JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 16/ No. 63/ Autumn 2025
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://sanad.iau.ir/journal/jipet

Doi: 10.71666/jipet.2025.998631

Research Article

A Multi-Layer Model for Energy Management of Multi-Microgrids Integrated with Smart Homes and Electric Vehicles

Mehdi Haghparast[1], *Ph.D. Student*, Amir Ahmarinejad[1], *Associate Professor*, Ahmad Rezaee-Jordehi[2], *Associate Professor*, Shahram Javadi[1], *Associate Professor*, Mahmood Hosseini-Aliabadi[1], *Assistant Professor*

[1]Department of Electrical Engineering- Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]Department of Electrical Engineering- Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran
haghparastmehdi@yahoo.com, a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir, ahmad.rezaeejordehi@iau.ac.ir, sh.javadi@gmail.com, m.h.aliabadi@gmail.com

Abstract
In this paper, a three-layer optimization strategy for flexible energy management of the active distribution system under the high penetration of wind and solar renewable energy sources is introduced, in which microgrids are responsible for providing the flexibility services to the main distribution network. In the proposed strategy, microgrid operators provide flexibility services through distributed generation resources, electrical storage systems, smart homes, and electric vehicles. In the first layer of the proposed strategy, smart homes are planned considering the energy and flexibility markets and then announce their final plan to the microgrid operator. In the second layer, microgrids plan their service area according to the plans received from smart homes and then send their participation plan in the energy and flexibility markets to the main distribution network operator. Eventually, in the third layer, the main distribution network operator plans the energy and flexibility markets according to the plans received from the microgrids. The proposed three-stage strategy is modeled as a mixed integer linear programming problem and solved by CPLEX solver in GAMS. The proposed optimization strategy has been implemented on several case studies and the simulation results demonstrate that this strategy can effectively provide the flexibility capacities required for sustainable operation through cheap resources within microgrids, thereby significantly reducing the daily costs of microgrids and distribution network.

Keywords: Electric vehicles, flexibility services, microgrid, renewable energies, multi-layer optimization, smart homes.

Received: 12 May 2023
Revised: 12 August 2023
Accepted: 27 August 2023

Corresponding Author: Dr. Ahmad Rezaee-Jordehi

Citation: M. Hagh-Parast, A. Ahmarinejad, A. Rezaee-Jordehi, S. Javadi, M. Hosseini-Aliabadi, "A multi-layer model for energy management of multi-microgrids integrated with smart homes and electric vehicles", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 63, pp. 83-108, September 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2025.998631

مقاله پژوهشی

یک مدل چندلایه‌ای برای مدیریت انرژی سیستم‌های چندریزشبکه‌ای ادغام شده با خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی

مهدی حق‌پرست[۱]، دانشجوی دکتری، امیر احمری‌نژاد[۱]، دانشیار، احمد رضایی-جوردهی[۲]، دانشیار، شهرام جوادی[۱]، دانشیار، محمود حسینی-علی‌آبادی[۱]، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی- واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی برق- واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

haghparastmehdi@yahoo.com, a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir, ahmad.rezaeejordehi@iau.ac.ir, sh.javadi@gmail.com, m.h.aliabadi@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک استراتژی بهینه‌سازی سه‌لایه‌ای برای مدیریت انرژی سیستم توزیع فعال تحت نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی معرفی شده است، که در آن ریزشبکه‌ها مسئول تأمین سرویس‌های انعطاف‌پذیری برای شبکه توزیع اصلی هستند. در استراتژی پیشنهادی، بهره‌برداران ریزشبکه‌ها سرویس‌های انعطاف‌پذیری را از طریق منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی، خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی تأمین می‌کنند. در لایه اول استراتژی پیشنهادی، خانه‌های هوشمند با در نظر گرفتن بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری برنامه‌ریزی شده و سپس برنامه نهایی خود را به بهره‌بردار ریزشبکه اعلام می‌کنند. در لایه دوم، ریزشبکه‌ها با توجه به برنامه‌های دریافتی از خانه‌های هوشمند، برنامه‌ریزی ناحیه خود را انجام داده و برنامه مشارکت خود در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری را برای بهره‌بردار شبکه توزیع اصلی می‌فرستند. در نهایت، در لایه سوم، بهره‌بردار شبکه اصلی برنامه‌ریزی بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری را با توجه به برنامه‌های دریافتی از ریزشبکه‌ها انجام می‌دهد. استراتژی سه مرحله‌ای پیشنهادی به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح مدل شده و توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل می‌شود. استراتژی بهینه‌سازی پیشنهادی بر روی چندین مورد مطالعاتی پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که این استراتژی به‌طور مؤثری توانسته ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای بهره‌برداری پایدار را از طریق منابع ارزان درون ریزشبکه‌ها تأمین کند و بدینوسیله هزینه‌های روزانه ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی چندلایه‌ای، خانه‌های هوشمند، ریزشبکه، سرویس‌های انعطاف‌پذیری، وسایل نقلیه الکتریکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد رضایی-جوردهی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: رشت- دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

مسائل انعطاف‌پذیری[۱] در سیستم‌های قدرت مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل تنوع ذاتی و متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروی باد و خورشید است. برخلاف منابع تولید برق سنتی، مانند سوخت‌های فسیلی یا انرژی هسته‌ای که می‌توانند خروجی ثابت و قابل پیش‌بینی ارائه دهند، تولید انرژی تجدیدپذیر در معرض نوسان‌های تحت تأثیر شرایط آب و هوایی، زمان روز و فصلی است. یکی از چالش‌های کلیدی در سیستم‌های برق مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر تطبیق عرضه برق با تقاضا در زمان واقعی است. از آنجایی که در دسترس بودن منابع انرژی تجدیدپذیر نامشخص است و در نوسان است، نیاز به سازوکارهای انعطاف‌پذیر برای تعادل معادله عرضه و تقاضا وجود دارد. بدون اقدامات انعطاف‌پذیری مناسب، عدم تعادل ممکن است رخ دهد که منجر به مشکلاتی مانند ناپایداری شبکه، انحرافات فرکانس و حتی قطع برق می‌شود. مسائل انعطاف‌پذیری نیز هنگام ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ در شبکه برق موجود به‌وجود می‌آیند. زیرساخت شبکه برق، که عمدتاً برای تولید برق متمرکز طراحی شده است، ممکن است به اندازه کافی برای رسیدگی به ماهیت غیرمتمرکز تولید انرژی تجدیدپذیر مجهز نباشد. این می‌تواند منجر به تراکم انتقال، زیرساخت ناکافی شبکه و مشکلات در مدیریت جریان برق شود.

در سال‌های اخیر و به منظور مقابله با تهدیدهای ناشی از تغییرات آب و هوایی، تغییر زیرساخت‌های تولید و توزیع انرژی بسیار ضروری است. در این راستا سیاست‌های مختلفی تعیین شده‌اند که یکی از آن‌ها جایگزینی واحدهای تولیدی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با نوع تجدیدپذیر است [۱]. افزایش در تعداد واحدهای تولیدی مبتنی بر تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت از طرفی انتشار کربن و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش داده و از طرف دیگر عدم قطعیت‌های مرتبط با توان تولیدی این واحدها پایداری، قابلیت اطمینان و تعادل توان در سیستم را با تهدیدهایی جدی مواجه می‌کند [۲]. از این‌رو نیاز است که افزایش تعداد واحدهای تولید تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت در حال ظهور نه تنها از دیدگاه زیست‌محیطی بلکه از دیدگاه‌های فنی، اقتصادی، پایداری و امنیتی نیز تحت بررسی قرار گیرد [۳]. تغییرات ناگهانی نادر، نوسانات تصادفی و نوسانات دوره‌ای آهسته برخی از رویدادهای مرتبط با واحدهای تجدیدپذیر هستند که منجر به نوسانی شدن و ایجاد عدم تعادل میان تولید و مصرف در سیستم می‌شوند [۴]. توانایی سیستم برای پوشش سریع این نوسانات و عدم‌تعادل‌ها را انعطاف‌پذیری می‌گویند [۵]. بنابراین تخصیص سرویس‌های انعطاف‌پذیری[۲] برای مقابله با نوسانات شبکه‌ها مبتنی بر تجدیدپذیر آینده امری اجتناب‌ناپذیر است.

سرویس‌های انعطاف‌پذیری در شبکه‌های قدرت سنتی به‌صورت متمرکز از طریق واحدهای حرارتی در سطح انتقال تأمین می‌شدند در حالی که در شبکه‌های قدرت مدرن که در سطح توزیع متشکل از چندین ریزشبکه هستند می‌توانند به‌صورت غیرمتمرکز از طریق منابع محلی مختلف تأمین شوند. به‌طور کلی ریزشبکه‌ها یک راه حل مؤثر برای تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت مدرن از طریق منابع محلی[۳] هستند از آنجایی که منابع تولید پراکنده[۴] و بارهای ناحیه سرویس‌دهی خود را به‌طور مستقل کنترل می‌کنند [۶]. بهره‌بردار ریزشبکه می‌تواند از طریق پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا[۵] انعطاف‌پذیری قابل توجهی را از مشترکین هوشمند و ناوگان خودروهای الکتریکی[۶] درون ناحیه سرویس‌دهی خود استخراج کند [۷]. در این راستا ارائه تعرفه‌های تشویقی به مشترکین هوشمند و کاربران خودروهای الکتریکی می‌تواند آن‌ها را برای مشارکت در تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه تشویق کند. علاوه بر این، بهره‌بردار ریزشبکه می‌تواند با مدیریت تبادل توان خود با شبکه از طریق کنترل تولیدات محلی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و بارهای درون ناحیه خود منجر به کاهش شدن قابل توجه نیاز سیستم به سرویس‌های انعطاف‌پذیری شود [۸]. به‌طور کلی طراحی روش‌های مدیریت انرژی جدید برای تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت از طریق منابع تولید پراکنده و همچنین مشترکین هوشمند برای تضمین پایداری شبکه‌های مبتنی بر تجدیدپذیر در حال ظهور امری ضروری است.

