



Presenting a Multi-objective Mathematical Model for Smart Grids Considering Load Response Programs

Mohammad Hossein Tahari-Mehrjardi 

Ph.D., Department of Industrial Management, Faculty of Industrial and Technology Management, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: taharihossein@ut.ac.ir

Aliyeh Kazemi * 

*Corresponding Author, Prof., Department of Operations Management and Decision Sciences, Faculty of Industrial and Technology Management, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aliyehkazemi@ut.ac.ir

Hamed Shakouri Ganjavi 

Associate Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Systems Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran. E-mail: h-shakouri@ut.ac.ir

Abstract

Objective

The availability of energy is a vital aspect of a nation's economic and social development, with energy consumption serving as a telling metric of the level of prosperity that can be achieved. However, the conventional systems of electricity production that rely on large, centralized power plants have become inadequate in recent years due to the high expenses of production, air pollution, and poor energy quality. In response to these challenges, smart grids have emerged and offer several advantages. Effective management of electricity demand is critical in the context of smart grids, and the implementation of demand-response techniques plays an instrumental role in achieving this objective. These programs enhance energy consumption patterns during peak load times, resulting in appropriate pricing and grid reliability. There are two distinct categories of load response programs: price-oriented and incentive-oriented. In the scope of this research, we focus on the former, which relies on real-time pricing. Our objective is to develop a multi-objective mathematical model that considers load response programs for smart energy grids.

Methods

The study employs a scenario-based approach and classifies the parameters into two distinct categories: deterministic and non-deterministic. Wind speed, solar radiation, energy demand, and local electricity prices are marked as non-deterministic due to their nature. As each non-deterministic parameter adheres to a specific probability distribution, a scenario is created for

each parameter based on its corresponding distribution. Subsequently, a mathematical multi-objective model is developed that aims to minimize operating costs, reduce pollution emissions, and minimize peak load, along with the related constraints. After collecting the required data, the model is run using the GAMS programming language. In addition, the study evaluates the impact of load response programs on enhancing objective functions.

Results

The study findings demonstrate that the implementation of smart grids, accompanied by active consumer participation in load response programs, can result in a significant reduction in operating costs, pollution emissions, and peak load. Additionally, the study indicates that a higher level of consumer participation in load response programs can enhance the overall effectiveness of the programs. Specifically, the study shows that a 20% increase in consumer participation resulted in a 15%, 17%, and 13% improvement in operating costs, pollution emissions, and peak load reduction, respectively.

Conclusion

Smart grids represent a modern digital solution that streamlines the transfer of electricity between suppliers and consumers in the realm of energy transmission. This advanced system enables the regulation of home appliances, promoting energy conservation and cost-effectiveness, while simultaneously enhancing the reliability of the energy transmission network. Governments may opt to implement smart grids as a strategic solution to address complex issues such as energy independence, global warming, and pollution emissions.

Keywords: Smart grids, Demand response programs, Multi-objective programming.

Citation: Tahari – Mehrjardi, Mohammad Hossein; Kazemi, Aliyeh & Shakouri Ganjavi, Hamed (2024). Presenting a Multi-objective Mathematical Model for Smart Grids Considering Load Response Programs. *Industrial Management Journal*, 16(2), 215-249. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2024, Vol. 16, No 2, pp. 215- 249

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2024.365124.1008082>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: September 13, 2023

Received in revised form: March 17, 2024

Accepted: May 16, 2024

Published online: July 20, 2024





ارائه یک مدل بهینه ریاضی چندهدفه برای شبکه‌های هوشمند انرژی با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

محمدحسین طحاری مهرجردی

دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: taharihossein@ut.ac.ir

عالیه کاظمی*

* نویسنده مسئول، استاد، گروه مدیریت عملیات و علوم تصمیم، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliyehkazemi@ut.ac.ir

حامد شکوری گنجوی

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hshakouri@ut.ac.ir

چکیده

هدف: انرژی یکی از عوامل حیاتی برای توسعه اجتماعی و اقتصادی کشورهاست؛ به طوری که اغلب، میزان مصرف انرژی در یک کشور، نشان‌دهنده سطح رفاهی است که مردم آن کشور می‌توانند به دست آورند. با مصرف روزافزون انرژی در سال‌های اخیر و همچنین با توجه به اینکه در سیستم‌های تولید برق سنتی بیشتر انرژی از طریق نیروگاه‌های بزرگ و به صورت متمرکز تأمین می‌شود، بعضی مسائل از جمله هزینه‌های تولید، آلودگی هوا، قابلیت اطمینان و کیفیت انرژی اهمیت چشمگیری پیدا می‌کنند و برای شبکه‌های تأمین انرژی سنتی، ممکن نیست که چنین نیازهای توسعه‌ای را برآورده کنند. بنابراین شبکه‌های هوشمند تأمین انرژی، به تدریج جایگزین شبکه‌های سنتی شدند. از طرفی، برای نیل به قیمت‌های مناسب و قابلیت اطمینان شبکه، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار راه‌کاری است که می‌توان به کمک آن، الگوی مصرف انرژی الکتریکی را در زمان‌های پیک بار در شبکه هوشمند بهبود داد. این برنامه‌ها به دو دسته برنامه‌های قیمت‌محور و برنامه‌های تشویق‌محور دسته‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از برنامه‌های قیمت‌محور مبتنی بر قیمت‌گذاری لحظه‌ای استفاده می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای شبکه‌های هوشمند انرژی با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است.

روش: پارامترهای این پژوهش به دو دسته پارامترهای غیرقطعی و قطعی دسته‌بندی شده است. پارامترهای سرعت باد، تابش خورشید، تقاضای انرژی و قیمت برق منطقه با توجه به ماهیت آن‌ها، پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای غیرقطعی، از توزیع احتمالی خاصی پیروی می‌کنند، پس از شناسایی توزیع مربوطه، به سناریوسازی برای هر یک از این پارامترها اقدام می‌شود. در نهایت مدل چندهدفه ریاضی که شامل اهداف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری، حداقل‌سازی آلودگی و حداقل‌سازی پیک مصرف و محدودیت‌های مربوطه بود، طراحی می‌شود. پس از جمع‌آوری داده‌ها و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی گمز، مدل حل و تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بهبود توابع هدف نیز بررسی می‌شود.

یافته‌ها: نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که شبکه‌های هوشمند انرژی و مشارکت طرف مصرف‌کننده در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، امکان کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش انتشار آلودگی و کاهش پیک مصرف را میسر می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، توابع هدف بهبود می‌یابند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، با مشارکت ۲۰ درصدی مصرف‌کنندگان، میزان بهبود در اهداف ذکر شده، به‌ترتیب حدود ۱۵، ۱۷ و ۱۳ درصد بود.

نتیجه‌گیری: شبکه‌های هوشمند انرژی با استفاده از فناوری دیجیتال دوطرفه، امکان تبادل اطلاعات بین تولیدکننده و مصرف‌کننده را فراهم می‌آورند و انرژی را از تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان منتقل می‌کنند. همچنین از طریق کنترل وسایل مصرف‌کنندگان، در مصرف انرژی آن‌ها صرفه‌جویی می‌کنند و هزینه‌ها و مسائل زیست‌محیطی شبکه را کاهش می‌دهند. دولت‌ها می‌توانند از شبکه‌های هوشمند انرژی، به‌عنوان راه‌حلی برای مدیریت استقلال انرژی، کاهش گرمایش جهانی و انتشار آلودگی زیست‌محیطی استفاده کنند.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های هوشمند انرژی، برنامه پاسخ‌گویی بار، برنامه‌ریزی چندهدفه.

استناد: طحاری مهرجردی، محمدحسین؛ کاظمی، عالیبه و شکوری گنجوی، حامد (۱۴۰۳). ارائه یک مدل بهینه ریاضی چندهدفه برای شبکه‌های هوشمند انرژی با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار. مدیریت صنعتی، ۱۶(۲)، ۲۱۵-۲۴۹.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2024.365124.1008082>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۶، شماره ۲، صص. ۲۱۵-۲۴۹

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقدمه

انرژی پایه و نیروی محرکه توسعه اجتماعی و اقتصادی کشورهاست و مطالعات و بررسی‌های مختلف به‌طور مستقیم مصرف انرژی را با رشد اقتصادی، فناوری و اجتماعی کشورها مرتبط می‌داند (شن، هو، لیو، یانگ و کانگ^۱، ۲۰۲۲؛ رادسر، کاظمی، مهرگان و رضوی حاج آقا، ۱۴۰۰). تأثیر انرژی محدود به حوزه‌های رفاه، اقتصاد و علم نمی‌شود، بلکه ابعاد سیاسی را نیز شامل شده و باعث ایجاد تضاد منافع در سطح جهانی می‌شود (محمدی، شکوری و کاظمی^۲، ۲۰۲۲).

بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضای انرژی جهان از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ به میزان ۳۳ درصد رشد خواهد کرد. در سال ۲۰۰۷، تقاضای انرژی جهان ۱۴۵ میلیارد مگاوات بوده است و تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۳۵، ۴۹ درصد رشد کند و به ۲۱۸ میلیارد مگاوات برسد (ژاو، وانگ و تیان^۳، ۲۰۲۲). انرژی الکتریکی به‌عنوان یکی از منابع بسیار مهم انرژی، از این قاعده مستثنا نیست و با توجه مصرف رو به رشد بخش‌های مختلف از این انرژی، هر کشوری نیازمند برنامه‌ریزی است تا تعادل بین عرضه و تقاضا حفظ شود. با مصرف روزافزون انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر، بعضی مسائل از جمله هزینه‌های تولید، آلودگی هوا، قابلیت اطمینان و کیفیت انرژی الکتریکی اهمیت شایان توجهی پیدا کرده‌اند (سلطانی‌نژاد فرسنگی، حدائق پرست، مهدی نژاد و شایان‌فر^۴، ۲۰۱۸). در سیستم‌های تولید برق سنتی، بیشتر انرژی از طریق نیروگاه‌های بزرگ و به‌صورت متمرکز تأمین می‌شود. تلفات بسیار الکتریکی، قابلیت اطمینان کم و انتشار حجم عظیم گازهای گلخانه‌ای، از مسائل اصلی نیروگاه‌های متمرکز به‌شمار می‌رود (کریمی، جدید و ماکویی^۵، ۲۰۲۱).

بدین ترتیب شبکه‌های هوشمند^۶ انرژی، به‌تدریج جایگزین شبکه‌های برق سنتی شدند که برای رفع نیازهای انرژی انسان به سوخت‌های فسیلی متکی هستند. در مقایسه با شبکه‌های برق سنتی، شبکه‌های هوشمند، به‌دلیل ویژگی‌های فناوری هوشمند خود برجسته‌اند (هانگ و همکاران^۷، ۲۰۱۹). شبکه‌های هوشمند، راه‌حل مناسبی برای استفاده از منابع انرژی پراکنده^۸ در شبکه‌های برق ارائه می‌کنند و اهداف اصلی آن‌ها کارآمد کردن سیستم قدرت، به حداقل رساندن پیک مصرف برق، به حداقل رساندن هزینه تولید و همچنین استفاده از ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر است (خان، محمود، صفر، خان و خان^۹، ۲۰۱۶). امروزه با وجود نیاز به سرمایه‌گذاری هنگفت برای استقرار شبکه‌های هوشمند انرژی، این شبکه‌ها به‌علت مزایای زیادی همچون توانایی ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود انعطاف‌پذیری شبکه، ممکن ساختن مدیریت پاسخ تقاضا، پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، صرفه‌جویی در هزینه‌های بلندمدت، مزایای زیست محیطی و بهبود کیفیت زندگی توجیه‌پذیر هستند.

با این حال، هم اکنون نوع انرژی تأمین شده به‌وسیله شبکه‌های هوشمند همچنان محدود به انرژی الکتریسیته است و نمی‌توانند به‌طور کامل نیازهای توسعه اجتماعی مدرن را برآورده کنند (هانگ و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین با

1. Shen, Hu, Liu, Yang & Kong
2. Mohammadi, Shakouri & Kazemi
3. Zhao, Wang & Tian
4. SoltaniNejad Farsangi, Hadayeghparast, Mehdinejad & Shayanfar
5. Karimi, Jadid & Makui
6. Smart Grids
7. Hong et al.
8. Distributed energy resources (DERs)
9. Khan, Mahmood, Safdar, Khan & Khan

وجود حضور این شبکه‌ها، ساختار فعلی مصرف انرژی جهان، هنوز به‌شدت به سوخت‌های فسیلی متکی هستند که به آلودگی محیط زیست و کمبود انرژی منجر می‌شود. بنابراین باید به فکر اصلاح سیستم انرژی برای استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر برای رفع مسائل فوق بود. با وجود اینکه ظهور شبکه‌های هوشمند تا حدی مسائل مطرح شده را کاهش داده است، هنوز برای رسیدن به وضعیت مطلوب فاصله زیادی دارد (یانگ، زو، کیائو و چی^۱، ۲۰۲۰).

گسترش تحقیقات دانشگاهی در حوزه شبکه‌های هوشمند انرژی در حال افزایش است؛ اما تحقیقات در حال حاضر بر مفهوم شبکه‌های هوشمند متمرکز شده است و در طراحی بهینه‌سازی برای شبکه‌های هوشمند انرژی بعضی مسائل وجود دارد (چن و همکاران^۲، ۲۰۱۷).

هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای شبکه‌های هوشمند انرژی با در نظر گرفتن برنامه‌های

پاسخ‌گویی بار است. اهداف مدل ریاضی پیشنهادی عبارت‌اند از:

- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه هوشمند انرژی؛
- کاهش انتشار آلودگی شبکه هوشمند انرژی؛
- کاهش پیک مصرف برق در شبکه هوشمند انرژی.

