Spatial Economics*, vol. 14, no. 3, pp. 409-433, 2014.

[35]. Z.-P. Yuan, J. Xia, and P. Li, "Two-time-scale energy management for microgrids with data-based day-ahead distributionally robust chance-constrained scheduling," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 6, pp. 4778-4787, 2021.
[36]. T. Chen, Y. Song, D. J. Hill, and A. Y. Lam, "Chance-Constrained OPF in Droop-Controlled Microgrids with Power Flow Routers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.
[37]. M. Nazari-Heris, "Optimal energy management of integrated wind and hydrogen storage facilities: A hybrid stochastic-IGDT framework," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 223, p. 154211, 2026.
[38]. E. Zargin and R. M. Asl, "Energy procurement via hybrid IGDT-stochastic approach," in *Robust Energy Procurement of Large Electricity Consumers*: Springer, 2018, pp. 125-143.
[39]. Y. Hu, H. An, Y. Hou, and Q. Zhou, "Optimal Economic Dispatch Strategy for Distribution Networks Considering the Joint Response of Electric Vehicles and Energy Storage," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 3199-3217, 2026.
[40]. M. Daneshvar, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and S. Asadi, "Energy exchange control in multiple microgrids with transactive energy management," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 719-726, 2020.
[41]. J. Qiu, J. Zhao, H. Yang, and Z. Y. Dong, "Optimal scheduling for prosumers in coupled transactive power and gas systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1970-1980, 2017.
[42]. J. Jannati and D. Nazarpour, "Optimal energy management of the smart parking lot under demand response program in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 659-669, 2017.
[43]. M. Daneshvar, B. Mohammadi-Ivatloo, K. Zare, and A. Anvari-Moghaddam, "Risk-aware stochastic scheduling of hybrid integrated energy systems with 100% renewables," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 9314-9324, 2023.
[44]. J. Zheng, J. Chen, Q. Wu, and Z. Jing, "Multi-objective optimization and decision making for power dispatch of a large-scale integrated energy system with distributed DHCs embedded," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 369-379, 2015.
[45]. Y. Chen and M. Hu, "Balancing collective and individual interests in transactive energy management of interconnected micro-grid clusters," *Energy*, vol. 109, pp. 1075-1085, 2016.