تحقیقات متعددی بر روی انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع الکتریکی مبتنی بر تجدیدپذیر در حال ظهور صورت گرفته جایی که پژوهشگران راه‌کارهای مختلفی برای تأمین انعطاف‌پذیری مورد نیاز این سیستم‌ها از طریق ریزشبکه‌ها تاکنون ارائه کرده‌اند. به عنوان نمونه در مرجع [۹] یک مدل غیرخطی برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده که در آن بهره‌برداری منعطف[۷] سیستم با وجود نوسان‌های زیاد ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر تضمین می‌شود. در مدل پیشنهادی انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم توزیع از طریق سیستم‌های ذخیره‌ساز درون ریزشبکه‌ها تأمین می‌شود. برای گنجاندن عدم قطعیت‌های بهره‌برداری در

مدل از برنامه‌ریزی تصادفی[۸] استفاده شده است. نتایج گواهی می‌دهند که این مدل شاخص‌های انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان را بهبود داده در حالی که هزینه روزانه را کمینه کرده است. در مرجع [۱۰] یک مدل چند هدفه برای مدیریت انرژی منعطف ریزشبکه‌های درون یک سیستم توزیع ۳۳ شینه ارائه شده جایی که با استفاده از تئوری شکاف اطلاعاتی تصمیم‌گیری[۹]، بهره‌برداری را در برابر عدم قطعیت‌های بهره‌برداری ایمن می‌کند. در این تحقیق بهره‌برداران ریزشبکه‌ها مسئول تامین بارهای الکتریکی و حرارتی درون ناحیه خود بوده و توابع هدف آن‌ها متشکل از شاخص‌های اقتصادی و انعطاف‌پذیری است. روش فازی[۱۰] برای حل مسئله مدیریت انرژی چند هدفه استفاده شده و نتایج توانایی استراتژی پیشنهادی برای ارتقای انعطاف‌پذیری سیستم را تصدیق می‌کنند. در مرجع [۱۱] نویسندگان از توانایی ریزشبکه‌ها برای مقابله با چالش‌های انعطاف‌پذیری شبکه‌های مبتنی بر تجدیدپذیر نوظهور استفاده کرده‌اند. برای این منظور، یک استراتژی مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی روزانه ریزشبکه‌ها طراحی کرده‌اند که در آن بهره‌برداران ریزشبکه‌ها مسئول پوشش نوسانات تولید و مصرف هستند. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی آشکار می‌کنند بهره‌برداران ریزشبکه‌ها با کنترل واحدهای تولیدی و ذخیره‌ساز درون ناحیه سرویس‌دهی خود توانسته‌اند به‌طور مؤثری نوسانات تولید و مصرف را پوشش دهند. در مرجع [۱۲] یک استراتژی دو سطحی تصادفی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم‌های توزیع ارائه داده که در آن مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها با هدف کاهش هزینه‌های روزانه مقید به تأمین سرویس‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم توزیع انجام می‌شود. در سطح اول این مدل برنامه‌ریزی بهره‌برداری تجهیزات ریزشبکه شامل منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز هیبریدی انجام شده جایی که یک ظرفیت رزرو برای مقابله با خطای پیش‌بینی مربوط به پارامترهای نایقین اختصاص داده می‌شود. سپس در سطح دوم بهره‌بردار ریزشبکه تجهیزات را با توجه به سیگنال دریافتی از سیستم توزیع مجدداً برنامه‌ریزی می‌کنند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی گواهی می‌دهند که استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی نه تنها خطای پیش‌بینی مربوط به عدم قطعیت‌های بهره‌برداری درون ناحیه سرویس‌دهی ریزشبکه‌ها را پوشش می‌دهد بلکه نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم توزیع را نیز به‌طور کامل تأمین می‌کند.

با توجه به اهمیت بالای مسائل اقتصادی برای مالکین ریزشبکه‌ها، پژوهش‌های متعددی مسائل مرتبط با انعطاف‌پذیری را از دید بازار بررسی کرده‌اند. در همین راستا در مرجع [۱۳] یک استراتژی دو مرحله‌ای برای مشارکت ریزشبکه‌های به هم پیوسته در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری محلی معرفی شده است. در این مطالعه ریزشبکه‌ها علاوه بر تبادل توان با شبکه قادر به تبادل توان نظیر به نظیر[۱۱] با یکدیگر هستند. برای تسویه بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری از یک تئوری بازی استفاده شده که در آن تعادل نش از طریق حل یک الگوریتم مبتنی بر تکرار یافت می‌شود. استراتژی شانس مقید برای مهار کردن عدم قطعیت‌های بهره‌برداری استفاده شده و نتایج گواهی‌دهنده تأثیر استراتژی پیشنهادی بر استخراج ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری از ریزشبکه‌ها و کاهش هزینه‌های روزانه سیستم را تأیید می‌کنند. در مرجع [۱۴] با بهره‌گیری از تئوری بازی استکلبرگ یک استراتژی جدید برای مشارکت ریزشبکه‌ها در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری ارائه می‌کنند. در این مطالعه، بهره‌بردار یک سیستم توزیع ۶۹ شینه تلاش می‌کند تا ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز خود را از طریق منابع محلی درون ریزشبکه‌ها همچون منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز و بارهای منعطف تأمین کند. نتایج نشان‌دهنده توانایی استراتژی پیشنهادی برای تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری بهره‌بردار سیستم توزیع از طریق منابع محلی ریزشبکه‌ها و متعاقباً کاهش وابستگی آن به شبکه بالادست است. در مرجع [۱۵] یک استراتژی جدید برای مشارکت ریزشبکه‌های به هم پیوسته در بازارهای رزرو و انعطاف‌پذیری[۱۲] ارائه شده است. روش تصادفی برای مقابله با عدم‌قطعیت‌های برخاسته از بار، تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر[۱۳] و قیمت استفاده شده است. در راهبرد پیشنهادی ریزشبکه‌ها در ابتدا برنامه‌ریزی اولیه خود را انجام داده و سپس با توجه به سیگنال دریافتی از بهره‌بردار مستقل سیستم[۱۴] منابع تولیدی و ذخیره‌ساز درون ناحیه خود را برای مشارکت در بازارهای خدمات جانبی مجدداً برنامه‌ریزی می‌کنند. از روش ریسک‌گریز[۱۵] برای کنترل ریسک برنامه‌ریزی استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که ریزشبکه‌ها توسط راهبرد پیشنهادی نه تنها هزینه‌های روزانه خود را پایین آورده بلکه ظرفیت‌های رزرو و انعطاف‌پذیری مورد نیاز بهره‌بردار سیستم را تأمین کرده‌اند.

مشترکین مجهز به کنتورهای هوشمند و تجهیزات ارتباطی، که به آن‌ها مشترکین هوشمند اطلاق شده، دارای یک پتانسیل بالقوه برای ارائه انعطاف‌پذیری به شبکه هستند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که فعال‌کردن این پتانسیل می‌تواند بخش

قابل توجهی از نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه را تأمین کند [۱۶]. در همین راستا، در مرجع [۱۷] یک استراتژی چند مرحله‌ای برای استخراج ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری از مشترکین هوشمند ارائه شده است. در این استراتژی مشترکین هوشمند و سیستم‌های توزیع ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در دسترس خود را تخمین زده و به بهره‌بردار مستقل سیستم اعلام می‌کنند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که مشترکین هوشمند توانسته‌اند با استفاده از استراتژی پیشنهادی، نقاط کار بارهای کنترل‌پذیر خود همچون سیستم تهویه مطبوع[۱۶] را تغییر داده و از این طریق انعطاف‌پذیری قابل توجهی برای شبکه فراهم کنند. در مرجع [۱۸] یک راهبرد غیرمتمرکز برای آزادسازی بالقوه انعطاف‌پذیری ساختمان‌های هوشمند ارائه شده است. در این تحقیق سیستم‌های تهویه مطبوع با شبکه هوشمند یکپارچه شده‌اند. راهبرد پیشنهادی نقطه کار سیستم‌های تهویه مطبوع را با توجه به قیمت ساعتی انرژی، نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه هوشمند و رفاه حرارتی ساختمان‌های هوشمند تعیین کرده و نتایج تأثیر راهبرد پیشنهادی برای تأمین بخش قابل توجهی از ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری شبکه‌های هوشمند از طریق سیستم‌های تهویه مطبوع درون ساختمان‌های هوشمند را تأیید می‌کنند.

برخی از پژوهش‌ها تأثیر بالای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا[۱۷] بر فعال کردن پتانسیل انعطاف‌پذیری مشترکین هوشمند را تصدیق کرده‌اند. برای مثال در مرجع [۱۹] با ارائه برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت، به مشترکین هوشمند مجهز به اینترنت اشیا[۱۸] توانسته‌اند انعطاف‌پذیری قابل توجهی از آن‌ها استخراج کنند. در این مرجع یک استراتژی برای مدیریت انرژی روز آینده ریزشبکه‌ها ارائه شده جایی که هدف بهره‌برداران ریزشبکه‌ها کاهش همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار کربن است. پیاده‌سازی این مدل بر روی یک شبکه توزیع ۸۳ شینه متشکل از ۹ ریزشبکه نشان داد که ارائه برنامه‌های پاسخگویی تقاضا به مشترکین هوشمند منجر به تأمین بخشی از ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری از طریق آن‌ها شده است. در مرجع [۲۰] نشان داده شده است که هاب‌های انرژی هوشمند با مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر تشویق توانسته‌اند شاخص‌های انعطاف‌پذیری شبکه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای ارتقاء دهند. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهند که سیستم‌های ذخیره‌ساز درون هاب‌های انرژی نقشی کلیدی را در بهره‌برداری منعطف آن‌ها ایفا می‌کنند. در مرجع [۲۱] یک استراتژی مبتنی بر ماشین یادگیری برای طراحی برنامه‌های پاسخگویی تقاضا با تعرفه‌های پویا ارائه شده است. در این مطالعه بهره‌بردار شبکه هوشمند بار مشترکین هوشمند مجهز به اینترنت اشیا و توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر را پیش‌بینی کرده و با استفاده از استراتژی طراحی برنامه‌های پاسخگویی تقاضا پیشنهادی برای مشترکین هوشمند برنامه‌های پاسخگویی تقاضا طراحی می‌کند. نتایج منعکس‌کننده تأثیر بالای استراتژی پیشنهادی بر آزادسازی پتانسیل انعطاف‌پذیری مشترکین هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء هستند. مرجع [۲۲]، با توجه به قیمت بازار انرژی، قیمت پیشنهادی توسط منابع تولید پراکنده و همچنین خودروهای الکتریکی موجود در ریزشبکه و بارهای پاسخگو، مدیریت انرژی را برای منابع تولید و ذخیره مورد مطالعه قرار داده است. برنامه‌های پاسخگویی بار مورد استفاده شامل برنامه پاسخگویی زمان استفاده و کنترل مستقیم بار می‌باشد. ساختار مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح می‌باشد که برای یک سیستم نمونه توسط نرم افزار گمز شبیه‌سازی شده است. در مرجع [۲۳]، یک روش مدیریت انرژی بهینه ریزشبکه براساس معیارهای فنی اقتصادی و زیست‌محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ ارائه شده است. ریزشبکه مورد مطالعه شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری و ژنراتور به عنوان پشتیبان است. در روش پیشنهادی هزینه سالیانه و میزان انتشار آلودگی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. مرجع [۲۴]، مدیریت انرژی و ساختار در ریزشبکه با اهدافی نظیر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهبود شاخص‌های فنی نظیر کاهش تلفات توان حقیقی صورت گرفته است. به این منظور از ابزارهایی مانند برنامه‌های پاسخگویی بار، ذخیره‌سازها، منابع تولید پراکنده مانند تولیدکننده‌های همزمان برق و حرارت، منابع تجدیدپذیر مانند واحدهای بادی و فتوولتاییک و بازآرایی فیدرهای ریزشبکه بهره گرفته شده است.