از آنجایی که بعضی از متغیرهای تصمیم، از نوع متغیر عدد صحیح هستند، مدل پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی

خطی عدد صحیح مختلط است که مفروضات آن عبارت‌اند از:

- کلیه تجهیزات شبکه، هوشمند است؛
- شبکه هوشمند انرژی، اولویت را به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌دهد؛
- انرژی مازاد تولید شده برق توسط منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه سراسری برق فروخته می‌شود.
- در صورت کمبود انرژی برق، انرژی مورد نیاز از شبکه سراسری برق خریداری می‌شود.
- خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر در مدل به‌عنوان مقادیر عدم قطعی در نظر گرفته می‌شود.

پیشینه پژوهش

شبکه‌های هوشمند انرژی

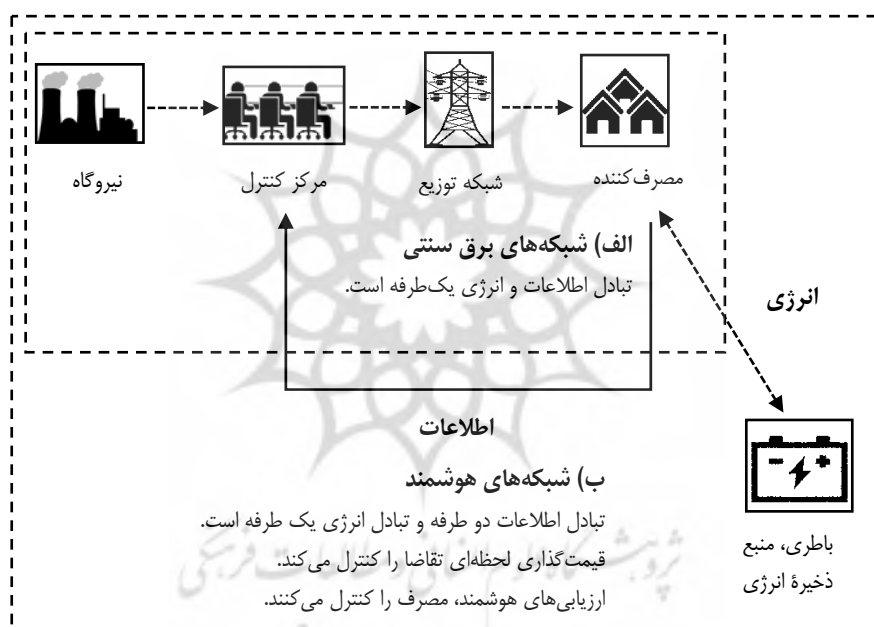
در شبکه‌های سنتی تأمین انرژی برق، تقاضای انرژی در درجه اول توسط منابع انرژی متعارف (سوخت‌های فسیلی) تأمین می‌شود که این امر باعث مسائل زیادی از جمله به هدر رفتن حجم بزرگی از انرژی، در مسیر انتقال و مسائل زیست محیطی را به دنبال دارد. در این زمینه تغییر روش بهره‌برداری و استفاده از انرژی برای دستیابی به آینده‌ای پایدار، امری ضروری است؛ از این رو مفهوم شبکه‌های هوشمند انرژی به‌سرعت گسترش پیدا کرد. شبکه‌های هوشمند، شبکه‌های برق با ولتاژ پایین و در مقیاس کوچک‌اند که مجموعه گسترده‌ای از منابع انرژی پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و بارها را شامل می‌شوند و می‌توانند به‌شیوه‌ای کنترل شده و هماهنگ، برای پاسخ‌گویی مؤثر به تقاضا کار کنند. شبکه‌های هوشمند می‌توانند هم در حالت متصل به شبکه بالادست و هم در حالت جزیره‌ای کار کنند (سرناووکاراسو و

1. Yang, Zhu, Qiao & Chi

2. Chen et al.

همکاران^۱، ۲۰۲۲). شبکه‌های هوشمند به‌طور معمول متصل به شبکه بالادست اصلی کار می‌کنند؛ اما زمانی که برخی اختلال‌ها مانند قطع در شبکه بالادستی رخ می‌دهد، این شبکه از شبکه بالادست جدا می‌شود و به‌طور مستقل عمل می‌کند و در نتیجه، قابلیت اطمینان تأمین انرژی افزایش خواهد یافت (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به شکل ۱، در شبکه‌های برق سنتی^۲ (بخش الف)، نیروگاه، برق را از طریق یک مرکز کنترل و یک شبکه توزیع، به مصرف‌کننده نهایی منتقل می‌کند که در آن انتقال اطلاعات و انرژی یک‌طرفه است. نیروگاه‌های سنتی بر اساس حداکثر انرژی مورد نیاز در ساعات اوج مصرف، انرژی تولید می‌کنند. با ظهور شبکه‌های هوشمند (بخش ب)، از اقدامات هوشمند برای نظارت بر مصرف انرژی کاربران نهایی استفاده شد و مرکز کنترل بر اساس تقاضای مصرف انرژی، قیمت لحظه‌ای^۳ تعیین می‌کند. بر اساس قیمت‌گذاری لحظه‌ای، کاربران نهایی می‌توانند انرژی را در زمانی که قیمت انرژی پایین است، در سیستم‌های ذخیره انرژی^۴ برای استفاده بعدی ذخیره کنند (لین، ویو و لیو، ۲۰۲۱).



شکل ۱. طبقه‌بندی چارچوب‌های مختلف تأمین انرژی

منبع: (لین، ویو و لیو، ۲۰۲۱)

پیشینه تجربی

در این بخش به مرور برخی از تحقیقات در حوزه شبکه‌های هوشمند پرداخته شده است. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) برای بهبود اقتصاد و عملکرد کم کربن شبکه‌های هوشمند انرژی، چند ریزشبکه هوشمند انرژی متصل به هم معرفی و برای بهینه‌سازی آن، از یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی استفاده کردند. آن‌ها مدل ذخیره‌سازی انرژی هیدروژن با ترکیب

1. Thirunavukkarasu et al.
2. Conventional electrical grid
3. Real time pricing (RTP)
4. Battery energy storage system (BESS)
5. Lin, Wu & Liu

هیدروژن به گاز طبیعی و عرضه آن به واحد گاز را توسعه دادند و برای اندازه‌گیری مؤثر منابع و عدم قطعیت‌های بار در شبکه، ارزش در معرض ریسک شرطی^۱ را از طریق هزینه تعامل بین شبکه‌های هوشمند و شبکه توزیع محاسبه کردند. فاطمی، کتابی و منصور^۲ (۲۰۲۳) یک استراتژی چندهدفه چندسطحی تصادفی را برای تسهیل فرایند تسویه بازار برق در میان شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن هزینه‌های عملیاتی و اثرهای زیست‌محیطی واحدهای تولیدی با سوخت فسیلی توسعه دادند. در این پژوهش از روش تصادفی مبتنی بر سناریو^۳ برای مدل‌سازی سناریوهای پارامترهای غیرقطعی استفاده شد.

وانگ و همکاران^۴ (۲۰۲۳) با استفاده از تقریب محدودیت شانس^۵ و برنامه‌ریزی چندهدفه استوار^۶، به بررسی مسئله توزیع بار برای یک شبکه هوشمند مجهز به ژنراتورهای پراکنده کنترل‌پذیر و منابع انرژی تجدیدپذیر ناپایدار پرداختند. یانگ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به کارگیری سازوکار تعرفه زمان استفاده^۷ در کاهش انتشار آلودگی در شبکه هوشمند منطقه‌ای را تحلیل کردند؛ سپس یک مدل برای محاسبه کاهش انتشار شبکه هوشمند منطقه‌ای را با در نظر گرفتن تعرفه زمان استفاده طراحی کردند.

شن و همکاران (۲۰۲۲) مدل بهینه‌سازی چندهدفه برنامه‌ریزی ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی چندگانه را بر اساس برنامه‌های پاسخ‌گویی بار همراه با اهداف به حداقل رساندن هزینه اقتصادی و انتشار کربن توسعه دادند.

ژاو و همکاران (۲۰۲۲) یک سیستم شبکه هوشمند منطقه‌ای را پیشنهاد کردند و نشان دادند که سیستم شبکه هوشمند منطقه‌ای در کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار و عملکرد پایدار شبکه نسبت به سیستم انرژی پراکنده برتری دارد. از الگوریتم جست‌وجوی گنجشک^۸ و روش ضریب اطمینان وزنی^۹ برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد.

لونگ و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۲) برای مطالعه تأثیر توسعه شبکه هوشمند روستایی بر انتشار کربن، یک چارچوب شبکه هوشمند روستایی طراحی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از شبکه هوشمند، انرژی روستایی کم کربن، دیجیتال و هوشمند توسعه خواهد یافت و هدف خنثی‌سازی کربن با ساخت و استفاده از شبکه هوشمند روستایی محقق خواهد شد.

آوان و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از اینترنت و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی بر انتشار دی‌اکسید کربن پرداختند. در این مطالعه از داده‌های ۱۰ کشور طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ و از روش رگرسیون چندکی^{۱۲} برای تحلیل رابطه بین متغیرها استفاده شد.

1. Conditional Value-at-Risk (CVaR)

2. Fatemi, Ketabi & Mansouri

3. Scenario-based stochastic

4. Wang et al.

5. Chance Constraint

6. Robust Optimization

7. Time-of-Use (TOU)

8. Sparrow search algorithm

9. Weighted coefficient method

10. Long et al.

11. Awan et al.

12. Quantile regression

چنگ و همکاران^۱ (۲۰۲۲) یک مدیریت انرژی توزیع شده را با استفاده از مفهوم شبکه هوشمند پیشنهاد دادند که تلاش می‌کند تا هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را حداقل نماید. مدل پیشنهاد شده منابع قابل کنترل مختلف و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی را در نظر گرفته تا بهره‌برداری بهینه از آن‌ها را مشخص کند.

یانگ و همکاران (۲۰۲۱) با در نظر گرفتن داده‌های ۳۰ استان در چین از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ و با استفاده از روش‌های تعمیم‌یافته گشتاورها^۲، مدل آستانه پانل^۳ و تحلیل فضایی^۴، به بررسی تأثیر شبکه هوشمند بر انتشار آلودگی و تخصیص نادرست انرژی پرداختند. نتایج نشان داد که تخصیص نادرست انرژی به‌طور چشمگیری به انتشار کربن کمک می‌کند، در حالی که شبکه هوشمند، انتشار کربن را مهار می‌کند.

لین و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای اشتراک بهینه انرژی مجموعه‌ای از خانه‌ها از طریق شبکه هوشمند با یک چارچوب تبادل انرژی طراحی کردند که توسط آن خانه‌های دارای امکانات انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی باتری می‌توانند به تجارت و اشتراک‌گذاری انرژی بپردازند تا سود کل مجموعه خانه‌ها به حداکثر برسد.

لی و کای^۵ (۲۰۲۰) برای بهبود بازدهی کلی سیستم انرژی، ساختار اساسی شبکه هوشمند برای هماهنگی و بهینه‌سازی «تولید - شبکه - بار - ذخیره‌سازی» طراحی کردند. با در نظر گرفتن حداکثرسازی سود اقتصادی، حداکثرسازی منافع زیست‌محیطی و حداکثرسازی بهره‌وری انرژی به‌عنوان اهداف فرعی، مدل ریاضی تخصیص بهینه چندهدفه و استراتژی عملیات شبکه هوشمند با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعادل عرضه و تقاضا، محدودیت‌های مشخصه تجهیزات و محدودیت‌های حالت عملیات طراحی شده است.

یانگ و همکاران (۲۰۲۰) کاهش انتشار منوکسیدکربن توسط شبکه هوشمند را بررسی کردند. آن‌ها برای نشان دادن کاهش انتشار منوکسیدکربن در شبکه هوشمند منطقه‌ای از روش پویایی سیستم^۶ استفاده کردند. نتایج نشان داد که مجموع کاهش انتشار منوکسیدکربن شبکه هوشمند در سال ۲۰۱۹ به ۵۰۵۶ تن رسیده و میزان کاهش انتشار در سال‌های بعد همچنان رو به افزایش است.

یانگ و همکاران (۲۰۱۹) بر اساس سازوکار کاهش انتشار کربن، یک مدل محاسبه جامع برای کاهش انتشار منوکسیدکربن از شبکه هوشمند طراحی کردند. در نهایت، با در نظر گرفتن منطقه شبکه هوشمند یانکینگ در چین، تخمین زده شد که این مدل می‌تواند انتشار منوکسیدکربن را تا ۱۴/۰۹۳ تن در سال ۲۰۲۵ کاهش دهد.

هانگ و همکاران (۲۰۱۹) یک رویکرد یکپارچه ترکیبی از الگوریتم سیل بزرگ بهبود یافته^۷، استدلال شواهد^۸

1. Cheng et al.
2. Generalized method of moments
3. Panel threshold model
4. Spatial analysis
5. Li & Cai
6. System dynamics
7. Improved great deluge algorithm
8. Evidence reasoning

الگوریتم فاصله^۱ و تحلیل هم‌بستگی خاکستری فازی^۲ برای بهینه‌سازی چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمعیاره شبکه هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت پیشنهاد دادند.