در جدول (۱)، یک مقایسه جامع میان مدل پیشنهادی در این مقاله و مدل‌های ارائه شده در مقاله‌های منتشر شده در سال‌های اخیر انجام شده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که که ظرفیت‌های بالقوه خانه‌های هوشمند برای تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع مدرن به خوبی بررسی نشده است. همان‌طور که می‌توان دید تنها یک مقاله تأثیر خانه‌های هوشمند بر بازار انعطاف‌پذیری را بررسی کرده که آن هم تنها بخش کوچکی از تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء را در نظر گرفته

است. علاوه بر این، بررسی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که کمبودهای زیادی در ارائه راهبردهای چندلایه‌ای برای بهره‌گیری از حداکثر پتانسیل ریزشبکه‌ها جهت تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم وجود دارد. متعاقباً بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر خودروهای الکتریکی بر افزایش انعطاف شبکه‌های الکتریکی تحت نفوذ منابع تجدیدپذیر نوظهور یکی دیگر از مسائلی است که کمتر به آن پرداخته شده است. به‌طور کلی، مقایسه انجام شده در جدول (۱) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مقاله تمامی موارد بالا را در قالب یک مدل جامع در نظر گرفته و تأثیر آن‌ها را بر بازار انعطاف‌پذیری بررسی کرده است. از این‌رو، در این مقاله یک استراتژی بهینه‌سازی سه‌لایه‌ای برای برنامه‌ریزی بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری یک شبکه توزیع متشکل از چندین ریزشبکه تجدیدپذیر ارائه شده که در آن تمامی کمبودهای فوق‌الذکر در بر گرفته شده است. در استراتژی پیشنهادی، تمامی منابع درون ریزشبکه‌ها همچون منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز، خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی نقش فعالی در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری دارند. خلاصه نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- معرفی یک راهبرد بهینه‌سازی سه‌لایه‌ای برای برنامه‌ریزی بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری در شبکه‌های توزیع مدرن متشکل از چندین ریزشبکه تجدیدپذیر
- فعال‌سازی ظرفیت بالقوه خانه‌های هوشمند و خودروهای الکتریکی جهت مشارکت کاملاً فعال در بازار انعطاف‌پذیری که منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های روزانه سیستم می‌شود
- تأمین ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری از منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی درون ریزشبکه‌ها به جای خرید از منابع گران شبکه بالادست

جدول (۱): مقایسه نقاط قوت مدل پیشنهادی با مقالات منتشر شده اخیر در زمینه مشابه

Table (1): Comparing the strengths of the proposed model with recent published papers in the same field

مرجع	ریزشبکه‌ها	برنامه پخش بار و قیود امنیتی شبکه	سرویس‌های خودرو به شبکه	خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیا	عدم‌قطعیت‌های بهره‌برداری	بازار انعطاف‌پذیری
[۲۵]	-	✓	-	-	✓	✓
[۲۶]	-	-	✓	-	-	✓
[۲۷]	-	-	-	-	-	✓
[۲۸]	-	✓	-	-	✓	-
[۲۹]	-	-	-	-	-	-
[۳۰]	✓	✓	-	-	✓	✓
[۳۱]	-	✓	✓	-	✓	✓
[۳۲]	-	-	✓	-	-	-
[۳۳]	-	✓	-	-	-	✓
[۱۴]	✓	✓	✓	-	-	✓
[۱۳]	✓	✓	-	-	✓	✓
[۳۴]	-	-	-	-	-	✓
[۳۵]	-	-	-	✓	-	✓
[۳۶]	✓	-	-	-	✓	✓
[۳۷]	-	✓	✓	-	✓	✓
[۳۸]	✓	-	-	-	✓	✓
[۳۹]	-	-	-	-	✓	-
[۴۰]	-	✓	-	-	✓	✓
مدل پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۲- استراتژی بهینه‌سازی سه لایه‌ای پیشنهادی

در فلوچارت ارائه شده در شکل (۱)، مراحل اجرای استراتژی سه لایه‌ای پیشنهادی را نشان می‌دهد. استراتژی پیشنهادی در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی خواهد شد و از حل‌کننده CPLEX برای حل آن استفاده می‌شود. مطابق فلوچارت، در لایه اول این استراتژی، خانه‌های هوشمند برنامه‌ریزی روز پیش‌رو وسایل قابل کنترل خود را انجام داده و سپس برنامه تبادل توان خود با ریزشبکه را به بهره‌بردار آن اطلاع می‌دهند. در لایه دوم، ریزشبکه‌ها برنامه‌ریزی روز پیش‌رو نواحی تحت پوشش خود را با توجه به برنامه‌های ارسالی خانه‌های هوشمند انجام داده و سپس برنامه تبادل توان خود را به بهره‌بردار شبکه اصلی اعلام می‌کنند. در لایه سوم، بهره‌بردار شبکه اصلی برنامه‌ریزی روز پیش‌رو ناحیه تحت پوشش و تجهیزات تولیدی و ذخیره‌ساز خود را با توجه به برنامه‌های اعلامی ریزشبکه‌ها انجام داده و ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز شبکه اصلی را محاسبه می‌کند. شایان ذکر است که ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم تابعی از برنامه‌ریزی مشترکین نهایی و ریزشبکه‌ها هستند. در نهایت، بهره‌بردار شبکه اصلی ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز را به خانه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها اعلام کرده تا برنامه‌ریزی خود را مجدداً با توجه به ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری سیستم، انجام دهند. بنابراین، لایه‌های ۱ تا ۳ مجدداً با در نظر گرفتن بازار انعطاف‌پذیری حل می‌شوند. سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی مسئله دارای پردازشگر Core i7، رم ۱۶ گیگ و یک حافظه SSD ۵۰۰ GB است. یکی از نقاط قوت استراتژی پیشنهادی، محاسبه ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز شبکه اصلی با توجه به برنامه‌ریزی اولیه خانه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها است که دقت برنامه‌ریزی و تخصیص ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری را بالا می‌برد. همچنین قابل ذکر است که خانه‌های هوشمند با برنامه‌ریزی مجدد وسایل کنترل‌پذیر، خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌ساز خود می‌توانند انعطاف زیادی به شبکه ارائه کنند. از سوی دیگر ریزشبکه‌ها نیز با برنامه‌ریزی مجدد منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز تحت کنترل خود می‌توانند سهم بالایی در تأمین ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری داشته است.

۳- فرمولاسیون ریاضی استراتژی پیشنهادی

فرمولاسیون ریاضی استراتژی بهینه‌سازی سه-سطحی پیشنهادی در این بخش در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح مدل می‌شود. در استراتژی پیشنهادی، عدم‌قطعیت‌های مرتبط با توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، خانه‌های هوشمند، ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع اصلی بهره‌برداری خود را به شیوه تصادفی مبتنی بر سناریو[۱۹] انجام می‌دهند. در معادله‌های (۱) تا (۸) خودروهای الکتریکی تحت مالکیت خانه‌های هوشمند، که قادر به تبادل توان دوطرفه (شارژ/ دشارژ) با ریزشبکه‌ها هستند، مدل می‌شوند. در این راستا معادله‌های (۱) و (۲) مقادیر شارژ و دشارژ ساعتی باتری خودرو را محدود می‌کنند. مقدار متغیر باینری در زمان شارژ باتری برابر با ۱ می‌شود در حالی که مقدار متغیر باینری در زمان دشارژ برابر با ۱ می‌گردد. قید (۳) شارژ و دشارژ همزمان باتری خودرو را برای کاربر ممنوع می‌کند. قید (۴) تنها در صورت حضور خودرو در پارکینگ به کاربر اجازه شارژ/ دشارژ باتری خودرو را می‌دهد. سطح انرژی باتری خودرو به سطح انرژی باقی‌مانده در آن از ساعت قبل و عملیات شارژ و دشارژ در ساعت جاری وابسته هستند، همان‌طور که معادله (۵) نشان می‌دهد. قید (۶) مرزهای بالایی و پایینی سطح انرژی باتری خودرو را تعیین کرده، در حالی که قیدهای (۷) و (۸) به ترتیب سطح انرژی باتری خودرو را در ساعات ورود و خروج به/از پارکینگ تعیین می‌کنند. سطح انرژی خودرو i در زمان ورود به پارکینگ که یک پارامتر ورودی است. سطح انرژی خودرو i در هنگام خروج از پارکینگ را تعیین کرده که مقدار آن ۹۵ درصد ظرفیت باتری است.

$$0 \le P_{i,t,s}^{C,EV} \le P_i^{CMax,EV} i_{i,t,s}^{C,EV} \quad (۱)$$

$$0 \le P_{i,t,s}^{D,EV} \le P_i^{DMax,EV} i_{i,t,s}^{D,EV} \quad (۲)$$

$$i_{i,t,s}^{C,EV} + i_{i,t,s}^{D,EV} \le 1 \quad (۳)$$

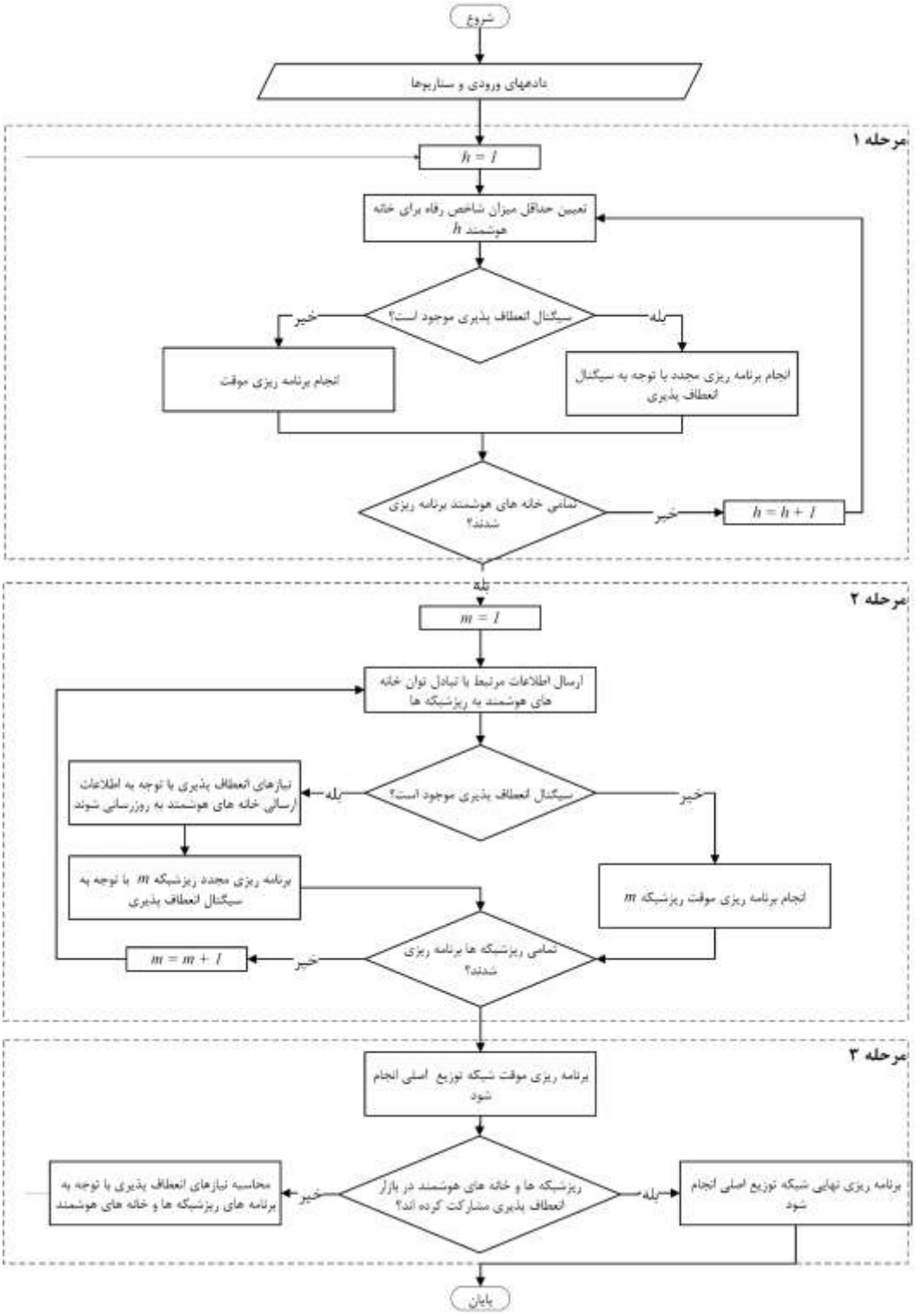
$$i_{i,t,s}^{C,EV} + i_{i,t,s}^{D,EV} = 0 \quad (۴)$$

$$E_{i,t,s}^{EV} = E_{i,t-1,s}^{EV} + \eta^C P_{i,t,s}^{C,EV} \Delta t - \frac{P_{i,t,s}^{D,EV}}{\eta^D} \Delta t \quad (۵)$$

$$E_i^{EV,Min} \le E_{i,t,s}^{EV} \le E_i^{EV,Max} \quad (۶)$$

$$E_{i,t=t_i^{ar},s}^{EV} = E_{i,s}^{EV,Initial} \quad (۷)$$

$$E_{i,t=t_i^{dp},s}^{EV} = E_{i,s}^{EV,Final} \quad (۸)$$



شکل (۱): فلوچارت استراتژی بهینه‌سازی سه‌لایه‌ای پیشنهادی در این مقاله

Figure (1): The flowchart of the three-layer optimization strategy proposed in this paper