باتوجه به تحقیقات گذشته، نوآوری‌های این پژوهش به شرح زیر است:

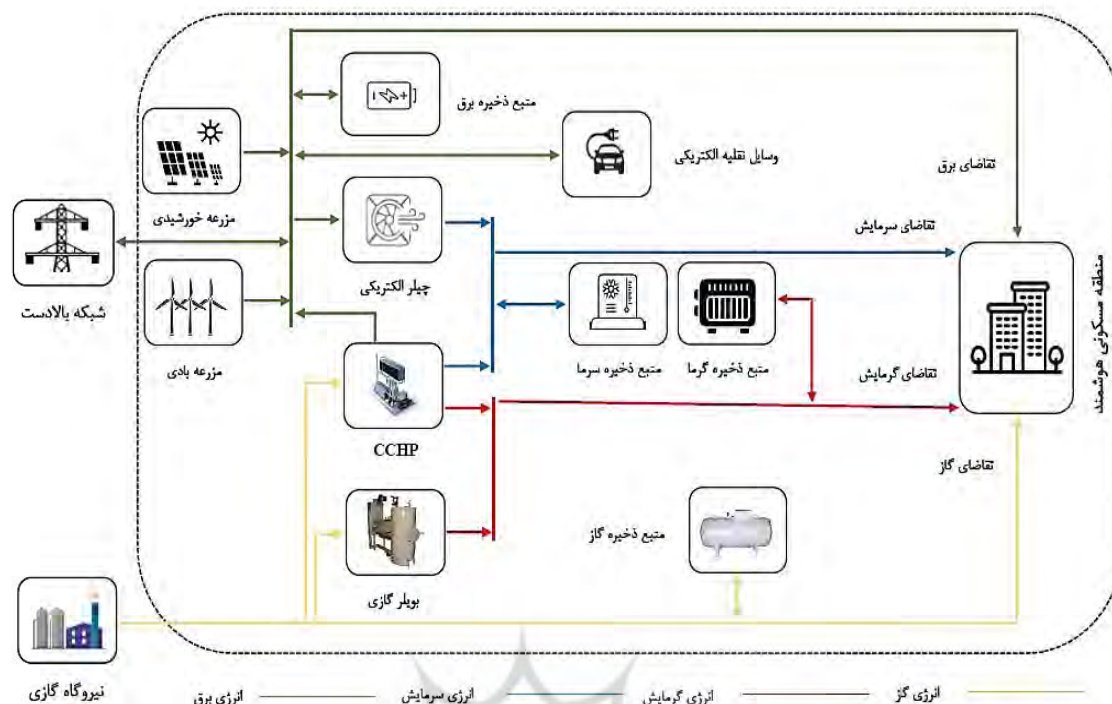
۱. در تحقیقات گذشته مرتبط، کمتر از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استفاده شده و این برنامه‌ها به انرژی الکتریکی محدود بوده است؛ در حالی که در این پژوهش، علاوه بر انرژی الکتریکی، این برنامه‌ها برای سایر اشکال انرژی (سرمایش و گرمایش) نیز مدل‌سازی و اجرا شده است.
۲. در اکثر تحقیقات مرتبط، یک تابع هدف یا دو تابع هدف در نظر گرفته شده و معمولاً از نوع اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش آلودگی بوده است؛ در حالی که در این پژوهش، هدف کاهش پیک مصرف شبکه نیز مورد توجه قرار دارد.

مدل مفهومی

با توجه به مقیاس ساخت^۳، شبکه هوشمند را می‌توان به سطح منطقه‌ای، شهری، ملی و جهانی طبقه‌بندی کرد. سطوح مختلف شبکه هوشمند نقش‌های مختلفی دارند؛ اما شبکه هوشمند سطح منطقه‌ای^۴، اساسی‌ترین معماری سیستم شبکه هوشمند است. همه ساکنان محلی را به‌عنوان گروه‌های کاربر در نظر می‌گیرد، از تجزیه و تحلیل داده‌ها برای تأمین نیازهای انرژی کاربران محلی استفاده می‌کند و زمینه و بستری برای توسعه شبکه هوشمند فراهم می‌کند (یانگ، ژانگ و یی^۵، ۲۰۲۱). در این پژوهش، شبیه‌سازی هوشمند ساده از یک شبکه هوشمند منطقه‌ای در شهر تهران صورت می‌گیرد. ساختار اساسی و جریان انرژی شبکه هوشمند منطقه‌ای اولیه در شکل ۲ نشان داده شده است. منطقه مسکونی هوشمند این پژوهش شامل موارد زیر است:

۱. واحدهای تأمین انرژی (مزرعه خورشیدی، مزرعه بادی، شبکه بالادست سراسری برق و گاز طبیعی)؛
 ۲. تجهیزات انتقال انرژی (خطوط لوله سرمایش، گرمایش، برق و گاز طبیعی)؛
 ۳. تجهیزات تبدیل انرژی (چیلرهای الکتریکی، بویلر گازی و سیستم CCHP)؛
 ۴. تجهیزات ذخیره انرژی (ذخیره انرژی الکتریکی از باتری، ذخیره انرژی حرارتی از تانک آب گرم، ذخیره انرژی سرمایش از تانک آب سرد، ذخیره گاز از LPG و وسیله نقلیه الکتریکی از باتری برای شارژ و دشارژ استفاده می‌کنند)؛
 ۵. تقاضای انرژی (الکتریکی، گرمایش، سرمایش و گاز)
- هدف این شبکه تأمین انواع انرژی‌های برق، گرمایش، سرمایش و گاز مناطق مسکونی ضمن حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری، حداقل‌سازی انتشار آلودگی و حداقل‌سازی پیک مصرف شبکه است.

1. Interval algorithm
2. Fuzzy grey correlation analysis
3. Construction Scale
4. Regional energy internet
5. Yunna, Zhang & Yi
6. Combined Cooling, Heat and Power



شکل ۲. نمایی از یک شبکه هوشمند منطقه‌ای

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش یک پژوهش توسعه‌ای/کاربردی است. از طرفی بر اساس روش گردآوری داده‌ها، پژوهش توصیفی و از نوع مطالعه موردی است. مراحل اجرای پژوهش حاضر به صورت زیر است:

- مرحله ۱. پارامترهای مدل ریاضی پژوهش به دو دسته پارامترهای قطعی و غیر قطعی تقسیم شدند. پارامترهای سرعت باد، تابش خورشید، تقاضای انرژی و قیمت برق منطقه با توجه به ماهیت آن‌ها به عنوان پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شدند و مقادیر آن‌ها از منابع اطلاعاتی استخراج شد.
- مرحله ۲. با توجه به وضعیت در دسترس بودن داده‌های غیرقطعی، سه نوع عدم قطعیت شامل ۱. تصادفی، ۲. معرفتی و ۳. عدم قطعیت عمیق وجود دارد. در عدم قطعیت تصادفی، بر خلاف دو نوع دیگر، داده‌های کافی برای تخمین توزیع احتمال وجود دارد. با توجه به این که در این پژوهش داده‌های کافی تاریخی در مورد پارامترهای غیرقطعی (باد، خورشید، تقاضا و قیمت) وجود دارد و هر یک از پارامترهای غیرقطعی از توزیع احتمالی خاص پیروی می‌کنند، توزیع مربوطه شناسایی و اقدام به سناریوسازی برای هر یک از این پارامترها شد. با توجه به تحقیقات گذشته توزیع احتمالی سرعت باد، توزیع وایبل^۱ (منعمی بیدگلی، کریمی، جدید و انواری مقدم^۲، ۲۰۲۱)؛ توزیع احتمالی شدت تابش خورشید، توزیع بتا^۳ (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱) و توزیع

1. Weibull Distribution

2. Monemi Bidgoli, Karimi, Jadid & Anvari-Moghaddam

3. Beta Distribution

احتمالی تقاضای انرژی و قیمت برق، توزیع نرمال^۱ در نظر گرفته شد (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ منعیمی و همکاران، ۲۰۲۱).

- مرحله ۳. در فضای پیوسته مربوط به هر پارامتر غیرقطعی تعداد بینهایت سناریو وجود دارد. در این پژوهش فضای پیوسته برای هر پارامتر به هفت قسمت مساوی تقسیم شد. بنابراین در یک ساعت مشخص با توجه به اینکه ۴ پارامتر غیر قطعی داریم تعداد ۲۴۰۱ (۷ به توان ۴) سناریو وجود دارد. نماینده هر قسمت (میان‌ه) و احتمال مربوط به آن قسمت استخراج شد. با توجه به اینکه محاسبه این تعداد سناریو زمانبر و پیچیدگی خاص خود را دارد (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۸)، برای اینکه اثر همه سناریوها اعمال شود، از رویکرد ارزش مورد انتظار استفاده شد (کریمی و همکاران، ۲۰۲۳).
- مرحله ۴. مدل ریاضی چندهدفه و محدودیت‌های مربوط برای شبکه هوشمند طراحی می‌شود و با جمع‌آوری داده‌های پارامترهای قطعی مدل از منابع اطلاعاتی مرتبط و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی گمز^۲ اقدام به حل مدل می‌شود.
- مرحله ۵. متغیرهای بهینه از برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته شبکه هوشمند استخراج می‌شود و در کنار آن تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بهبود توابع هدف نیز بررسی می‌شود.

تعریف پارامترها و متغیرهای مدل

در این بخش به تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل مطابق با جداول ۱، ۲ و ۳ پرداخته می‌شود.

جدول ۱. توضیح اندیس‌ها

اندیس	توضیحات
$t = 1, 2, \dots, 24$	واحد زمان بر حسب ساعت
$s = 1, 2, \dots, S$	سناریو S ام

جدول ۲. توضیح پارامترها

پارامترها	توضیحات
$Price_{Buy,Grid}^t$	قیمت خرید برق از شبکه سراسری برق در زمان t (دلار/کیلووات)
$Price_{Sell,Grid}^t$	قیمت فروش برق به شبکه سراسری در زمان t (دلار/کیلووات)
ρ_s	احتمال سناریو S (درصد)
$C_{MC,WT}$	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه بادی (دلار/کیلووات)
$C_{MC,PV}$	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه خورشیدی (دلار/کیلووات)

1. Normal Distribution
2. GAMS

پارامترها	توضیحات
$C_{MC,CCHP}$	هزینه تعمیرات و نگهداری واحد CCHP (دلار/کیلووات)
$C_{MC,GB}$	هزینه تعمیرات و نگهداری بویلر گازی (دلار/کیلووات)
$Price_{Gas}^t$	قیمت خرید هر واحد گاز طبیعی در زمان t (دلار/مترمکعب)
$C_{MC,EES}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره الکتریکی (دلار/کیلووات)
$C_{MC,CS}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره سرمایه (دلار/کیلووات)
$C_{MC,TS}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره گرمایش (دلار/کیلووات)
$C_{MC,GES}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره گاز (دلار/مترمکعب)
$C_{MC,EC}$	هزینه تعمیرات و نگهداری چیلر الکتریکی (دلار/کیلووات)
$\beta_{Grid,e}$	ضریب انتشار آلودگی برای تبادل انرژی برق با شبکه سراسری برق (کیلوگرم/کیلووات)
β_{CCHP}	ضریب انتشار آلودگی برای واحد CCHP (کیلوگرم/کیلووات)
$\beta_{GB,e}$	ضریب انتشار آلودگی برای بویلر گازی (کیلوگرم/کیلووات)
$p_{Buy.Grid}^{max} / p_{Sell.Grid}^{max}$	حداکثر تبادل خرید/فروش انرژی برق با شبکه سراسری برق در زمان t (کیلووات)
$v_{t,s}^w$	سرعت باد در زمان t تحت سناریو s (متر/ثانیه)
v_{cutin}	سرعت قطع بالای باد (متر/ثانیه)
v_{rated}	متوسط سرعت باد (متر/ثانیه)
v_{cutout}	سرعت قطع پایین باد (متر/ثانیه)
p_{WT}^{rated}	تولید اسمی نیروگاه بادی (کیلووات)
η^{PV}	بازدهی نیروگاه خورشیدی (درصد)
A^{PV}	مساحت پنل خورشیدی (مترمربع)
$R_{t,s}$	میزان تابش خورشید در زمان t تحت سناریو s (کیلووات/مترمربع)
T_t	دمای محیط در زمان t
LHV	مقدار حرارتی پایین گاز طبیعی (کیلووات)
η_{CCHP}^E	بازدهی الکتریکی واحد CCHP (درصد)
η_{CCHP}^C	بازدهی سرمایه واحد CCHP (درصد)
η_{CCHP}^T	بازدهی گرمایش واحد CCHP (درصد)
$Max_{G_{CCHP}}^t$	حداکثر گاز مصرفی به وسیله واحد CCHP در زمان t (مترمکعب)
p_{EC}^{max}	حداکثر برق ورودی چیلر الکتریکی در زمان t (کیلووات)
COP_{EC}	ضریب عملکرد چیلر الکتریکی
p_{GB}^{max}	حداکثر تولید گرمایش به وسیله بویلر گازی در زمان t (کیلووات)

پارامترها	توضیحات
η_{GB}	بازدهی بویلر گازی (درصد)
$\eta_{EV,ch}/\eta_{EV,disch}$	نرخ کارایی شارژ/ دشارژ وسیله نقلیه الکتریکی (درصد)
$P_{EV,ch}/P_{EV,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/ دشارژ وسیله نقلیه الکتریکی (کیلووات)
$SoC_{EV}^{min}/SoC_{EV}^{max}$	حداکثر / حداقل سطح انرژی ذخیره شده وسیله نقلیه الکتریکی (کیلووات)
$AD_{EV,tr}^t$	مسافت طی شده به وسیله وسیله نقلیه الکتریکی در زمان t (کیلومتر)
η_{EV}	مقدار برق مصرفی وسیله نقلیه الکتریکی در هر کیلومتر (کیلووات)
$\eta_{EES,ch}/\eta_{EES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/ دشارژ باتری ذخیره الکتریکی (درصد)
$P_{EES,ch}/P_{EES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/ دشارژ باتری ذخیره الکتریکی (کیلووات)
$SoC_{EES}^{min}/SoC_{EES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده الکتریکی (کیلووات)
$\eta_{TES,ch}/\eta_{TES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره گرمایش (درصد)
$P_{TES,ch}/P_{TES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره گرمایش (کیلووات)
$SoC_{TES}^{min}/SoC_{TES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده گرمایش (کیلووات)
$\eta_{CES,ch}/\eta_{CES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره سرمایه‌گذاری (درصد)
$P_{CES,ch}/P_{CES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره سرمایه‌گذاری (کیلووات)
$SoC_{CES}^{min}/SoC_{CES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده سرمایه‌گذاری (کیلووات)
$\eta_{GES,ch}/\eta_{GES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره گاز (درصد)
$P_{GES,ch}/P_{GES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/ دشارژ منبع ذخیره گاز (کیلووات)
$SoC_{GES}^{min}/SoC_{GES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده گاز (کیلووات)
MR_{up}^E/MR_{down}^E	نرخ حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی الکتریکی ناشی از برنامه‌های پاسخ‌گویی (درصد)
MR_{up}^T/MR_{down}^T	نرخ حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه‌های پاسخ‌گویی (درصد)
MR_{up}^C/MR_{down}^C	نرخ حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری ناشی از برنامه‌های پاسخ‌گویی (درصد)
$D_{load,E}^t$	مقدار تقاضای انرژی الکتریکی در زمان t (کیلووات)
$D_{load,T}^t$	مقدار تقاضای انرژی گرمایش در زمان t (کیلووات)
$D_{load,C}^t$	مقدار تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری در زمان t (کیلووات)
$D_{load,G}^t$	مقدار تقاضای انرژی گاز در زمان t (مترمکعب)
$AD_{load,E}$	میانگین مقدار تقاضای انرژی الکتریکی در کل دوره (کیلووات)

جدول ۳. توضیح متغیرها

متغیرها	توضیحات
$C_{Grid,t}$	هزینه تبادل انرژی برق با شبکه بالادست در زمان t (دلار/کیلووات)
$P_{Buy,Grid}^t$	مقدار انرژی برق خریداری شده از شبکه سراسری برق در زمان t (کیلووات)
$P_{Sell,Grid}^t$	مقدار انرژی برق فروخته شده به شبکه سراسری برق در زمان t (کیلووات)
$C_{WT,t}$	هزینه کل نیروگاه بادی در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{PV,t}$	هزینه کل نیروگاه خورشیدی در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{CCHP,t}$	هزینه کل واحد تولید هم‌زمان برق، گرمایش و سرمایش در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{GB,t}$	هزینه کل بویلر گازی در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{EES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره الکتریکی در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{TES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره گرمایش در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{CES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره سرمایش در زمان t (دلار/کیلووات)
$C_{GES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره گاز در زمان t (دلار/مترمکعب)
$C_{EC,t}$	هزینه کل چیلر الکتریکی در زمان t (دلار/کیلووات)
$P_{WT,s}^t$	مقدار انرژی تولید شده نیروگاه بادی در زمان t تحت سناریو s (کیلووات)
$P_{PV,s}^t$	مقدار انرژی تولید شده نیروگاه خورشیدی در زمان t تحت سناریو s (کیلووات)
G_{CCHP}^t	مقدار گاز مصرف شده CCHP در زمان t (مترمکعب)
P_{ECCHP}^t	مقدار انرژی الکتریکی تولید شده واحد CCHP در زمان t (کیلووات)
P_{CCCHP}^t	مقدار انرژی سرمایش تولید شده واحد CCHP در زمان t (کیلووات)
P_{TCCHP}^t	مقدار انرژی گرمایش تولید شده واحد CCHP در زمان t (کیلووات)
P_{EC}^t	مقدار انرژی سرمایش تولید شده توسط چیلر الکتریکی در زمان t (کیلووات)
$P_{POWER,EC}^t$	مقدار برق مصرفی توسط چیلر الکتریکی در زمان t (کیلووات)
P_{GB}^t	مقدار انرژی گرمایش تولید شده توسط بویلر گازی در زمان t (کیلووات)
G_{GB}^t	مقدار گاز مصرفی توسط بویلر گازی در زمان t (مترمکعب)
G_{Buy}^t	مقدار خرید گاز توسط در زمان t (مترمکعب)
$P_{EES,ch}^t/P_{EES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دشارژ شده در سیستم ذخیره الکتریکی در زمان t (کیلووات)
$P_{TES,ch}^t/P_{TES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دشارژ شده در سیستم ذخیره گرمایش در زمان t (کیلووات)
$P_{CES,ch}^t/P_{CES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دشارژ شده در سیستم ذخیره سرمایش در زمان t (کیلووات)
$P_{GES,ch}^t/P_{GES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دشارژ شده در سیستم ذخیره گاز در زمان t (مترمکعب)
E_{Grid}^t	میزان انتشار آلودگی ناشی از تبادل انرژی با شبکه در زمان t (کیلوگرم/کیلووات)
E_{CCHP}^t	میزان انتشار آلودگی واحد CCHP در زمان t (کیلوگرم/کیلووات)

متغیرها	توضیحات
$C_{Grid,t}$	هزینه تبادل انرژی برق با شبکه بالادست در زمان t (دلار/کیلووات)
$P_{Buy,Grid}^t$	مقدار انرژی برق خریداری شده از شبکه سراسری برق در زمان t (کیلووات)
E_{GB}^t	میزان انتشار آلودگی بویلر گازی در زمان t (کیلوگرم/کیلووات)
$SoC_{EV,t}$	سطح انرژی ذخیره شده الکتریکی در وسیله نقلیه الکتریکی در زمان t (کیلووات)
$P_{EV,ch}^t/P_{EV,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دشارژ شده در وسیله نقلیه الکتریکی در زمان t (کیلووات)
$X_{EV,ch}^t/X_{EV,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دشارژ باتری ذخیره الکتریکی وسیله نقلیه الکتریکی در زمان t زمانی که باتری شارژ/دشارژ می‌شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.
$SoC_{EES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده الکتریکی در باتری در زمان t (کیلووات)
$X_{EES,ch}^t/X_{EES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دشارژ باتری ذخیره الکتریکی در باتری در زمان t
$SoC_{TES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده گرمایش در منبع ذخیره در زمان t (کیلووات)
$X_{TES,ch}^t/X_{TES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دشارژ باتری ذخیره گرمایش در منبع در زمان t
$SoC_{CES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده سرمایش در منبع (کیلووات)
$X_{CES,ch}^t/X_{CES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دشارژ منبع ذخیره سرمایش در زمان t
$SoC_{GES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده گاز در منبع ذخیره در زمان t (کیلووات)
$X_{GES,ch}^t/X_{GES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دشارژ منبع ذخیره گاز در زمان t
$D_{Load,E,up}^t$	میزان افزایش تقاضای انرژی الکتریکی ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$D_{Load,E,down}^t$	میزان کاهش تقاضای انرژی الکتریکی ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$I_{Load,E,up}^t/I_{Load,E,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای الکتریکی در زمان t
$D_{Load,T,up}^t$	میزان افزایش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$D_{Load,T,down}^t$	میزان کاهش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$I_{Load,T,up}^t/I_{Load,T,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای انرژی گرمایش در زمان t
$D_{Load,C,up}^t$	میزان افزایش تقاضای انرژی سرمایش ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$D_{Load,E,DR}^t$	میزان تقاضای انرژی الکتریکی بعد از اعمال برنامه پاسخ‌گویی در زمان t (کیلووات)
$D_{Load,C,down}^t$	میزان کاهش تقاضای انرژی سرمایش ناشی از برنامه پاسخ‌گویی بار در زمان t (کیلووات)
$I_{Load,C,up}^t/I_{Load,C,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای سرمایش در زمان t

توابع هدف

حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری شبکه هوشمند

هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تبادل انرژی با شبکه سراسری برق، هزینه‌های مصرف سوخت (گاز) و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری است. برای واحد CCHP هزینه‌های مصرف گاز و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در نظر گرفته

می‌شود و برای واحد بویلر گازی (GB) هزینه تعمیر و نگهداری و مصرف گاز و برای واحدهای نیروگاه بادی (WT)، نیروگاه خورشیدی (PV)، چیلر الکتریکی (EC)، منبع ذخیره برق (EES)، منبع ذخیره سرمایه‌گذاری (CES)، منبع ذخیره گرمایش (TES) و منبع ذخیره گاز (GES) هزینه‌های تعمیرات و نگهداری لحاظ می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳).

$$\text{Min}(z_1) = \sum_t (C_{Grid,t} + C_{WT,t} + C_{PV,t} + C_{CCHP,t} + C_{GB,t} + C_{EES,t} + C_{TES,t} + C_{CES,t} + C_{GES,t} + C_{EC,t}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$C_{Grid,t} = (Price_{Buy.Grid}^t \times P_{Buy.Grid}^t) - (Price_{Sell.Grid}^t \times P_{Sell.Grid}^t) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$C_{WT,t} = \sum_{s=1}^S \rho_s \times (C_{MC,WT} \times P_{WT,s}^t) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$C_{PV,t} = \sum_{s=1}^S \rho_s \times (C_{MC,PV} \times P_{PV,s}^t) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$C_{CCHP,t} = (G_{CCHP}^t \times Price_{Gas}^t) + ((P_{ECCHP}^t + P_{CCCHP}^t + P_{TCCHP}^t) \times C_{MC,CCHP}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C_{GB,t} = P_{GB}^t \times (C_{MC,GB} + Price_{Gas}^t) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$C_{EES,t} = C_{MC,EES} \times (P_{EES,ch}^t + P_{EES,disch}^t) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$C_{TES,t} = C_{MC,TES} \times (P_{TES,ch}^t + P_{TES,disch}^t) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$C_{CES,t} = C_{MC,CES} \times (P_{CES,ch}^t + P_{CES,disch}^t) \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$C_{GES,t} = C_{MC,GES} \times (P_{GES,ch}^t + P_{GES,disch}^t) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$C_{EC,t} = C_{MC,EC} \times P_{EC}^t \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

حداقل‌سازی انتشار آلودگی

اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن است که تقریباً در همه تجهیزاتی که از سوخت فسیلی استفاده می‌کنند، ایجاد می‌شود (پارسیان و رضائی، ۱۳۹۸). با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از آلودگی تجهیزات شبکه هوشمند، شامل انتشار

دی‌اکسیدکربن است، بنابراین در این پژوهش این نوع آلودگی در نظر گرفته شده است. این آلودگی توسط سه جزء از شبکه هوشمند در نظر گرفته می‌شود. یکی بر اساس میزان تبادلات انرژی با شبکه سراسری برق و واحد CCHP و واحد بویلر که از گاز طبیعی برای تولید انرژی استفاده می‌کنند (مکرمیان، شایقی، صداقتی و صفری^۱، ۲۰۲۱؛ آقاجانی و همکاران^۲، ۲۰۱۷).

$$\text{Min}(z_2) = \sum_t E_{Grid}^t + E_{CCHP}^t + E_{GB}^t \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$E_{Grid}^t = P_{Buy,Grid}^t \times \beta_{Grid,e} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$E_{CCHP}^t = P_{CCHP}^t \times \beta_{CCHP,e} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$E_{GB}^t = P_{GB}^t \times \beta_{GB,e} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

حداقل‌سازی پیک مصرف

یکی از مسائل اصلی تأمین برق، عدم جوابگویی منابع تأمین انرژی در زمان پیک مصرف است؛ از این رو به‌منظور کاهش اوج مصرف و مدیریت بار شبکه، تابع هدف حداقل‌سازی پیک مصرف برای برنامه‌ریزی مصرف در شبکه هوشمند پیشنهاد می‌شود که ضمن مدیریت و کاهش بار، هزینه‌های دوره‌های مختلف را کاهش و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد. ساعاتی در هر شبانه‌روز، دارای بیشترین مصرف انرژی الکتریکی است که به آن ساعات اوج بار گفته می‌شود. پیک‌سای^۳ کاهش پیک بار شبکه را دنبال می‌کند؛ به‌طوری‌که ظرفیت چرخان^۴ (تفاضل توان قابل تولید و توان تولید شده واحدهای در مدار در زمان پیک) در شبکه افزایش بیابد و نیاز به احداث نیروگاه‌ها و منابع تأمین انرژی جدید کاهش پیدا کند. در این پژوهش هدف حداقل‌سازی پیک مصرف از طریق مجموع قدرمطلق تفاضل تقاضای بار ناشی از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی ($D_{load,E,DR}^t$) با میانگین تقاضای بار ناشی از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی در طول کل دوره مطالعه ($AD_{load,E,DR}$) به‌دست می‌آید (کریمی و همکاران، ۲۰۱۹).

$$\text{Min}(z_3) = \sum_t |D_{load,E,DR}^t - AD_{load,E,DR}| \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$AD_{load,E,DR} = \frac{1}{24} \sum_t D_{load,E,DR}^t \quad \text{رابطه ۱۷}$$

1. Mokaramian, Shayeghi, Sedaghati & Safari
 2. Aghajani, Shayanfar & Shayeghi
 3. Peak clipping
 4. Spinning reserve

محدودیت های تعادل نیروهای برق، گرمایش، سرمایش و گاز

این قسمت مربوط به محدودیت های تعادل کلی انرژی های برق، گرمایش، سرمایش و گاز بین دو طرف تقاضا کننده و عرضه کننده است (بهمنی، کریمی و جدید^۱، ۲۰۲۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳). برای مثال در محدودیت تعادل برق، در یک ساعت معین مقدار تولید و تأمین برق که از طریق خرید از شبکه بالادست، نیروگاه خورشیدی، نیروگاه بادی، دشارژ باتری، دشارژ وسیله نقلیه و تولید برقی که به وسیله واحد CCHP صورت می گیرد با مقدار مصرف برق توسط مصرف کننده، شارژ باتری، شارژ وسیله نقلیه، مصرف برق چیلر و مقدار فروش برق به شبکه بالادست برابر باشد.

$$(D_{load,E}^t + P_{EES,ch}^t + P_{EV,ch}^t + P_{Sell.Grid}^t + P_{EC}^t) - (P_{Buy.Grid}^t + P_{PV}^t + P_{WT}^t + P_{EV,disch}^t + P_{ECCHP}^t + P_{EES,dis}^t) = 0 \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$(D_{load,T}^t + P_{TES,ch}^t) - (P_{TCCHP}^t + P_{TES,dis}^t + P_{GB}^t) = 0 \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$(D_{load,C}^t + P_{CES,ch}^t) - (P_{CCCHP}^t + P_{CES,dis}^t + P_{EC}^t) = 0 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$(D_{load,G}^t + P_{GES,ch}^t + G_{GB}^t) - (G_{Buy}^t + P_{GES,dis}^t) = 0 \quad \text{رابطه ۲۱}$$

محدودیت تبادل انرژی با شبکه سراسری برق

محدودیت های زیر مربوط به حد بالای خرید ($P_{Buy.Grid}^{max}$) و حد بالای فروش ($P_{Sell.Grid}^{max}$) مقدار تبادل انرژی برق (خرید و فروش برق) با شبکه سراسری برق در زمان t است (لیو و همکاران، ۲۰۲۳).

$$0 \leq P_{Buy.Grid}^t \leq P_{Buy.Grid}^{max} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$0 \leq P_{Sell.Grid}^t \leq P_{Sell.Grid}^{max} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

محدودیت نیروگاه بادی (WT)

مقدار خروجی انرژی توسط نیروگاه بادی در زمان t تحت سناریو s ($P_{WT,i,s}^t$) به سرعت باد در زمان t تحت سناریو s ($v_{t,s}^w$)، سرعت قطع پایین باد^۲ (v_{cutin})، سرعت قطع بالای باد^۳ (v_{cutout}) و مقدار متوسط سرعت باد^۴ (v_{rated}) بستگی دارد (اقبال، حکیمی، حسنخانی، درخشان و عبدی^۵، ۲۰۲۲).