وسایل خانه‌های هوشمند که توسط استراتژی اینترنت اشیاء کنترل می‌شوند، توسط معادله‌های (۹) تا (۱۶) مدل می‌شوند. در این راستا، معادله (۹) انرژی مطرفی ساعتی هر وسیله را محاسبه می‌کند. در معادله (۱۰) بهره‌برداری کامل از هر وسیله تضمین می‌شود. به عبارت دیگر ساعت روشن و خاموش شدن هر وسیله را تعیین می‌کنند. معادله‌های (۱۱) و (۱۲) برای تعیین پرچم[۲۰] روشن و خاموش بودن هر تجهیز در مدل گنجانده می‌شوند. معادله (۱۳) از ایجاد وقفه در بهره‌برداری وسایل جلوگیری می‌کند. به عبارتی دیگر، این معادله پیوستگی بهره‌برداری از هر تجهیز را تضمین می‌کند. معادله (۱۴) فاصله زمانی مجاز برای فعال شدن تجهیزات وابسته را مدل می‌کند. معادله (۱۵) شاخص رفاه ساکنین[۲۱] را بر اساس تفاضل میان برنامه نهایی شده خانه‌های هوشمند و برنامه ترجیحی آن‌ها محاسبه کرده و در نهایت، قید (۱۶) حداقل میزان مجاز شاخص رفاه ساکنین را تعیین می‌کند.

$$P_{i,t,n,s}^{SH,App}\Delta t=\frac{E_n^{SH,App}}{T_n^{SH,App}}i_{i,t,n,s}^{SH,App} \tag{۹}$$

$$\sum_{t=\alpha_n}^{\beta_n} i_{i,t,n,s}^{SH,App}=T_n^{SH,App} \tag{۱۰}$$

$$i_{i,t,n,s}^{S,App}-i_{i,t,n,s}^{E,App}=i_{i,t,n,s}^{SH,App}-i_{i,t-1,n,s}^{SH,App} \tag{۱۱}$$

$$i_{i,t,n,s}^{S,App}+i_{i,t,n,s}^{E,App}\le 1 \tag{۱۲}$$

$$\sum_{t=\alpha_n}^{\beta_n}\left(i_{i,t,n,s}^{S,App}+i_{i,t,n,s}^{E,App}\right)\le 2 \tag{۱۳}$$

$$i_{i,t,m,s}^{S,App}\ge i_{i,t,n,s}^{E,App}+T_{n,m}^{Gap} \tag{۱۴}$$

$$\Theta_i^{Comfort}=\frac{\sum_s \rho_s \sum_t e^{\kappa\left(P_{i,t,s}^{SH}-P_{i,t,s}^{NH}\right)^2}}{T}\times 100 \tag{۱۵}$$

$$\Theta_i^{Comfort}\ge \Theta^{Min} \tag{۱۶}$$

هر خانه هوشمند مجهز به یک سیستم ذخیره‌ساز است که بر اساس معادله‌های (۱۷) تا (۲۲) مدل می‌شود. قیدهای (۱۷) و (۱۸) به ترتیب حداقل میزان مجاز شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در زمان t را محدود می‌کنند. قید (۱۹) فعالیت سیستم ذخیره‌ساز در زمان t را تنها در یکی از حالت‌های[۲۲] شارژ یا دشارژ امکان‌پذیر می‌کند. معادله (۲۰) سطح شارژ زمان t را محاسبه می‌کند. قید (۲۱) محدودیت‌های بالایی و پایینی سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز را اعمال کرده و در نهایت قید (۲۲) سطح شارژ ساعت‌های اول و آخر را تنظیم می‌کند.

$$0\le P_{i,t,s}^{C,BESS}\le P_i^{CMax,BESS}i_{i,t,s}^{C,BESS} \tag{۱۷}$$

$$0\le P_{i,t,s}^{D,BESS}\le P_i^{DMax,BESS}i_{i,t,s}^{D,BESS} \tag{۱۸}$$

$$i_{i,t,s}^{C,BESS}+i_{i,t,s}^{D,BESS}\le 1 \tag{۱۹}$$

$$E_{i,t,s}^{BESS}=E_{i,t-1,s}^{BESS}+\eta^C P_{i,t,s}^{C,BESS}\Delta t-\frac{P_{i,t,s}^{D,BESS}}{\eta^D}\Delta t \tag{۲۰}$$

$$E_i^{BESS,Min}\le E_{i,t,s}^{BESS}\le E_i^{BESS,Max} \tag{۲۱}$$

$$E_{i,t=0,s}^{BESS}=E_{i,t=24,s}^{BESS}=E_{i,s}^{BESS,Initial} \tag{۲۲}$$

معادله (۲۳) میزان تولید توان توسط پنل‌های خورشیدی[۲۳] قرار گرفته در هر خانه هوشمند را محاسبه می‌کند. معادله (۲۴) نشان می‌دهد که تولید و مصرف توان در هر زمان در هر خانه هوشمند باید برابر باشند. در نهایت قید (۲۵) بیان می‌کند که توان خریداری شده از شبکه باید به ظرفیت کنتور محدود شود.

$$P_{i,t,s}^{PV}=\eta^{PV}S_i^{PV}G_{t,s} \tag{۲۳}$$

$$P_{i,t,s}^{SH}-P_{i,t,s}^{SH,UFlex}+P_{i,t,s}^{SH,DFlex}=P_{n,t,s}^{SH,Fix}+\sum_n P_{i,t,n,s}^{SH,App}+P_{i,t,s}^{C,EV}-P_{i,t,s}^{D,EV}-P_{i,t,s}^{PV} \tag{۲۴}$$

$$P_{i,t,s}^{SH}\le P_i^{Meter} \tag{۲۵}$$

فرمولاسیون مربوط به تجهیزات درون شبکه اصلی و ریزشبکه‌ها در این زیربخش معرفی می‌شوند. در این راستا، معادله (۲۶) یک تابع سه قسمتی ارائه کرده است که توان خروجی از توربین‌های بادی را براساس سرعت ساعتی باد محاسبه می‌کند. پنل‌های خورشیدی قرار گرفته درون ریزشبکه‌ها نیز توسط معادله (۲۷) مدل شده جایی که توان خروجی آن‌ها براساس شدت تابش خورشید محاسبه می‌شود. توربین‌های گازی نیز توسط معادله‌های (۲۸) تا (۳۰) در مدل گنجانده می‌شوند. قید (۲۸) بیان می‌کند که توان اکتیو تولیدی توربین‌های گازی باید درون یک محدوده مشخص است. معادله (۲۹) هزینه بهره‌برداری توربین‌های گازی را براساس توان تولیدی آن محاسبه می‌کند. در نهایت، قید (۳۰) سطوح بالا و پایین توان راکتیو توربین گازی را محدود می‌کند. سیستم‌های ذخیره‌ساز نیز در شبکه اصلی و ریزشبکه‌ها در نظر گرفته شده که فرمولاسیون مورد نیاز برای مدل‌سازی آن‌ها مشابه با رابطه‌های (۱۷) تا (۲۲) است.

$$P_{w,t,s}^{Wind}=\begin{cases}0 & , \ v_{t,s}<v_{ci} \quad \text{Or} \ \ v_{t,s}\geq v_{co}\\ P_{w}^{Rated}\left(\dfrac{v_{t,s}-v_{ci}}{v_{r}-v_{ci}}\right) & , \ v_{ci}\leq v_{t,s}<v_{r}\\ P_{w}^{Rated} & , \ v_{r}\leq v_{t,s}<v_{co}\end{cases} \tag{۲۶}$$

$$P_{pv,t,s}^{PV}=\eta^{PV}P_{pv}^{Rated}\frac{G_{t,s}}{G^{STC}} \tag{۲۷}$$

$$P_{g}^{GT,Min}\leq P_{g,t,s}^{GT}\leq P_{g}^{GT,Max} \tag{۲۸}$$

$$Q_{g,t,s}^{GT,Max}=\delta_{g}^{max}P_{g,t,s}^{GT} \tag{۲۹}$$

$$-Q_{g,t,s}^{GT,Max}\leq Q_{g,t,s}^{GT}\leq Q_{g,t,s}^{GT,Max} \tag{۳۰}$$

معادله‌های (۳۱) تا (۴۱) برنامه پخش بار AC خطی را در مدل می‌گنجانند تا بهره‌برداری با در نظر گرفتن قیود امنیتی انجام شود [۴۱]. معادله‌های (۳۱) و (۳۲) به ترتیب برای محاسبه پخش توان‌های اکتیو و راکتیو ارائه شدند. این معادله‌ها پخش توان‌های اکتیو و راکتیو هر خط را با توجه به اندازه و زاویه ولتاژ دو سر آن و همچنین مقادیر سوسپتانس و کندوکتانس محاسبه می‌کنند. قید (۳۳) محدودیت امنیتی مربوط به عبور توان‌های اکتیو و راکتیو را اعمال می‌کند. معادله (۳۴) جریان خط l را براساس پخش توان‌های اکتیو و راکتیو محاسبه کرده در حالی که معادله (۳۵) تلفات توان هر خط را با توجه به جریان آن محاسبه می‌کند. قیدهای (۳۶) و (۳۷) در مدل گنجانده شده تا اندازه ولتاژ و زاویه آن را در یک محدوده امن نگه دارند. معادله‌های (۳۸) و (۳۹) تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در ریزشبکه‌ها را تضمین می‌کنند. معادله (۳۸) نشان می‌دهند که مجموع توان‌های اکتیو تولید شده توسط توربین‌های گازی و پنل‌های خورشیدی، توان ورودی ریزشبکه، توان دشارژ شده توسط سیستم‌های ذخیره‌ساز و توان اختصاص داده شده به بازار انعطاف‌پذیری پایین باید برابر با مجموع توان‌های مصرف شده در ناحیه سرویس‌دهی ریزشبکه‌ها، توان‌های شارژ شده در سیستم‌های ذخیره‌ساز، توان اختصاص داده شده با بازار انعطاف‌پذیری بالا و توان خروجی از ریزشبکه‌ها است. در این معادله همچنین تلفات توان در نظر گرفته شده است. معادله‌های (۴۰) و (۴۱) نیز به ترتیب تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو را در شبکه توزیع اصلی برقرار می‌کنند.