1. Bahmani, Karimi & Jadid

۲. مقدار سرعتی که از آن سرعت به بعد توربین بادی شروع به تولید برق می کند.

۳. مقدار سرعتی که از آن سرعت به بعد، برای حفاظت سلامت توربین و جلوگیری از واژگونی آن حرکت توربین بادی متوقف می شود.

۴. چنانچه با آن سرعت، باد به توربین بوزد معادل توان اسمی توربین برق تولید می شود.

5. Eghbali, Hakimi, Hasankhani, Derakhshan & Abdi

$$P_{WT,s}^t = \begin{cases} 0 & v_{t,s}^w < v_{cutin} \\ P_{WT}^{rated} \times \left(\frac{v_{t,s}^w - v_{cutin}}{v_{rated} - v_{cutin}} \right)^3 & v_{cutin} < v_{t,s}^w < v_{rated} \\ P_{WT}^{rated} & v_{rated} < v_{t,s}^w < v_{cutout} \\ 0 & v_{cutout} < v_{t,s}^w \end{cases} \quad \text{رابطه ۲۴}$$

محدودیت نیروگاه خورشیدی (PV)

مقدار خروجی انرژی توسط نیروگاه خورشیدی در زمان t تحت سناریو s ($P_{PV,s}^t$) با بازدهی نیروگاه خورشیدی (η^{PV})، مساحت پنل خورشیدی (A^{PV})، تابش خورشید در زمان t تحت سناریو s ($R_{t,s}$) و دمای محیط در زمان t (T_t) مرتبط است (اقبالی و همکاران، ۲۰۲۲).

$$P_{PV,s}^t = \eta^{PV} A^{PV} R_{t,s} (1 - 0.0048(T_t - 25)) \quad \text{رابطه ۲۵}$$

محدودیت‌های سیستم تولید هم‌زمان برق، گرمایش و سرمایش (CCHP)

سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرمایش از سوخت گاز برای تولید انرژی استفاده می‌کند. محدودیت‌های مربوط به مقدار خروجی الکتریکی (P_{ECCHP}^t)، سرمایش (P_{CCCHP}^t) و گرمایش (P_{TCCHP}^t) از این سیستم به صورت معادلات زیر است. برای مثال مقدار خروجی الکتریکی واحد CCHP به مقدار گاز طبیعی مصرف شده (G_{CCHP}^t)، ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی^۱ (LHV) و بازدهی الکتریکی (η_{CCHP}^E) آن واحد بستگی دارد. همچنین رابطه‌های ۲۷ و ۲۸ مربوط به سایر خروجی‌ها است و رابطه ۲۹ ظرفیت گاز ورودی را نشان می‌دهد (منعمی و همکاران، ۲۰۲۱).

$$P_{ECCHP}^t = G_{CCHP}^t \times LHV \times \eta_{CCHP}^E \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$P_{CCCHP}^t = G_{CCHP}^t \times LHV \times \eta_{CCHP}^C \quad \text{رابطه ۲۷}$$

$$P_{TCCHP}^t = G_{CCHP}^t \times LHV \times \eta_{CCHP}^T \quad \text{رابطه ۲۸}$$

$$0 \leq G_{CCHP}^t \leq \text{Max}_{G_{CCHP}^t} \quad \text{رابطه ۲۹}$$

محدودیت‌های چیلر الکتریکی (EC)

برق منبع ورودی چیلر الکتریکی است و خروجی آن نیروی سرمایش است. در محدودیت اول P_{EC}^{max} حداکثر برق ورودی به این واحد را نشان می‌دهد و در محدودیت دوم P_{EC}^t مقدار برق مصرفی چیلر الکتریکی و COP_{EC} ضریب عملکرد چیلر الکتریکی است (کائو و همکاران^۲، ۲۰۱۹؛ میائو و همکاران^۳، ۲۰۲۱).

۱. ارزش حرارتی پایین (lower heating value)، ارزش حرارتی خالص مقدار گرمایی است که در اثر سوختن کامل یک متر مکعب گاز آزاد می‌شود.

2. Cao et al.

3. Miao, et al.

$$0 \leq P_{EC}^t \leq P_{EC}^{max} \quad \text{رابطه ۳۰}$$

$$PC_{EC}^t = P_{EC}^t \times COP_{EC} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

محدودیت های بویلر گازی (GB)

گاز منبع ورودی بویلر گازی است و خروجی آن نیروی گرمایش است. محدودیت اول P_{GB}^{max} حداکثر ظرفیت خروجی انرژی گرمایش تولید شده توسط این واحد را نشان می دهد و در محدودیت دوم G_{GB}^t مقدار گاز مصرف شده به وسیله بویلر گازی و η_{EC} بازدهی بویلر گازی است (میائو و همکاران، ۲۰۲۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

$$0 \leq P_{GB}^t \leq P_{GB}^{max} \quad \text{رابطه ۳۲}$$

$$P_{GB}^t = G_{GB}^t \times \eta_{GB} \quad \text{رابطه ۳۳}$$

وسیله نقلیه الکتریکی (EV)

محدودیت ۳۴ نشان دهنده سطح برق ذخیره شده در وسیله نقلیه الکتریکی در دوره آتی ($SoC_{EV,t+1}$) است که بسته به وضعیت منبع ذخیره در دوره فعلی ($SoC_{EV,t}$)، میزان انرژی شارژ و دشارژ وسیله نقلیه در دوره فعلی ($P_{EV,ch}^t$)، نرخ کارایی شارژ/دشارژ آن ($\eta_{EV,disch}/\eta_{EV,ch}$) و برق مصرفی در نتیجه حرکت وسیله نقلیه در دوره فعلی ($P_{EV,tr}^t$) می تواند تغییر کند. محدودیت ۳۵ نشان دهنده این است که وضعیت ذخیره الکتریکی وسیله نقلیه در هر دوره t دارای حداکثر (SoC_{EV}^{max}) و حداقل (SoC_{EV}^{min}) است. محدودیت ۳۶ مقدار برق مصرفی وسیله نقلیه در دوره فعلی ($P_{EV,tr}^t$) را نشان می دهد که به مسافت طی شده ($AD_{EV,tr}^t$) و مقدار مصرف برق در هر مسافت (η_{EV}) بستگی دارد. با توجه به اینکه در هر دوره t وسیله نقلیه می تواند وظیفه شارژ یا دشارژ را بر عهده بگیرد مقدار آن صفر و یا یک است (محدودیت های ۳۷ تا ۳۹). متغیرهای $X_{EV,disch}^t$ و $X_{EV,ch}^t$ متغیرهای با اعداد صفر و یا یک هستند و در هر دوره وسیله نقلیه شارژ یا دشارژ می شود (عبدالناصر، علی، شعبان و محمد، ۲۰۲۲؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳).

$$SoC_{EV,t+1} = SoC_{EV,t} + \left((\eta_{EV,ch} \times P_{EV,ch}^t) - \left(\frac{P_{EV,disch}^t}{\eta_{EV,disch}} \right) - (P_{EV,tr}^t) \right) \quad \text{رابطه ۳۴}$$

$$SoC_{EV}^{min} \leq SoC_{EV,t} \leq SoC_{EV}^{max} \quad \text{رابطه ۳۵}$$

$$P_{EV,tr}^t = AD_{EV,tr}^t \times \eta_{EV} \quad \text{رابطه ۳۶}$$

$$0 \leq P_{EV,ch}^t \leq X_{EV,ch}^t \times P_{EV,ch} \quad \text{رابطه ۳۷}$$

$$0 \leq P_{EV,disch}^t \leq X_{EV,disch}^t \times P_{EV,disch} \quad \text{رابطه ۳۸}$$

$$0 \leq X_{EV,ch}^t + X_{EV,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۳۹}$$

محدودیت‌های منابع ذخیره

رابطه‌های ۴۰ تا ۴۵ مربوط به منبع ذخیره برق، رابطه‌های ۴۶ تا ۵۱ مربوط به منبع ذخیره گرمایش، رابطه‌های ۵۲ تا ۵۷ مربوط به منبع ذخیره سرمایش و رابطه‌های ۵۸ تا ۶۳ مربوط به منبع ذخیره گاز هستند. محدودیت اول مربوط به هر منبع ذخیره نشان‌دهنده سطح منبع ذخیره در دوره آتی ($SoC_{EES,t+1}$) است که بسته به وضعیت منبع ذخیره در دوره فعلی ($SoC_{EES,t}$)، میزان انرژی شارژ و دشارژ منبع ذخیره در دوره فعلی ($P_{EES,ch}^t/P_{EES,disch}^t$) و نرخ کارایی شارژ/دشارژ منبع ذخیره ($\eta_{EES,ch}/\eta_{EES,disch}$) می‌تواند تغییر کند. محدودیت دوم نشان‌دهنده این است که موجودی انرژی منبع ذخیره در هر دوره t دارای حداکثر (SoC_{EES}^{max}) و حداقل (SoC_{EES}^{min}) است و با توجه به اینکه در هر دوره t منبع ذخیره می‌تواند وظیفه شارژ یا دشارژ را برعهده بگیرد، مقدار آن صفر و یا یک است (محدودیت‌های سوم، چهارم و پنجم). متغیرهای $X_{EES,ch}^t$ و $X_{EES,disch}^t$ متغیرهایی با اعداد صفر یا یک هستند و در هر دوره منبع ذخیره شارژ یا دشارژ می‌شود. محدودیت ششم بیانگر این است که وضعیت منبع ذخیره در دوره اول با دوره آخر باید برابر باشد (بهمنی و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳ و جلیلیان و همکاران، ۲۰۲۲).

محدودیت‌های منابع ذخیره برق (EES)

$$SoC_{EES,t+1} = SoC_{EES,t} + \left(\eta_{EES,ch} \times P_{EES,ch}^t - \frac{P_{EES,disch}^t}{\eta_{EES,disch}} \right) \quad \text{رابطه ۴۰}$$

$$SoC_{EES}^{min} \leq SoC_{EES,t} \leq SoC_{EES}^{max} \quad \text{رابطه ۴۱}$$

$$0 \leq P_{EES,ch}^t \leq X_{EES,ch}^t \times P_{EES,ch} \quad \text{رابطه ۴۲}$$

$$0 \leq P_{EES,disch}^t \leq X_{EES,disch}^t \times P_{EES,disch} \quad \text{رابطه ۴۳}$$

$$0 \leq X_{EES,ch}^t + X_{EES,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۴۴}$$

$$SoC_{EES,t1} = SoC_{EES,t24} \quad \text{رابطه ۴۵}$$

محدودیت های منبع ذخیره گرمايش (TES)

$$SoC_{TES,t+1} = SoC_{TES,t} + (\eta_{TES,ch} \times P_{TES,ch}^t - \frac{P_{TES,disch}^t}{\eta_{TES,disch}}) \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

$$SoC_{TES}^{min} \leq SoC_{TES,t} \leq SoC_{TES}^{max} \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

$$0 \leq P_{TES,ch}^t \leq X_{TES,ch}^t \times P_{TES,ch} \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

$$0 \leq P_{TES,disch}^t \leq X_{TES,disch}^t \times P_{TES,disch} \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

$$0 \leq X_{TES,ch}^t + X_{TES,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه (۵۰)}$$

$$SoC_{TES,t1} = SoC_{TES,t24} \quad \text{رابطه (۵۱)}$$

محدودیت های منبع ذخیره سرمايش (CES)

$$SoC_{CES,t+1} = SoC_{CES,t} + (\eta_{CES,ch} \times P_{CES,ch}^t - \frac{P_{CES,disch}^t}{\eta_{CES,disch}}) \quad \text{رابطه (۵۲)}$$

$$SoC_{CES}^{min} \leq SoC_{CES,t} \leq SoC_{CES}^{max} \quad \text{رابطه (۵۳)}$$

$$0 \leq P_{CES,ch}^t \leq X_{CES,ch}^t \times P_{CES,ch} \quad \text{رابطه (۵۴)}$$

$$0 \leq P_{CES,disch}^t \leq X_{CES,disch}^t \times P_{CES,disch} \quad \text{رابطه (۵۵)}$$

$$0 \leq X_{CES,ch}^t + X_{CES,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه (۵۶)}$$

$$SoC_{CES,t1} = SoC_{CES,t24} \quad \text{رابطه (۵۷)}$$

محدودیت های منبع ذخیره گاز (GES)

$$SoC_{GES,t+1} = SoC_{GES,t} + (\eta_{GES,ch} \times P_{GES,ch}^t - \frac{P_{GES,disch}^t}{\eta_{GES,disch}}) \quad \text{رابطه (۵۸)}$$

$$SoC_{GES}^{min} \leq SoC_{GES,t} \leq SoC_{GES}^{max} \quad \text{رابطه (۵۹)}$$

$$0 \leq P_{GES,ch}^t \leq X_{GES,ch}^t \times P_{GES,ch} \quad \text{رابطه (۶۰)}$$

$$0 \leq P_{GES,disch}^t \leq X_{GES,disch}^t \times P_{GES,disch} \quad \text{رابطه (۶۱)}$$

$$0 \leq X_{GES,ch}^t + X_{GES,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه (۶۲)}$$

$$SoC_{GES,t1} = SoC_{GES,t24} \quad \text{رابطه (۶۳)}$$

محدودیت‌های برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DR)