$$P_{l,t,s}^{line}=\left[GL_{l}\left(V_{i,t,s}-V_{j,t,s}\right)+BL_{l}\left(\theta_{i,t,s}-\theta_{j,t,s}\right)\right]S^{base} \tag{۳۱}$$

$$Q_{l,t,s}^{line}=\left[BL_{l}\left(V_{i,t,s}-V_{j,t,s}\right)-GL_{l}\left(\theta_{i,t,s}-\theta_{j,t,s}\right)\right]S^{base} \tag{۳۲}$$

$$\left(P_{l,t,s}^{line}\right)^{2}+\left(Q_{l,t,s}^{line}\right)^{2}\leq\left(S_{l}^{Line,Max}\right)^{2} \tag{۳۳}$$

$$\left(I_{l,t,s}^{Line}\right)^{2}=\left(P_{l,t,s}^{Line}\right)^{2}+\left(Q_{l,t,s}^{Line}\right)^{2} \tag{۳۴}$$

$$P_{l,t,s}^{Loss}=r_{l}\left(I_{l,t,s}^{Line}\right)^{2} \tag{۳۵}$$

$$V^{Min}\leq V_{i,t,s}\leq V^{Max} \tag{۳۶}$$

$$\theta^{Min}\leq\theta_{i,t,s}\leq\theta^{Max} \tag{۳۷}$$

$$\sum_{l}\left[\left(\varphi_{l,mg}P_{l,t,s}^{Line}\right)-P_{mg,t,s}^{MG,UFlex}+P_{mg,t,s}^{MG,DFlex}\right]+\sum_{g\in\Pi_{(i,mg)}^{g}}P_{g,t,s}^{GT}+\sum_{pv\in\Pi_{(i,mg)}^{pv}}P_{pv,t,s}^{PV}$$
$$+\sum_{e\in\Pi_{(i,mg)}^{e}}\left(P_{e,t,s}^{D,DES}-P_{e,t,s}^{C,DES}\right)=\sum_{i\in\Pi_{mg}^{i}}\left(P_{i,t,s}^{SH}-P_{i,t,s}^{SH,UFlex}+P_{i,t,s}^{SH,DFlex}\right)+\sum_{i\in\Pi_{mg}^{i}}P_{i,t,s}^{NH} \tag{۳۸}$$
$$+\sum_{l\in\Pi_{mg}^{l}}\left(\varpi_{l,(i,mg)}P_{l,t,s}^{Line}+\frac{P_{l,t,s}^{Loss}}{2}\right)$$

$$\sum_{l}\left(\varphi_{l,mg}Q_{l,t,s}^{Line}\right)+\sum_{g\in\Pi_{(i,mg)}^{g}}Q_{g,t,s}^{GT}=\sum_{i\in\Pi_{mg}^{i}}\left(\xi_{i}P_{i,t,s}^{SH}\right)+\sum_{i\in\Pi_{mg}^{i}}\left(\xi_{i}P_{i,t,s}^{NH}\right)$$
$$+\sum_{l\in\Pi_{mg}^{l}}\left(\varpi_{l,(i,mg)}Q_{l,t,s}^{Line}\right) \tag{۳۹}$$

$$\left(P_{t,s}^{UG}+P_{t,s}^{UG,UFlex}-P_{t,s}^{UG,DFlex}\right)\Big|_{i=1}+\sum_{g\in\Pi_{i}^{g}}P_{g,t,s}^{GT}+\sum_{w\in\Pi_{i}^{w}}P_{w,t,s}^{Wind}+\sum_{e\in\Pi_{i}^{e}}\left(P_{e,t,s}^{D,DES}-P_{e,t,s}^{C,DES}\right)$$
$$=P_{i,t,s}^{NH}+\sum_{l\in\Pi_{i}^{l}}\left(\varpi_{l,i}P_{l,t,s}^{Line}+\frac{P_{l,t,s}^{Loss}}{2}\right)+\sum_{mg\in\Pi_{i}^{mg}}\sum_{l}\left[\left(\varphi_{l,mg}P_{l,t,s}^{Line}\right)-P_{mg,t,s}^{MG,UFlex}+P_{mg,t,s}^{MG,DFlex}\right] \tag{۴۰}$$

$$Q_{t,s}^{UG}\Big|_{i=1}+\sum_{g\in\Pi_{i}^{g}}Q_{g,t,s}^{GT}=\xi_{i}\left(P_{i,t,s}^{SH}+P_{i,t,s}^{NH}\right)+\sum_{l\in\Pi_{i}^{l}}\left(\varpi_{l,i}Q_{l,t,s}^{Line}\right) \tag{۴۱}$$

تابع هدف لایه اول استراتژی پیشنهادی در معادله (۴۲) ارائه شده است، که توسط آن هزینه بهره‌برداری خانه‌های هوشمند کمینه‌سازی می‌شود. مطابق این معادله، سود ناشی از مشارکت خانه‌های هوشمند در بازار انعطاف‌پذیری از هزینه‌های تبادل انرژی آن‌ها با شبکه کسر می‌شود. در انتهای این مرحله اطلاعات میزان مشارکت خانه‌های هوشمند در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری برای بهره‌بردار ریزشبکه‌ها ارسال می‌شود.

$$\min Z_{i,s}^{S1}=\sum_{t}\left(\lambda_{t}^{UG}P_{i,t,s}^{SH}\right)-\sum_{t}\left[\lambda_{t}^{Flex}\left(P_{i,t,s}^{SH,UFlex}+P_{i,t,s}^{SH,DFlex}\right)\right] \tag{۴۲}$$

در لایه دوم، بهره‌بردار هر ریزشبکه بهره‌برداری ناحیه خود را با توجه به اطلاعات خانه‌های هوشمند انجام می‌دهد. مطابق معادله (۴۳) تابع هدف بهره‌بردار ریزشبکه کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری است. همان‌طور که می‌توان دید هزینه‌های مرتبط با تبادل توان با شبکه اصلی، تخریب سیستم‌های ذخیره‌ساز و تولید توربین‌های گازی، و همچنین سود ناشی از مشارکت در بازارهای انعطاف‌پذیری در تابع هدف بهره‌بردار ریزشبکه گنجانده شده است. در انتهای این مرحله اطلاعات مشارکت ریزشبکه‌ها در بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری برای بهره‌بردار شبکه اصلی ارسال می‌شوند.

$$\min Z_{mg,s}^{S2}=\sum_{t}\lambda_{t}^{UG}\left[\sum_{l\in\Pi_{mg}^{l}}\left(\varphi_{l,mg}P_{l,t,s}^{Line}\right)\right]\Delta t+\sum_{t}\sum_{g\in\Pi_{mg}^{g}}\left(\lambda_{g}^{GT}P_{g,t,s}^{GT}\right)\Delta t$$
$$+\sum_{t}\sum_{e\in\Pi_{mg}^{e}}\lambda^{S}\left(P_{e,t,s}^{C,DES}+P_{e,t,s}^{D,DES}\right)\Delta t+\sum_{i\in\Pi_{mg}^{i}}\sum_{t}\left[\lambda_{t}^{Flex}\left(P_{i,t,s}^{SH,UFlex}+P_{i,t,s}^{SH,DFlex}\right)\right]\Delta t \tag{۴۳}$$
$$-\sum_{t}\left[\lambda_{t}^{Flex}\left(P_{mg,t,s}^{MG,UFlex}+P_{mg,t,s}^{MG,DFlex}\right)\right]\Delta t$$

در لایه سوم استراتژی پیشنهادی، بهره‌بردار شبکه اصلی ابتدا نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم را با توجه به اطلاعات دریافتی از ریزشبکه‌ها محاسبه کرده و سپس بهره‌برداری ناحیه خود را با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری انجام می‌دهد. در مدل پیشنهادی این مقاله، بهره‌بردار کمبود ظرفیت‌های رمپ سیستم را از طریق اجرای یک بازار انعطاف‌پذیری تأمین می‌کند. برای این هدف، بهره‌بردار خالص توان مورد نیاز محدوده سرویس‌دهی خود را با ظرفیت رمپ نیروگاه‌ها مقایسه کرده و در صورت کمبود ظرفیت، سیگنال انعطاف‌پذیری را به ریزشبکه‌ها و خانه‌های هوشمند ارسال می‌کند. در همین راستا ریزشبکه‌ها و خانه‌های هوشمند با تغییر برنامه‌ریزی خود منحنی تقاضای بار و نقطه کار تجهیزات خود را تغییر داده تا از این طریق کمبود ظرفیت رمپ

نیروگاه‌ها را جبران کنند. به عبارت دیگر، با تغییر منحنی تقاضای مشترکین، سیستم به ظرفیت رمپ کمتری نیاز خواهد داشت. این محدودیت‌ها به دلیل ظرفیت‌های رمپ بالارونده و پایین‌رونده[۲۴] محدود نیروگاه‌ها هستند.

در راستای توضیحات بالا، معادله (۴۴) خالص توان[۲۵] شبکه اصلی با توجه به بار کل سیستم و خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر محاسبه می‌کند. معادله (۴۵) نیازهای انعطاف‌پذیری بالا و پایین سیستم را با توجه به شیب تغییرات منحنی خالص توان در دو ساعت متوالی، محاسبه می‌کند. قیدهای (۴۶) تا (۴۸) بیان می‌کنند که در هر زمان تنها یکی از متغیرهای مربوط به انعطاف‌پذیری بالا یا پایین می‌توانند مقدار بگیرند. در معادله (۴۹) تابع هدف شبکه اصلی ارائه شده که شامل هزینه‌های مرتبط با تبادل توان از شبکه بالادست و ریزشبکه‌ها، هزینه‌های تولید توان توسط توربین‌های گازی، هزینه تخریب سیستم‌های ذخیره‌ساز و هزینه‌های پرداختی برای تأمین ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم است. مطابق این معادله، بهره‌بردار شبکه اصلی می‌تواند نیازهای انعطاف‌پذیری خود را از طریق ریزشبکه‌ها و شبکه بالادست تأمین کند. در ضمن بهره‌بردار شبکه اصلی ترجیح می‌دهد ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز خود را از ریزشبکه‌ها بخرد از آنجایی که هزینه خرید سرویس‌های انعطاف‌پذیری از آن‌ها ارزان‌تر از شبکه بالادست است.

$$P_{t,s}^{Net} = \sum_{i}\left[P_{i,t,s}^{NH} + \sum_{mg\in\Pi_i^{mg}}\sum_{l}\left(\varphi_{l,mg}P_{l,t,s}^{Line}\right)\right] - \sum_{w}P_{w,t,s}^{Wind} - \sum_{pv}P_{pv,t,s}^{PV} \tag{۴۴}$$

$$P_{t,s}^{R,UFlex} - P_{t,s}^{R,DFlex} = P_{t,s}^{Net} - P_{t-1,s}^{Net} \tag{۴۵}$$

$$P_{t,s}^{R,UFlex} \le I_{t,s}^{R,UFlex}M \tag{۴۶}$$

$$P_{t,s}^{R,DFlex} \le I_{t,s}^{R,DFlex}M \tag{۴۷}$$

$$I_{t,s}^{R,UFlex} + I_{t,s}^{D,UFlex} \le 1 \tag{۴۸}$$

$$\begin{aligned}\min Z_s^{S3} = &\sum_{t}\left(\lambda_t^{UG}P_{t,s}^{UG}\right)\Delta t + \sum_{t}\sum_{g\in\Pi_i^{g}}\left(\lambda_g^{GT}P_{g,t,s}^{GT}\right)\Delta t + \sum_{t}\sum_{e\in\Pi_i^{e}}\lambda^{S}\left(P_{e,t,s}^{C,DES} + P_{e,t,s}^{D,DES}\right)\Delta t \\ &+ \sum_{t}\left[\lambda_t^{Flex}\left(P_{mg,t,s}^{MG,UFlex} + P_{mg,t,s}^{MG,DFlex}\right)\right]\Delta t + \sum_{t}\left[\lambda_t^{Flex-UG}\left(P_{t,s}^{UG,UFlex} + P_{t,s}^{UG,DFlex}\right)\right]\Delta t\end{aligned} \tag{۴۹}$$

۴- شبیه‌سازی استراتژی پیشنهادی

در این بخش عملکرد استراتژی بهینه‌سازی چندلایه‌ای پیشنهادی با پیاده‌سازی بر روی یک سیستم توزیع ۸۳ شینه متشکل از چهار ریزشبکه ارزیابی می‌شود. در این راستا، استراتژی پیشنهادی در شش مورد مطالعاتی مختلف در محیط گمز پیاده‌سازی شده تا جنبه‌های فنی و اقتصادی آن به‌طور مفصل بررسی شوند.