در این پژوهش از مفهوم پاسخ‌گویی بار در شبکه هوشمند انرژی برای پوشش عدم قطعیت حاصل از تولید انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شود. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند منجر به بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی در زمان‌های پیک بار به‌منظور نیل به قیمت‌های مناسب و قابلیت اطمینان شبکه شود. پاسخ‌گویی بار می‌تواند شکل مصرف انرژی الکتریکی را تغییر دهد؛ به نحوی که بیشترین بازده مصرف در طی ساعات پیک به‌دست آید، بارها مدیریت شوند، پیک سیستم کاهش یافته و مصارف به ساعات غیر پیک منتقل شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). این برنامه‌ها به دو دسته برنامه‌های قیمت‌محور^۱ و برنامه‌های تشویق‌محور^۲ تقسیم می‌شوند. در این پژوهش از برنامه‌های قیمت‌محور مبتنی بر قیمت‌گذاری لحظه‌ای^۳ استفاده می‌شود؛ محدودیت‌های این برنامه برای انرژی‌های برق، گرمایش و سرمایش به‌ترتیب در ادامه تعریف می‌شود. رابطه‌های ۶۴ تا ۶۷ مربوط به محدودیت‌های پاسخ‌گویی بار الکتریکی، رابطه‌های ۶۸ تا ۷۱ مربوط به محدودیت‌های پاسخ‌گویی بار گرمایش و رابطه‌های ۷۲ تا ۷۵ مربوط به محدودیت‌های پاسخ‌گویی بار سرمایش است (جوردهی، جوادی و کاتالانو^۴، ۲۰۲۱؛ بهمنی و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳ و راک‌پور و براتی^۵، ۲۰۱۹).

محدودیت‌های برنامه‌های پاسخ‌گویی بار الکتریکی

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,E,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,E,down}^t \quad \text{رابطه ۶۴}$$

$$0 \leq D_{Load,E,up}^t \leq MR_{up}^E \times D_{Load,E}^t \times I_{Load,E,up}^t \quad \text{رابطه ۶۵}$$

$$0 \leq D_{Load,E,down}^t \leq MR_{down}^E \times D_{Load,E}^t \times I_{Load,E,down}^t \quad \text{رابطه ۶۶}$$

$$0 \leq I_{Load,E,up}^t + I_{Load,E,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۶۷}$$

محدودیت‌های برنامه‌های پاسخ‌گویی بار گرمایش

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,T,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,T,down}^t \quad \text{رابطه ۶۸}$$

$$0 \leq D_{Load,T,up}^t \leq MR_{up}^T \times D_{Load,T}^t \times I_{Load,T,up}^t \quad \text{رابطه ۶۹}$$

$$0 \leq D_{Load,T,down}^t \leq MR_{down}^T \times D_{Load,T}^t \times I_{Load,T,down}^t \quad \text{رابطه ۷۰}$$

$$0 \leq I_{Load,T,up}^t + I_{Load,T,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۷۱}$$

1. Price-based demand response
2. Incentive-based demand response
3. Real Time Pricing (RTP)
4. Jordehi, Javadi & Catalão
5. Rakipour & Barati

محدودیت‌های برنامه‌های پاسخ‌گویی بار سرمایه‌گذاری

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,C,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,C,down}^t \quad \text{رابطه (۷۲)}$$

$$0 \leq D_{Load,C,up}^t \leq MR_{up}^C \times D_{Load,C}^t \times I_{Load,C,up}^t \quad \text{رابطه (۷۳)}$$

$$0 \leq D_{Load,C,down}^t \leq MR_{down}^C \times D_{Load,C}^t \times I_{Load,C,down}^t \quad \text{رابطه (۷۴)}$$

$$0 \leq I_{Load,C,up}^t + I_{Load,C,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه (۷۵)}$$

روش حل مدل ریاضی چندهدفه

بیشتر مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی به‌طور طبیعی چندین هدف را شامل می‌شوند و در اغلب موارد این اهداف با هم ناسازگارند (مهرگان، جعفرنژاد و محمدی، ۱۳۹۷). در مسئله چندهدفه معمولاً نمی‌توان جوابی یافت که هم‌زمان همه اهداف را بهینه کند؛ در این مسائل برخلاف مسائل تک‌هدفه، ممکن است نقطه بهینه نداشته باشیم و در عوض با مجموعه‌ای جواب که به آن کارا یا نامغلوب گفته می‌شود، روبرو شویم. در این پژوهش برای حل مدل چندهدفه، از روش فازی حداکثر - حداقل^۱ استفاده می‌شود که رابطه‌های ۷۶ تا ۸۰ مراحل این روش را توضیح می‌دهند. با توجه به اینکه در این پژوهش سه تابع هدف مختلف وجود دارد، محاسبه نقاط مینیمم هر تابع از طریق رابطه‌های ۷۶ تا ۷۸ نشان داده شده است. با توجه به این رابطه‌ها، حداقل مقدار هر تابع را می‌توان با حل هر تابع به‌طور جداگانه به‌عنوان یک مسئله کمینه‌سازی محاسبه کرد. x_1^*, x_2^*, x_3^* جواب‌های بهینه‌ای را نشان می‌دهند که با حل هر تابع به‌دست می‌آیند. مقدار ماکزیمم هر تابع نیز با حل سایر توابع با در نظر گرفتن جواب به‌دست آمده برای آن تابع به‌دست می‌آید. سپس با توجه به رابطه ۷۹، هر تابع هدف نرمال شده و توابع عضویت (μ) محاسبه می‌شود. در نهایت، نقطه بهینه سراسری با رابطه ۸۰ با در نظر گرفتن کوچک‌ترین تابع عضویت به‌دست می‌آید (منصوری و همکاران^۲، ۲۰۲۱).

$$f_1^{Min} = f_1(x_1^*), \quad f_1^{Max} = \max(f_1(x_2^*), f_1(x_3^*)) \quad \text{رابطه (۷۶)}$$

$$f_2^{Min} = f_2(x_2^*), \quad f_2^{Max} = \max(f_2(x_1^*), f_2(x_3^*)) \quad \text{رابطه (۷۷)}$$

$$f_3^{Min} = f_3(x_3^*), \quad f_3^{Max} = \max(f_3(x_1^*), f_3(x_2^*)) \quad \text{رابطه (۷۸)}$$

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^{Min} \\ \frac{f_i^{Max} - f_i}{f_i^{Max} - f_i^{Min}} & f_i^{Min} < f_i < f_i^{Max} \\ 0 & f_i \geq f_i^{Max} \end{cases} \quad \text{رابطه (۷۹)}$$

$$\max \mu = \max\{\min(\mu_1, \mu_2, \mu_3)\} \quad \text{رابطه (۸۰)}$$

یافته‌های پژوهش

آماده‌سازی پارامترهای غیرقطعی و قطعی مدل

اکثر مدل‌هایی که شبیه به مسائل دنیای واقعی هستند، پارامترهایی با حدود نامشخص دارند. سرعت باد، شدت تابش خورشید، قیمت بازار و تقاضا با توجه به ماهیت آن‌ها، پارامترهای غیرقطعی در زمان‌بندی شبکه‌های هوشمند انرژی هستند. در این پژوهش برای در نظر گرفتن عدم قطعیت این پارامترها، از رویکرد سناریومحور استفاده شده است. برای سناریوسازی پارامترهای تقاضای برق، گرمایش و سرمایش از داده‌های منبع حسینی و احمدی‌نژاد^۱ (۲۰۲۱)، تقاضای گاز از داده‌های منبع جلیلیان و همکاران (۲۰۲۲) و قیمت برق از داده‌های منبع اشراقی و همکاران (۲۰۱۹) استفاده شده است. همچنین داده‌های سرعت باد و شدت تابش خورشید منطقه مورد مطالعه (استان تهران) از وبسایت هواشناسی PVWatts^۲ استخراج و از آن برای سناریوسازی و کاهش سناریو استفاده شد. در ادامه، این داده‌ها به کمک رابطه‌های ۲۴ و ۲۵ به توان الکتریکی تبدیل شدند. اطلاعات سایر پارامترهای قطعی مدل در جدول ۴ خلاصه شده است (مکرمیان و همکاران، ۲۰۲۱؛ راکی پور و بیاتی، ۲۰۱۹؛ اقبالی و همکاران، ۲۰۲۲؛ جانی، کریمی و جدید^۳، ۲۰۲۲؛ نیازوند، خراطی، خسروی و راستگو^۴، ۲۰۲۱؛ منعمی بیدگلی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳؛ جلیلیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ کائو و همکاران، ۲۰۱۹).

جدول ۴. داده‌های پارامترهای قطعی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\beta_{Grid,e}$	۰/۳۶۸	$\eta_{EV,ch}/\eta_{EV,disch}$	۰/۲	$C_{MC,WT}$	۰/۰۰۱۷
β_{CCHP}	۰/۳۷	$P_{EV,ch}/P_{EV,disch}$	۱۵	$C_{MC,PV}$	۰/۰۱۶
$\beta_{GB,e}$	۰/۹	$SoC_{EV}^{min}/SoC_{EV}^{max}$	۲۰-۱	$C_{MC,CCHP}$	۰/۰۲
LHV	۹/۷	$\eta_{EES,ch}/\eta_{EES,disch}$	۰/۹۵	$C_{MC,GB}$	۰/۰۲
η_{CCHP}^E	۰/۳۵	$P_{EES,ch}/P_{EES,disch}$	۱۲۰	$C_{MC,EES}$	۰/۰۰۲
η_{CCHP}^C	۰/۴۵	$SoC_{EES}^{min}/SoC_{EES}^{max}$	۶۰-۶۰	$C_{MC,CS}$	۰/۰۰۲
η_{CCHP}^T	۰/۴۵	$\eta_{TES,ch}/\eta_{TES,disch}$	۰/۹۵	$C_{MC,TS}$	۰/۰۰۲
MR_{up}^E/MR_{down}^E	۲۰	$P_{TES,ch}/P_{TES,disch}$	۱۵۰	$C_{MC,GES}$	۰/۰۲
MR_{up}^T/MR_{down}^T	۲۰	$SoC_{TES}^{min}/SoC_{TES}^{max}$	۶۰-۶۰	$C_{MC,EC}$	۰/۰۰۲
MR_{up}^C/MR_{down}^C	۲۰	$\eta_{CES,ch}/\eta_{CES,disch}$	۰/۹۵	v_{cutin}	۲۵
$P_{Buy.Grid}^{max}/P_{Sell.Grid}^{max}$	۱۰۰۰	$P_{CES,ch}/P_{CES,disch}$	۱۵۰	v_{rated}	۱۲
P_{GB}^{max}	۵۰۰	$SoC_{CES}^{min}/SoC_{CES}^{max}$	۷۵۰-۰	v_{cutout}	۳
η_{GB}	۰/۹۲	$\eta_{GES,ch}/\eta_{GES,disch}$	۰/۹۵	$prated_{WT}$	۱۵
P_{EC}^{max}	۵۰۰	$P_{GES,ch}/P_{GES,disch}$	۱۰۰	η^{PV}	۳۷
COP_{EC}	۴	$SoC_{GES}^{min}/SoC_{GES}^{max}$	۶۰-۶۰	A^{PV}	۲/۱۶

1. Hosseini & Ahmarinejad
2. <https://pvwatts.nrel.gov>
3. Jani, Karimi & Jadid
4. Niazvand, Kharrati, Khosravi & Rastgou

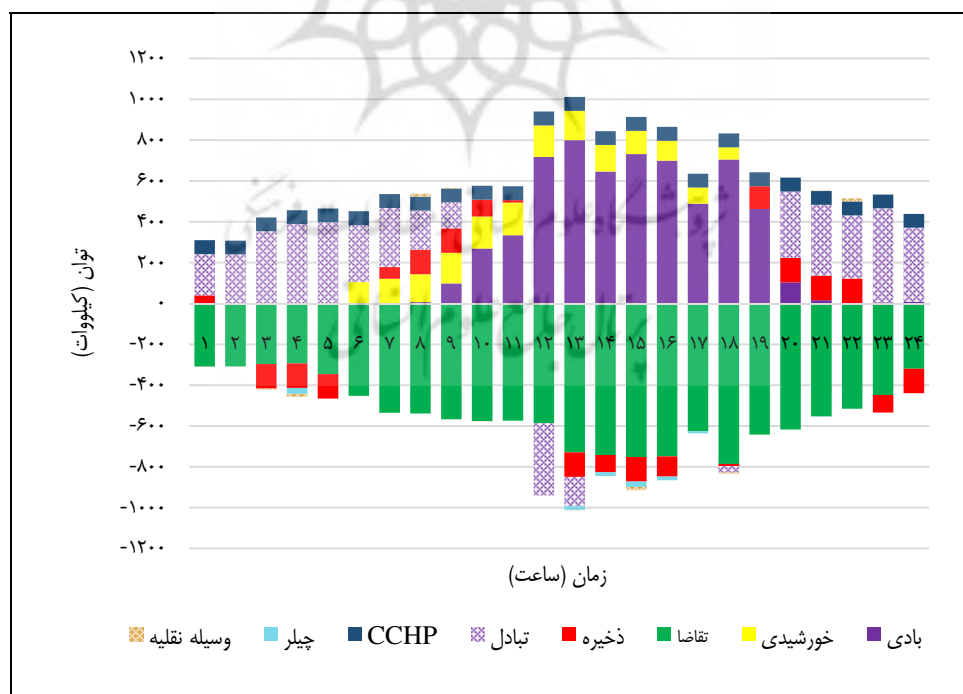
نتایج توابع هدف و تعادل توان الکتریکی، گرمایش و سرمایش

بعد از طراحی مدل ریاضی چندهدفه و استخراج داده‌های پارامترهای قطعی و غیرقطعی، با استفاده از روش فازی حداکثر-حداقل و به‌کارگیری زبان برنامه‌نویسی گمز اقدام به حل مدل شد. از بین نقاط بهینه پارتو، برای مطلوب‌ترین نقطه، که در مجموع هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی و کاهش پیک در آن نقطه پارتو نسبت به سایر نقاط پارتو بهترین است، در جدول ۵ خلاصه شده است.