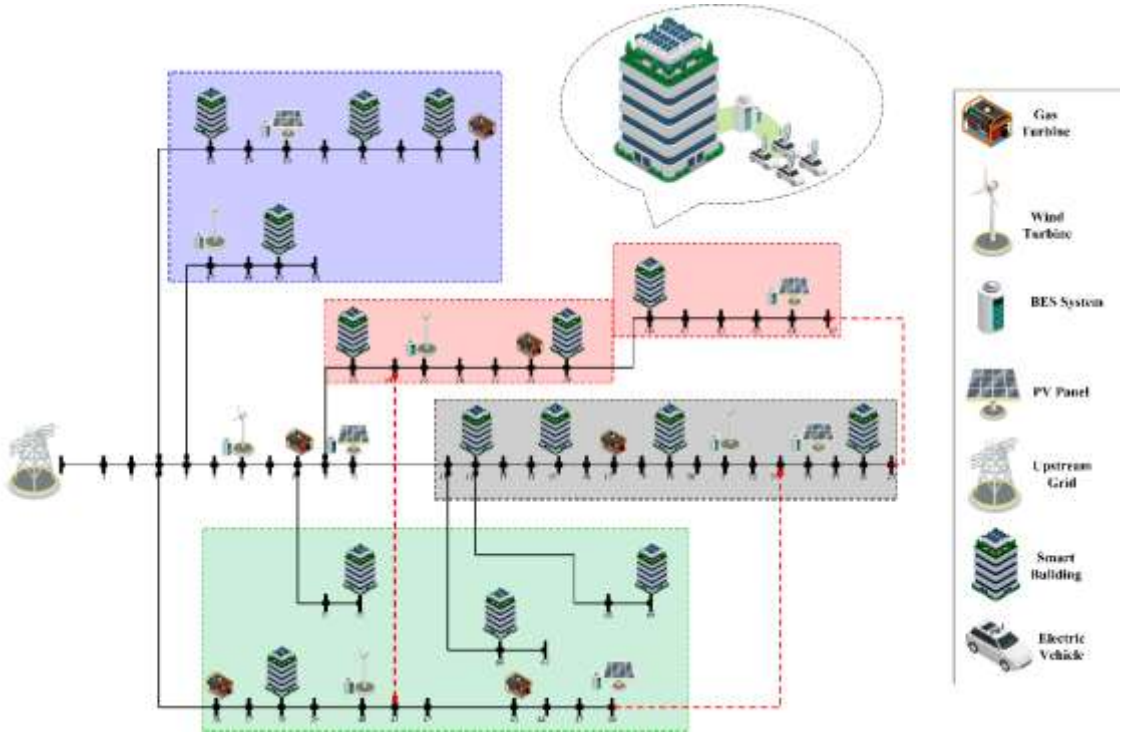
در شکل (۲) ساختار سیستم توزیع ۸۳ شینه تحت مطالعه در این مقاله به تصویر کشیده شده است. هر ریزشبکه با یک رنگ جداگانه نشان داده شده و دارای منابع انرژی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر است. مکان و تعداد خانه‌های هوشمند در هر شین نیز در شکل (۲) نشان داده شده است. هر خانه هوشمند دارای یک پنل خورشیدی، سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی و یک خودرو الکتریکی بوده و پیک بار آن ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است. جدول (۲) اطلاعات مربوط به موارد مطالعاتی را نشان داده است. مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی خانه‌های هوشمند و تجهیزات شبکه مطابق با مرجع [۴۲] است.

در شکل‌های (۳-الف) تا (۳-ج) سناریوهای مربوط به تقاضای بار در ریزشبکه‌ها نشان داده شده‌اند. سناریوهای مرتبط با تقاضای بار شبکه اصلی نیز در شکل (۳-ب) نمایش داده شده‌اند. سناریوهای تقاضای بار در خانه‌های معمولی و هوشمند مشابه بوده و در شکل (۳-ج) ارائه شده‌اند. قابل توجه است که خانه‌های هوشمند با تغییر برنامه پیش‌فرض وسایل قابل‌کنترل خود قادر به تغییر شکل منحنی بار خود هستند. در نهایت، شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب سناریوهای سرعت باد و تابش خورشید را ارائه می‌دهند. در ضمن سناریوهای مرتبط با بار، باد و تابش به ترتیب از طریق تابع توزیع گوسی، تابع ویبول[۲۶] و تابع بتا[۲۷] تولید شده‌اند [۴۳].

جدول (۲): اطلاعات مربوط به موارد مطالعاتی

Table (2): Information about case studies

مورد مطالعاتی	تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری					
	شبکه بالادست	منابع درون ریزشبکه‌ها				
		واحدهای تولید پراکنده	سیستم‌های ذخیره‌ساز	خانه‌های هوشمند		خودروهای الکتریکی
				حداقل رفاه برابر با ۹۰ درصد	حداقل رفاه برابر با ۸۰ درصد	
۱	✓	×	×	×	×	×
۲	✓	✓	×	×	×	×
۳	✓	✓	✓	×	×	×
۴	✓	✓	✓	✓	×	×
۵	✓	✓	✓	×	✓	×
۶	✓	✓	✓	×	✓	✓

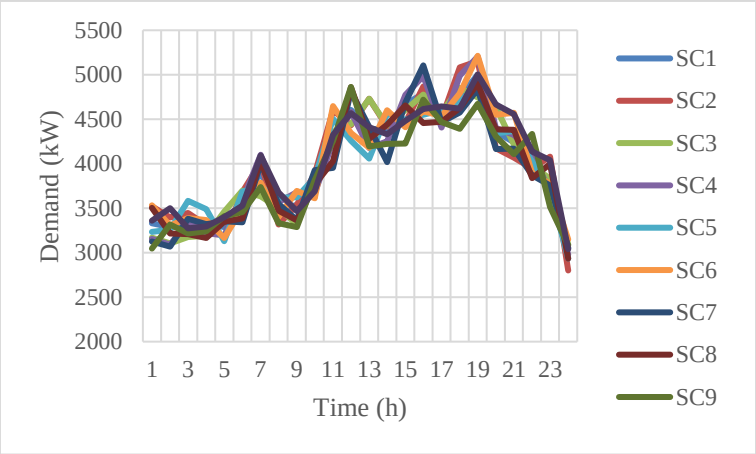


شکل (۲): ساختار شبکه توزیع ۸۳ شینه تحت مطالعه در این مقاله

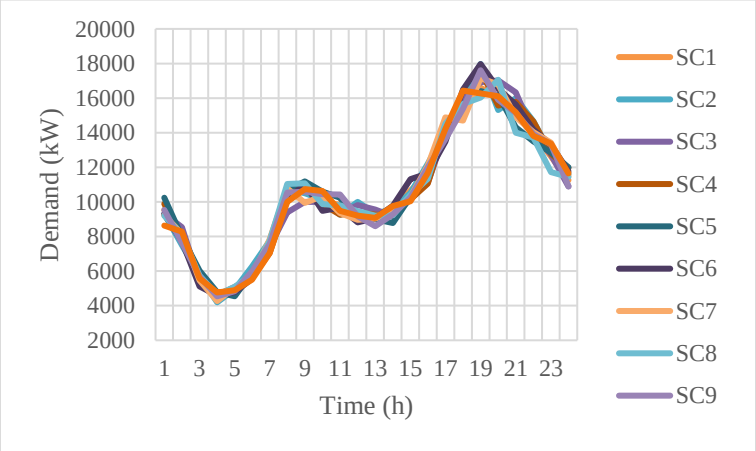
Figure (2): The distribution network structure of 83 bus under study in this paper

نتایج حاصل از شبیه‌سازی موارد مطالعاتی ۱ و ۲ به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده‌اند. ارزیابی نتایج ارائه شده در این جدول‌ها نشان می‌دهد که هزینه‌های روزانه کل سیستم در مورد مطالعاتی دوم نسبت به مورد مطالعاتی اول پایین آمده که دلیل این امر مشارکت واحدهای تولید پراکنده درون ریزشبکه‌ها در بازار انعطاف‌پذیری است. واحدهای تولید پراکنده واقع در ریزشبکه‌ها سرویس‌های انعطاف‌پذیری را با قیمت کمتری نسبت به شبکه بالادست می‌فروشند. در واقع بهره‌بردار شبکه اصلی بخشی از ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری سیستم را به جای منابع گران شبکه بالادست از منابع مقرون به‌صرفه درون ریزشبکه‌ها تأمین کرده است. بررسی نتایج عددی جدول (۴) نشان می‌دهند که ریزشبکه‌ها توانسته‌اند از مشارکت در بازار انعطاف‌پذیری سود مناسبی کسب کنند. دلیل سود پایین‌تر ریزشبکه‌های ۲ و ۴ در مقایسه با ریزشبکه‌های ۱ و ۳ ظرفیت آزاد کمتر واحدهای تولید پراکنده آن‌ها برای اختصاص به بازار انعطاف‌پذیری است. این نکته قابل ذکر است که قیمت فروش سرویس‌های انعطاف‌پذیری بیشتر از قیمت فروش انرژی است. نتایج جدول (۴) نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مجموع هزینه‌های روزانه

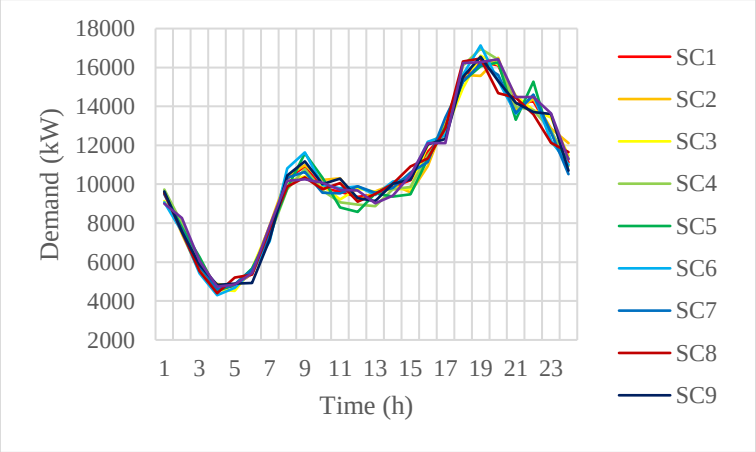
ریزشبکه‌ها در مورد مطالعاتی دوم نسبت به مورد مطالعاتی اول هستند. شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری را به ترتیب در موارد مطالعاتی اول و دوم به تصویر کشیده‌اند. مطابق شکل (۵-الف) در مورد مطالعاتی اول اکثر ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز بهره‌بردار شبکه اصلی، از طریق خرید از شبکه بالادست تأمین شده و تنها کمی از آن‌ها در برخی از ساعت‌ها توسط سیستم‌های ذخیره‌ساز درون شبکه اصلی تأمین شده‌اند.