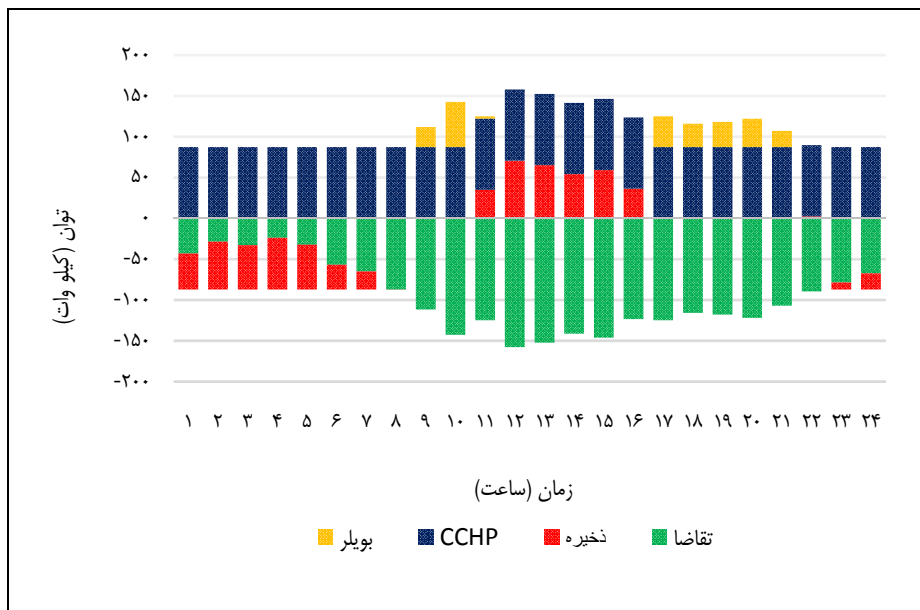
جدول ۵. هزینه‌های کل بهره‌برداری، کاهش آلودگی و پیک مصرف در شبانه‌روز

عنوان تابع هدف	هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)	آلودگی (کیلوگرم)	پیک مصرف (کیلووات)
مقدار تابع هدف	۵۴۸۶	۲۱۲۰	۳۵۸۴

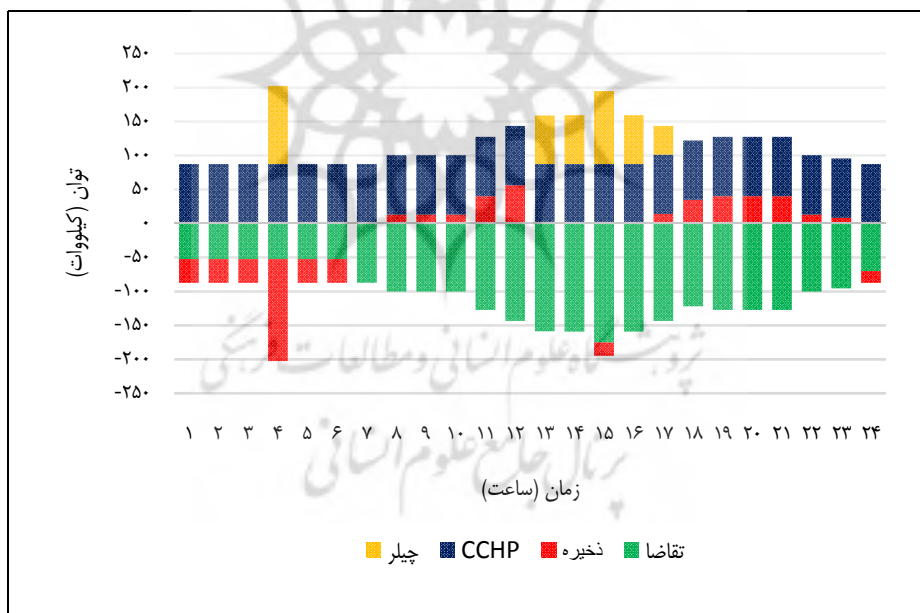
با توجه به مطلوب‌ترین نقطه پارتو، مقادیر متغیرها استخراج می‌شود. شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب تعادل توان الکتریکی، گرمایش و سرمایش شبکه هوشمند مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل‌های زیر، نمودارهای میله‌ای فوقانی، مقدار توان تولید و نمودارهای میله‌ای پایینی، مقدار توان مصرفی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تعادل توان الکتریکی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز



شکل ۴. تعادل توان گرمایی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز



شکل ۵. تعادل توان سرمایش در ۲۴ ساعت شبانه‌روز

با توجه به شکل ۳، CCHP از جمله تجهیزاتی است که با هدف کاهش خرید انرژی از شبکه برق و به‌دنبال آن کاهش هزینه بهره‌برداری در شبکه‌های هوشمند انرژی استفاده می‌شود. CCHP از منبع گاز تغذیه می‌کند و خروجی آن انرژی الکتریکی، گرمایش و سرمایش است. همان‌طور که از این شکل مشخص است CCHP برای ۲۴ ساعت روزانه جهت تولید انرژی الکتریکی فعال است.

همان‌طور که مشخص است هزینه بهره‌برداری و میزان آلودگی منابع تجدیدپذیر پایین است. در نتیجه تا حد امکان از این منابع با توجه به ظرفیت آن‌ها در تأمین بار الکتریکی مصرفی استفاده شده و مازاد این انرژی، صرف شارژ منبع ذخیره‌ساز و فروش به شبکه بالادست می‌شود. همچنین در ساعات پیک بار با افزایش بار مصرفی ریزش‌بکه و کمبود ظرفیت تجهیزات تأمین‌کننده انرژی نسبت به بار مصرفی، از منابع ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود.

در ساعات ابتدایی و انتهایی شبانه‌روز که قیمت برق ارزان است و امکان استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید نیست و همچنین، میزان انرژی تولید شده به‌وسیله تجهیزات شبکه کافی نیست، شبکه هوشمند، اکثر انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق خرید از شبکه بالادست تأمین می‌کند و در ساعات ۶ صبح تا ۲۰ بعدازظهر با توجه به اینکه تأمین انرژی به‌وسیله انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید و بادی امکان‌پذیر است و هزینه این نوع تأمین انرژی پایین است، شبکه حجم عمده‌ای از انرژی مورد نیاز خود از طریق این منابع تأمین می‌کند. ذخیره‌ساز الکتریکی در ساعات ۱، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ که کمبود تولید انرژی نسبت به مصرف انرژی وجود دارد، به دشارژ انرژی اقدام می‌کند و در سایر ساعات برای اینکه تأمین انرژی، مازاد بر مصرف انرژی است، شارژ می‌شود. وسیله نقلیه الکتریکی در ساعاتی که قیمت انرژی در پایین‌ترین سطح خود قرار دارد، به شبکه وصل و شارژ می‌شود و در ساعاتی که قیمت انرژی زیاد است، برای کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه دشارژ می‌شود. همچنین در ساعات ۱۲، ۱۳ و ۱۸ شبکه با توجه به اینکه مازاد تأمین انرژی دارد، آن مازاد را به شبکه بالادست می‌فروشد و فروش این انرژی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی زیست محیطی شبکه تأثیر دارد.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، توان گرمایی به‌وسیله تجهیزات CCHP و بویلر گازی تأمین می‌شود و اکثر این انرژی به‌وسیله واحد CCHP تأمین می‌شود و واحد بویلر فقط در ساعات ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۷، ۱۱، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ فعال است. در خصوص علت اصلی فعال بودن بیشتر واحد CCHP نسبت به واحد بویلر در تأمین انرژی گرمایی، می‌توان به ضریب پایین آلودگی محیط زیست آن اشاره کرد.

شکل ۵ تعادل توان سرمایش را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص است، تقریباً در اکثر ساعات روزانه این انرژی به‌وسیله واحد CCHP تأمین می‌شود و در ساعات ۴، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ مقداری از این انرژی به‌وسیله چیلر الکتریکی تأمین می‌شود. واحد ذخیره انرژی سرمایش در ساعات ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ که مازاد تولید نسبت مصرف وجود دارد اقدام به دشارژ انرژی سرمایش کرده و در ساعات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۱۵ و ۲۴ که مازاد انرژی وجود دارد شارژ می‌شود.

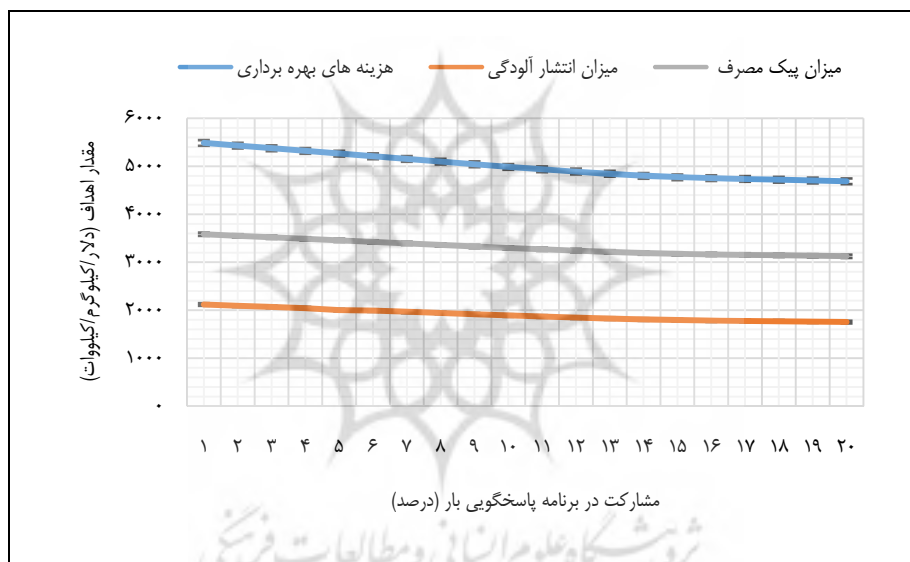
تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بهبود اهداف

مدیریت سمت تقاضا، به‌عنوان استراتژی کاهش مصرف اوج بار تلقی می‌شود که روش‌های صرفه‌جویی، تولید مشترک و استفاده از فناوری‌های کارآمد از نظر مصرف انرژی را دربرمی‌گیرد. یکی از مواردی که هم‌زمان با تجدید ساختار بهره‌برداری از سیستم‌های شبکه هوشمند انرژی مطرح شده است، پاسخ‌گویی بار است. پاسخ‌گویی بار عبارت است از توانمندسازی مشتریان صنعتی، تجاری و مسکونی برای بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی، به‌منظور نیل به قیمت‌های مناسب و بهبود قابلیت اطمینان شبکه. به عبارت دیگر، پاسخ‌گویی بار می‌تواند شکل مصرف انرژی الکتریکی را به نحوی

تغییر دهد که اوج بار کاهش یافته و مصارف به ساعات غیر اوج منتقل شوند. جدول ۶ و شکل ۶ نتایج حاصل از این پیاده‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۶. هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی و پیک مصرف حاصل از مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار

میزان مشارکت در اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار (درصد)	هزینه‌های بهره‌برداری (دلار)	آلودگی (کیلوگرم)	پیک مصرف (کیلووات)
بدون مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار	۵۴۸۶	۲۱۲۰	۳۵۸۴
۱۰	۴۹۳۷	۱۸۶۸	۳۲۶۹
۲۰	۴۶۸۶	۱۷۵۴	۳۱۲۵



شکل ۶. روند توابع هدف با توجه به درصد مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

همان‌طور که مشخص است با مشارکت طرفین مصرف در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، مقادیر توابع هدف بهبود می‌یابند و هر میزان این درصد مشارکت افزایش یابد، میزان بهبود توابع هدف افزایش می‌یابد. دلیل این بهبود، تغییر و جابه‌جایی تقاضا و انتقال آن به سایر ساعات شبانه‌روز است که پیک مصرف را کاهش می‌دهد؛ بنابراین مقدار آلودگی ایجاد شده به وسیله واحدهای تولیدکننده، مانند بویلر و CCHP، در ساعات اوج بار کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش تولید این تجهیزات، مقدار گاز مصرفی شبکه کاهش می‌یابد که باعث کاهش هزینه‌های شبکه می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

افزایش نیاز به انرژی، کمبود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌ها در رابطه با مسائل زیست محیطی، سبب ورود هرچه بیشتر منابع جدید، از جمله منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر انرژی در سیستم‌های قدرت مدرن شده است. شبکه‌های هوشمند

انرژی با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی پراکنده همچون خورشیدی و بادی ایجاد می‌شوند و امکان بهره‌برداری مؤثر از منابع سیستم قدرت و بهبود کارایی را فراهم می‌آورند. هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه شبکه‌های هوشمند با حضور برنامه پاسخ‌گویی بار بود.