(الف) تقاضای بار ریزشبکه‌ها



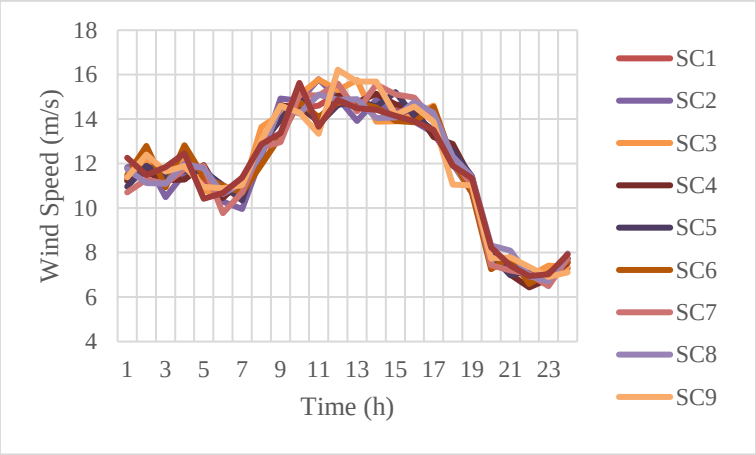
(ب) تقاضای بار شبکه اصلی



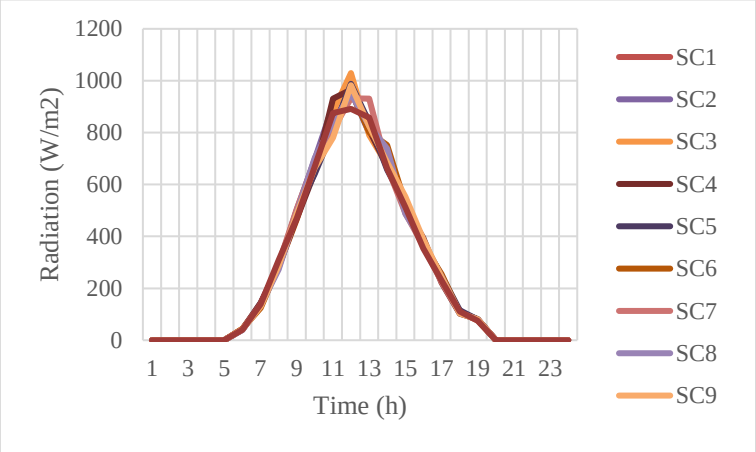
(ج) تقاضای بار خانه‌های هوشمند

شکل (۳): سناریوهای مرتبط با تقاضای بار ریزشبکه‌ها، شبکه اصلی و خانه‌های هوشمند

Figure (3): Scenarios related to load demand of microgrids, main grid and smart homes, a) Microgrid load demand, b) Main network load demand, C) Smart home load demand



(الف) سرعت باد



(ب) تابش خورشید

شکل (۴): سناریوهای مرتبط با سرعت باد و تابش خورشید

Figure (4): Scenarios related to wind speed and solar radiation, a) Wind speed, b) Solar radiation

در مقابل، شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که مشارکت واحدهای تولید پراکنده درون سیستم توزیع در بازار انعطاف‌پذیری سهم شبکه بالادست را در این بازار کم کرده و متعاقباً منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود. جدول (۵) نتایج شبیه‌سازی مورد مطالعاتی سوم را ارائه می‌کند. در مورد مطالعاتی سوم، علاوه بر واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز نیز در بازار انعطاف‌پذیری مشارکت می‌کنند. نتایج عددی جدول (۵) نشان‌دهنده کاهش قابل توجه هزینه‌های روزانه سیستم در مورد مطالعاتی دوم نسبت به مورد مطالعاتی اول است، که دلیل آن سهم بیشتر منابع ارزان درون ریزشبکه‌ها در تأمین ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری است. شکل (۶) تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در مورد مطالعاتی سوم را نشان داده که مقایسه آن با شکل (۵-ب) تأییدکننده سهم بالاتر منابع درون ریزشبکه‌ها در بازار انعطاف‌پذیری است. شکل‌های (۷-الف) تا (۷-ی) نقطه کار سیستم‌های ذخیره‌ساز درون ریزشبکه‌ها را در موارد مطالعاتی دوم و سوم مقایسه می‌کند، که آنالیز آن‌ها نشان می‌دهد که رفتار سیستم‌های ذخیره‌ساز در مورد مطالعاتی سوم هم‌راستا با نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم تغییر کرده است. مطابق این شکل‌ها، سیستم‌های ذخیره‌ساز در مورد مطالعاتی سوم، در دوره‌هایی که انعطاف‌پذیری بالارونده[۲۸] نیاز است شارژ شده و در مقابل در دوره‌هایی که انعطاف‌پذیری پایین‌رونده[۲۹] مورد نیاز است، دشارژ شده‌اند. جدول‌های (۶) تا (۸) به ترتیب نتایج عددی به‌دست آمده از شبیه‌سازی موارد مطالعاتی چهارم تا ششم را ارائه می‌کنند. در موارد مطالعاتی چهارم و پنجم، خانه‌های هوشمند نیز در کنار واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز در بازار انعطاف‌پذیری مشارکت می‌کنند. حداقل شاخص رفاه در مورد مطالعاتی چهارم بر روی نود درصد تنظیم شده در حالی که در مورد مطالعاتی پنجم بر روی هشتاد درصد تنظیم شده است. نتایج ارائه شده در جدول‌های

(۶) و (۷) منعکس می‌کنند که مشارکت خانه‌های هوشمند در بازار انعطاف‌پذیری، هزینه‌های روزانه سیستم را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است که دلیل این امر تأمین ارزان‌تر ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در این موارد مطالعاتی است.

مطابق جدول‌های (۶) و (۷) خانه‌های هوشمند در مورد مطالعاتی پنجم نسبت به مورد مطالعاتی ششم سهم بیشتری در بازار انعطاف‌پذیری داشته‌اند، زیرا حداقل شاخص رفاه آن‌ها در مورد مطالعاتی پنجم بر روی هشتاد درصد تنظیم شده و بنابراین ساکنین خانه‌های هوشمند بازه بزرگتری برای برنامه‌ریزی وسایل قابل‌کنترل خود دارند. شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری را به ترتیب در موارد مطالعاتی چهارم و پنجم نشان می‌دهند، که بررسی آن‌ها تأییدکننده سهم بالاتر خانه‌های هوشمند در بازار انعطاف‌پذیری در مورد مطالعاتی پنجم است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از مورد مطالعاتی ششم در جدول (۸) ارائه شده است. در مورد مطالعاتی ششم، خودروهای الکتریکی متعلق به ساکنین خانه‌های هوشمند نیز در بازار انعطاف‌پذیری مشارکت می‌کنند.

جدول (۳): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی اول

Table (3): Numerical results from the simulation of the first study case

مورد مطالعاتی اول	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۲۱۶۲/۶	۶۵/۱	۱۱۰۸۴/۵	۰	-۶۳۱۲۲/۳	-۳۹۸۱۰/۰	۲۷۶۶۶/۱	۰
ریزشبکه ۲	۷۶۰۱/۶	۶۰/۸	۲۱۶۸۰/۹	۰	-۶۴۰۷۸/۴	-۳۴۷۳۵/۲	۲۰۸۱۲/۵	۰
ریزشبکه ۳	۱۲۱۶۲/۶	۵۶/۴	۱۷۱۲۸/۲	۰	-۶۴۸۹۶/۲	-۳۵۵۴۸/۹	۱۷۲۳۰/۸	۰
ریزشبکه ۴	۷۶۰۱/۶	۶۹/۵	۳۲۰۷۲/۴	۰	-۶۷۷۵۲/۳	-۲۸۰۰۸/۸	۱۶۵۷۲/۵	۰
شبکه اصلی	۴۹۴۲/۵	۵۶/۵	۶۴۹۹۱/۵	۷۶۷۰۹/۳	-۲۳۶۸۰۶/۰	-۹۰۱۰۶/۲	۰	۰
مجموع	۴۴۴۷۱/۰	۳۰۸/۳	۱۴۶۹۵۷/۶	۷۶۷۰۹/۳	-۴۹۶۶۵۵/۱	-۲۲۸۲۰۹/۰	۸۲۲۸۱/۹	

جدول (۴): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی دوم

Table (4): Numerical results from the simulation of the second study case

مورد مطالعاتی دوم	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۰۶۵۱/۸	۶۵/۱	۱۳۹۲۵/۳	-۸۷۰۶/۳	-۶۳۱۲۲/۳	-۴۷۱۸۶/۳	۲۷۶۶۶/۱	۰
ریزشبکه ۲	۶۸۲۷/۷	۶۰/۸	۲۳۱۷۶/۱	-۶۱۱۱/۹	-۶۴۰۷۸/۴	-۴۰۱۲۵/۷	۲۰۸۱۲/۵	۰
ریزشبکه ۳	۱۰۶۷۵/۱	۵۶/۴	۱۹۹۱۸/۱	-۱۱۸۱۹/۲	-۶۴۸۹۶/۲	-۴۶۰۶۵/۸	۱۷۲۳۰/۸	۰
ریزشبکه ۴	۶۸۲۸/۲	۶۹/۵	۳۳۵۷۱/۹	-۶۴۴۵/۰	-۶۷۷۵۲/۳	-۳۳۷۲۷/۷	۱۶۵۷۵/۵	۰
شبکه اصلی	۵۲۲۶/۰	۴۷/۲	۷۳۱۵۵/۲	۷۰۶۲۱/۵	-۲۴۵۴۳۱/۴	-۹۶۳۸۱/۴	۰	۰
مجموع	۴۰۲۰۸/۸	۲۹۹/۰	۱۶۳۷۴۶/۷	۳۷۵۳۹/۱	-۵۰۵۲۸۰/۵	۲۶۳۴۸۶/۹	۸۲۲۸۱/۹	