در این پژوهش یک منطقه مسکونی هوشمند شبیه‌سازی و از روش برنامه‌ریزی احتمالی برای مدل کردن رفتار تصادفی توان تولید بادی، توان خورشیدی، قیمت برق و تقاضا استفاده شد. در ضمن فرض شد مصرف‌کننده می‌تواند در مدیریت تولید و مصرف انرژی از طریق مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مشارکت فعال داشته باشد. در نهایت پس از طراحی مدل چندهدفه و محدودیت‌های مربوطه، از روش فازی حداکثر - حداقل برای حل مدل چندهدفه استفاده شد. نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار امکان کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، انتشار آلودگی و پیک مصرف را به دنبال دارد؛ به طوری که اگر مصرف‌کنندگان ۲۰ درصد در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مشارکت داشته باشند، میزان کاهش در هزینه‌ها، انتشار آلودگی و پیک مصرف به ترتیب حدود ۱۵ درصد، ۱۷ درصد و ۱۳ درصد خواهد بود. این یافته‌ها پتانسیل قابل توجه مشارکت مصرف‌کننده در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را به عنوان یک استراتژی قابل اجرا برای کاهش هزینه‌های مرتبط با انرژی و اثرهای زیست محیطی، در عین حصول اطمینان از مدیریت کارآمد تولید و مصرف انرژی برجسته می‌کند. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاران، تأمین‌کنندگان انرژی و کسب‌وکارهایی باشد که به دنبال بهینه‌سازی مصرف انرژی و ترویج توسعه پایدارند.

نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات لیو و همکاران (۲۰۲۱)، لین و همکاران (۲۰۲۱)، یانگ و همکاران (۲۰۲۲)، شن و همکاران (۲۰۲۲)، ژائو و همکاران (۲۰۲۲) و وانگ و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر اینکه شبکه‌های هوشمند انرژی در بهبود اهداف هزینه‌های بهره‌برداری، انتشار آلودگی و پیک مصرف مؤثر است هم‌خوانی دارد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی به غیر از تسهیم انرژی با شبکه بالادست، امکان تسهیم انرژی بین مناطق مسکونی هوشمند فراهم شود تا نقش این تسهیم در بهبود توابع هدف بررسی شود. همچنین پیشنهاد می‌شود از سایر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، در بهبود توابع هدف استفاده شود و این برنامه‌ها با هم مقایسه شوند.

منابع

رادسر، مصطفی؛ کاظمی، عالییه؛ مهرگان، محمدرضا؛ رضوی حاج آقا، سیدحسین (۱۴۰۰). طراحی یک الگوریتم بر پایه تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای با شاخص‌های خوب و بد به منظور ارزیابی صنعت برق ایران. مدیریت صنعتی، ۱۳(۱)، ۱-۲۶.
پارسیان، فرزانه؛ رضایی، بابک (۱۳۹۸). تعیین اندازه منابع انرژی ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی با توجه به فاکتورهای اقتصادی. مدیریت صنعتی، ۱۱(۲)، ۲۳۳-۲۵۴.

مهرگان، محمدرضا؛ جعفرنژاد، احمد؛ محمدی، میلاد (۱۳۹۷). ارائه مدل چندهدفه برای حمل‌ونقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب (مطالعه موردی: شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی)، مدیریت صنعتی، ۱۰(۲)، ۲۰۱-۲۲۰.

References

- Abdulnasser, G., Ali, A., Shaaban, M. F. & Mohamed, E. E. M. (2022). Stochastic multi-objectives optimal scheduling of energy hubs with responsive demands in smart microgrids. *Journal of Energy Storage*, 55, 105536.
- Aghajani, G. R., Shayanfar, H. A. & Shayeghi, H. (2015). Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management. *Energy Conversion and Management*, 106, 308–321.
- Aghajani, G., Shayanfar, H., Shayeghi, H. (2017). Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response, *Energy*, 126, 622–637.
- Awan, A., Abbasi, K. R., Rej, S., Bandyopadhyay, A. & Lv, K. (2022). The impact of renewable energy, internet use and foreign direct investment on carbon dioxide emissions: A method of moments quantile analysis. *Renewable Energy*, 189, 454–466.
- Bahmani, R., Karimi, H. & Jadid, S. (2021). Cooperative energy management of multi-energy hub systems considering demand response programs and ice storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 106904.
- Cao, Y., Wang, Q., Du, J., Nojavan, S., Jermittiparsert, K., Ghadimi, N. (2019). Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 20, 100274.
- Chen, C., Zhao, H., Qiu, T., Hu, M., Han, H. & Ren, Z. (2017). An efficient power saving polling scheme in the internet of energy. *Journal of Network and Computer Applications*, 89, 48–61.
- Cheng, Y., Peng, J., Liu, K., Jiang, F., Wu, Y. & Huang, Z. (2022). A distributed energy management scheme with the extended optimization horizon for Energy Internet. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 31, 1–15.
- Cheng, Y., Peng, J., Liu, K., Jiang, F., Wu, Y., Huang, Z. (2022). A distributed energy management scheme with the extended optimization horizon for Energy Internet, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 31, 100698.
- Eghbali, N., Hakimi, S. M., Hasankhani, A., Derakhshan, G. & Abdi, B. (2022). Stochastic energy management for a renewable energy based microgrid considering battery, hydrogen storage, and demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30, 100652.
- Eshraghi, A., Salehi, G., Heibati, S., Lari, K. (2019). An enhanced operation model for energy storage system of a typical combined cool, heat and power based on demand response program: The application of mixed integer linear programming. *Building Services Engineering Research and Technology*, 40, 47-74.
- Fatemi, S., Ketabi, A., Mansouri, SA. (2023). A multi-level multi-objective strategy for eco-environmental management of electricity market among micro-grids under high penetration of smart homes, plug-in electric vehicles and energy storage devices, *Journal of Energy Storage*, 67, 107632.

- Hong, Z., Feng, Y., Li, Z., Wang, Y., Zheng, H., Li, Z. & Tan, J. (2019). An integrated approach for multi-objective optimisation and MCDM of energy internet under uncertainty. *Future Generation Computer Systems*, 97, 90–104.
- Hosseini, S., Ahmarinejad, A. (2021). Stochastic framework for day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks considering multiple downward energy hubs. *Journal of Energy Storage*, 33, 102066.
- Jalilian, F., Mirzaei, M., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., Amjad Anvari-Moghaddam, A (2022). Multi-energy microgrids: An optimal despatch model for water-energy nexus, *Sustainable Cities and Society*, 77, 103573.
- Jani, A., Karimi, H., Jadid, SH. (2022). Multi-time scale energy management of multi-microgrid systems considering energy storage systems: A multi-objective two-stage optimization framework, *Journal of Energy Storage*, 51, 10454.
- Jordehi, A., Javadi, M., Catalão, J (2021). Day-ahead scheduling of energy hubs with parking lots for electric vehicles considering uncertainties, *Energy*, 229, 120709.
- Karimi, H; Jadid, Sh; Hasanzadeh, S. (2023). Optimal-sustainable multi-energy management of microgrid systems considering integration of renewable energy resources: A multi-layer four-objective optimization. *Sustainable Production And consumption*, 36, 126–138.
- Karimi, H., Jadid, S. & Makui, A. (2021). Stochastic energy scheduling of multi-microgrid systems considering independence performance index and energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 33, 1-12.
- Karimi, H., Jadid, S. & Saboori, H. (2019). Multi-objective bi-level optimisation to design real-time pricing for demand response programs in retail markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13, 1287-1296.
- Khan, A. R., Mahmood, A., Safdar, A., Khan, Z. A. & Khan, N. A. (2016). Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1311–1322.
- Li, P., Cai, G., Z. (2020). Multi-objective optimal allocation strategy for the energy internet in Huangpu District, Guangzhou, China. *Frontiers in Energy*, 14, 241–253.
- Lin, C. C., Wu, Y. F. & Liu, W. Y. (2021). Optimal sharing energy of a complex of houses through energy trading in the Internet of energy. *Energy*, 220, 1-12.
- Liu, H., Zhao, Y., Ge, Sh., Zhang, P., Liu, W., Xiaoguang, H. (2021). Reliability evaluation of regional energy Internet considering electricity–gas coupling and coordination between energy stations. *IET Energy Systems Integration*, 3, 238–249.
- Long, H., Fu, X., Kong, W., Chen, H., Zhou, Y. & Yang, F. (2022). Key technologies and applications of rural energy internet in China. *Information Processing in Agriculture*, <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2022.03.001>
- Lu, X., Li, H., Zhou, K. & Yang, S. (2023). Optimal load dispatch of energy hub considering uncertainties of renewable energy and demand response. *Energy*, 262, 125564.
- Mansouri, S.A., Ahmarinejad, A., Nematbakhsh, E., Javadi, M.S., Jordehi, A.R., Catalão, J.P. (2021). Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach, *Sustainable Cities and Society*, 69, 1-16.

- Mehregan, M., Jafarnejad, A., Mohammadi, M. (2018). Proposing a Multi-objective Model for Ground Transportation of Hazardous Materials in the Hub Network (Case Study: National Iranian Oil Products Distribution Company). *Industrial Management Journal*, 10(2), 201-220. (in Persian)
- Mohammadii, Y., Shakouri, G., H., Kazemi, A. (2022). A Multi-Objective Fuzzy Optimization Model for Electricity Generation and Consumption Management in a Micro Smart Grid. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104119.
- Monemi Bidgoli, M., Karimi, H., Jadid, Sh., Anvari-Moghaddam, A. (2021). Stochastic electrical and thermal energy management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy: A prioritized multi-objective framework. *Electric Power Systems Research*, 196, 1-12.
- Mokaramian, E., Shayeghi, H., Sedaghati, F. & Safari, A. (2021). Four-Objective Optimal Scheduling of Energy Hub Using a Novel Energy Storage, Considering Reliability and Risk Indices. *Journal of Energy Storage*, 40, 102731.
- Miao, P., Yue, Z., Niu, T., Alizadeh, A. & Jermsittiparsert, K. (2021). Optimal emission management of photovoltaic and wind generation based energy hub system using compromise programming. *Journal of Cleaner Production*, 281, 124333.
- Niazvand, F., Kharrati, S., Khosravi, F., Rastgou, A. (2021). Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS technology, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101300.
- Parsian, F. & Rezaee, B. (2019). Determining the Energy Sources of the Electric Vehicles Charging Station According to Economic Factors. *Industrial Management Journal*, 11(2), 233-254. (in Persian)
- PVWatts Calculator. Available online: <https://pvwatts.nrel.gov> (accessed on April 2022).
- Qiu, C., Cui, S., Yao, H., Xu, F., Yu, F. R. & Zhao, C. (2019). A novel QoS-enabled load scheduling algorithm based on reinforcement learning in software-defined energy internet. *Future Generation Computer Systems*, 92, 43-51.
- Radsar, M., Kazemi, A., Mehregan, M. & Razavi Hajiagha, S.H. (2021). Designing an algorithm based on network data envelopment analysis with desirable and undesirable indicators for the evaluation of the Iranian power industry. *Industrial Management Journal*, 13(1), 1-26. (in Persian)
- Rakipour, D; Barati, H. (2019). Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response. *Energy*, 173, 384-399.
- Shen, Y., Hu, W., Liu, M., Yang, F. & Kong, X. (2022). Energy storage optimization method for microgrid considering multi-energy coupling demand response. *Journal of Energy Storage*, 45, 1-9.
- Soltani Nejad Farsangi, A., Hadayeghparast, S., Mehdinejad, M. & Shayanfar, H. (2018). A novel stochastic energy management of a microgrid with various types of distributed energy resources in presence of demand response programs. *Energy*, 160, 257-274.

- Thirunavukkarasu, G., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., Stojcevski, A. (2022). Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review, *Energy Strategy Reviews*, 43, 100899.
- Wang, K., Liang, Y., Jia, R., Wu, X., Wang, X., Dang, P.(2023). Two-stage stochastic optimal scheduling for multi-microgrid networks with natural gas blending with hydrogen and low carbon incentive under uncertain environments, *Journal of Energy Storage*, 72, 108319.
- Wang, R., Xu, T., Xu, X., Gao, G., Zhang, Y., Zhu, K. (2023). Robust multi-objective load dispatch in microgrid involving unstable renewable generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108991.
- Wang, Y., Huang, Y., Wang, Y., Zeng, M., Li, F., Wang, Y. & Zhang, Y. (2018). Energy management of smart micro-grid with response loads and distributed generation considering demand response. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1069–1083
- Ying, W Wu, Y., Guerrero, J. M. & Vasquez, J. C. (2021). A comprehensive overview of framework for developing sustainable energy internet: From things-based energy network to services-based management system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 1-11.
- Yunna, W, Zhang, T. & Yi, L. (2021). Regional energy internet project investment decision making framework through interval type-2 fuzzy number based Choquet integral fuzzy synthetic model. *Applied Soft Computing*, 111, 1-12.
- Yang, S. X., Nie, T. qi & Li, C. C. (2022). Research on the contribution of regional Energy Internet emission reduction considering time-of-use tariff. *Energy*, 239, 1-12.
- Yang, S. X., Zhu, C. X., Qiao, L. & Chi, Y. Y. (2020). Dynamic assessment of Energy Internet's emission reduction effect - a case study of Yanqing, Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 272, 1-12.
- Yang, X., Su, X., Ran, Q. et al. (2021). Assessing the impact of energy internet and energy misallocation on carbon emissions: new insights from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 23436–23460.
- Yang, S. X., Nie, T. qi & Li, C. C. (2022). Research on the contribution of regional Energy Internet emission reduction considering time-of-use tariff. *Energy*, 239, 122170.
- Zhou, K., Yang, S. & Shao, Z. (2016). Energy Internet: The business perspective. *Applied Energy*, 178, 212–222.
- Zhao, J., Wang, X., Tian, H (2022). Optimization strategy and capacity planning for coordinated operation of regional energy internet system based on sparrow search algorithm. *International Journal of Green Energy*, 19, 1-17.