جدول (۵): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی سوم

Table (5): Numerical results from the simulation of the third study case

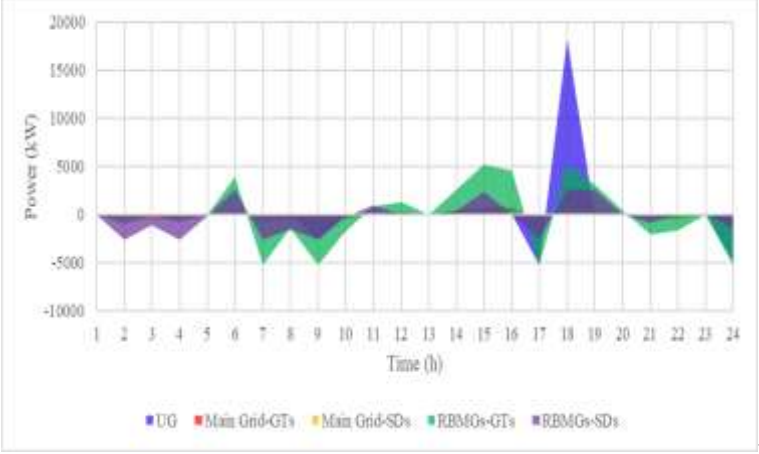
مورد مطالعاتی سوم	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۰۹۶۱/۷	۲۹/۵	۱۳۱۹۹/۱	-۱۱۶۴۳/۰	-۶۳۱۲۲/۳	-۵۰۵۷۵/۰	۲۷۶۶۶/۱	۰
ریزشبکه ۲	۷۴۱۰/۷	۲۵/۲	۲۲۲۳۷/۴	-۹۰۱۸/۶	-۶۴۰۷۹/۶	-۴۳۴۲۴/۹	۲۰۸۱۳/۷	۰
ریزشبکه ۳	۱۰۹۴۱/۲	۲۱/۷	۱۹۴۰۴/۱	-۱۲۵۳۲/۲	-۶۴۸۹۶/۲	-۴۷۰۶۱/۳	۱۷۲۳۰/۸	۰
ریزشبکه ۴	۷۴۶۳/۴	۳۵/۹	۳۲۵۳۰/۵	-۸۷۹۸/۳	-۶۷۷۵۲/۳	-۳۶۵۲۰/۸	۱۶۵۷۲/۵	۰
شبکه اصلی	۵۸۶۲/۴	۴۳/۶	۶۸۷۵۷/۲	۶۹۱۷۵/۷	-۲۴۲۲۱۱/۰	-۹۸۳۷۲/۱	۰	۰
مجموع	۴۲۶۳۹/۴	۱۵۵/۸	۱۵۶۱۲۸/۲	۲۷۱۸۳/۶	-۵۰۲۰۶۱/۳	-۲۷۵۹۵۴/۲	۸۲۲۸۳/۱	

(الف) مورد مطالعاتی اول

(ب) مورد مطالعاتی دوم

شکل (۵): تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در موارد مطالعاتی اول و دوم

Figure (5): Suppliers of flexible capacities in the first and second case studies, a) The first case study, b) The second case study



شکل (۶): تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در مورد مطالعاتی سوم

Figure (6): Providers of flexible capacities in a third case study

مقایسه نتایج عددی جدول (۸) با نتایج عددی به‌دست آمده برای مورد مطالعاتی پنجم نشان می‌دهد که مشارکت خودروهای الکتریکی در بازار انعطاف‌پذیری نه تنها هزینه‌های روزانه خانه‌های هوشمند را کاهش داده بلکه مجموع هزینه‌های روزانه ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع اصلی را نیز پایین آورده است. برنامه‌ریزی به‌دست آمده برای خودروهای الکتریکی در موارد مطالعاتی پنجم و ششم در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) نمایش داده شده‌اند.

جدول (۶): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی چهارم

Table (6): Numerical results from the simulation of the fourth study case

مورد مطالعاتی چهارم	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۲۲۵۵/۹	۴۳/۱	۱۰۴۴۹/۴	-۵۸۶۳/۷	-۶۲۲۹۴/۴	۴۵۴۰۷/۸	۲۶۸۳۶/۲	-۱۰۳۵۷/۷
ریزشبکه ۲	۷۶۷۰/۷	۴۹/۸	۲۱۳۱۶/۹	-۴۰۹۵/۲	-۶۳۶۲۰/۵	-۳۸۶۷۸/۲	۲۰۳۵۴/۶	-۸۰۵۶/۷
ریزشبکه ۳	۱۲۱۷۱/۷	۲۶/۲	۱۶۹۲۹/۷	-۵۲۹۱/۹	-۶۴۴۱۱/۴	-۴۰۵۷۵/۷	۱۶۷۴۶/۰	-۷۲۶۲/۳
ریزشبکه ۴	۷۶۱۴/۵	۴۵/۴	۳۱۸۷۶/۰	-۴۱۷۶/۱	-۶۷۲۷۸/۵	-۳۱۹۱۸/۶	۱۶۰۹۸/۷	-۷۱۱۵/۲
شبکه اصلی	۶۱۳۶/۶	۳۳/۶	۶۱۶۴۴/۵	۳۵۲۱۴/۱	-۲۳۵۴۱۲/۰	-۱۳۲۳۸۳/۳	۰	۰
مجموع	۴۵۸۴۹/۳	۱۹۸/۰	۱۴۲۲۱۶/۵	۱۵۷۸۷/۲	-۴۹۳۰۱۴/۷	-۲۸۸۹۶۳/۶	۴۷۲۴۳/۶	

جدول (۷): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی پنجم

Table (7): Numerical results from the simulation of the fifth study case

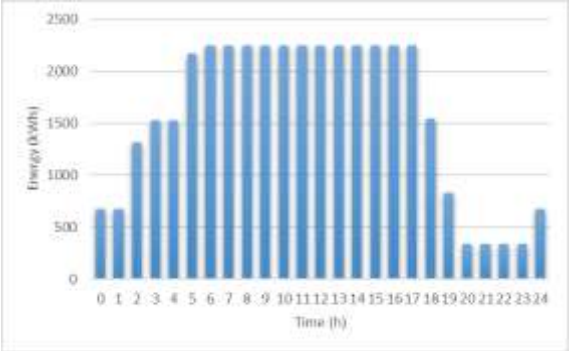
مورد مطالعاتی پنجم	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۲۰۹۵/۴	۳۶/۷	۱۰۶۴۱/۵	-۵۲۶۶/۵	-۶۲۲۰۸/۸	-۴۴۷۰۱/۷	۲۶۷۵۲/۶	-۱۱۶۶۸/۵
ریزشبکه ۲	۷۵۴۵/۱	۴۴/۹	۲۱۲۴۲/۰	-۳۱۹۸/۳	-۶۳۴۱۳/۱	-۳۷۷۷۹/۵	۲۰۱۴۷/۲	-۸۱۵۳/۹
ریزشبکه ۳	۱۲۲۶۶/۶	۳۰/۳	۱۶۷۳۶/۱	-۵۳۹۵/۶	-۶۴۳۰۲/۸	-۴۰۶۶۵/۴	۱۶۶۳۷/۴	-۸۰۹۵/۳
ریزشبکه ۴	۷۵۳۰/۸	۴۳/۶	۳۱۹۵۸/۱	-۳۵۸۴/۹	-۶۷۲۹۸/۰	-۳۱۳۵۰/۵	۱۶۱۱۸/۳	-۷۱۹۱/۹
شبکه اصلی	۶۱۳۶/۶	۳۸/۵	۶۱۷۰۰/۷	۳۲۸۹۳/۶	-۲۳۵۴۱۷/۶	-۱۳۴۶۴۸/۳	۰	۰
مجموع	۴۵۵۷۴/۵	۱۹۴/۰	۱۴۲۲۷۸/۳	۱۵۴۴۸/۲	-۴۹۲۶۴۰/۳	-۲۸۹۱۴۵/۳	۴۴۵۴۶/۰	

جدول (۸): نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد مطالعاتی ششم

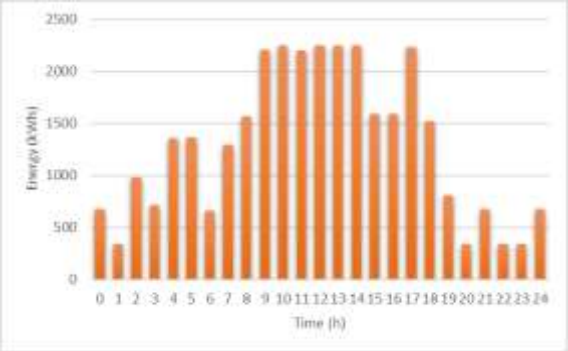
Table (8): Numerical results from the simulation of the sixth study case

مورد مطالعاتی ششم	هزینه‌های روزانه (دلار)						
	توربین‌های گازی	سیستم‌های ذخیره‌ساز	تبادل با شبکه		تبادل با مشترکین	کل	خانه‌های هوشمند	
			انرژی	انعطاف‌پذیری			انرژی	انعطاف‌پذیری
ریزشبکه ۱	۱۲۵۸۰/۵	۲۳/۵	۷۵۴۳/۲	-۵۹۷۴/۸	-۵۹۹۳۳/۴	-۴۵۷۶۱/۱	۲۴۴۷۷/۳	-۱۳۰۱۲/۹
ریزشبکه ۲	۷۸۷۸/۰	۲۶/۸	۱۸۷۹۱/۴	-۴۲۱۵/۵	-۶۱۴۴۱/۸	-۳۸۹۶۱/۱	۱۸۱۷۵/۹	-۹۹۷۱/۸
ریزشبکه ۳	۱۲۲۷۳/۵	۲۵/۱	۱۵۱۸۳/۰	-۴۶۶۴/۶	-۶۲۸۸۵/۵	-۴۰۰۶۸/۵	۱۵۲۲۰/۲	-۸۲۰۵/۰
ریزشبکه ۴	۷۸۲۱/۸	۳۳/۳	۲۹۸۱۶/۹	-۴۱۶۸/۸	-۶۵۷۷۸/۳	-۳۲۲۷۵/۱	۱۴۵۹۸/۶	-۸۷۹۳/۷
شبکه اصلی	۶۳۵۷/۷	۲۲/۰	۵۱۹۷۵/۷	۲۶۵۹۶/۹	-۲۲۶۱۷۴/۵	-۱۴۱۲۲۲/۳	۰	۰
مجموع	۴۶۹۱۱/۵	۱۳۰/۷	۱۲۳۳۱۰/۳	۷۵۷۳/۱	-۴۷۶۲۱۳/۶	-۲۹۸۲۸۸/۱	۳۲۴۸۸/۵	

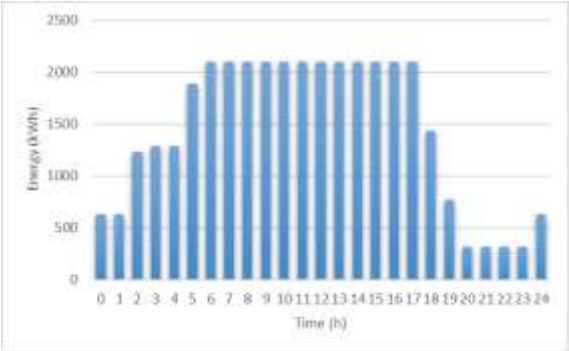
مطابق این شکل‌ها، برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی در مورد مطالعاتی ششم نسبت به مورد مطالعاتی پنجم تغییر کرده است. تحلیل شکل‌های مذکور نشان می‌دهد که شارژ خودروها را به دوره تقاضای انعطاف‌پذیری بالارونده منتقل کرده تا با مشارکت در بازار انعطاف‌پذیری کسب سود کنند. در این قسمت، مدل پیشنهادی در این مقاله با مدل‌های ارائه شده در مرجع‌های [۳۴] و [۴۰] مقایسه می‌شود. در ضمن به دلیل تفاوت در ساختار شبکه‌ها، تجهیزات و بسیاری از جزئیات دیگر، امکان مقایسه مستقیم نتایج عددی چاپ شده در مقاله‌ها با هم وجود ندارد و از این‌رو، در این مقاله مدل‌های ارائه شده در مرجع‌های [۳۴] و [۴۰] بر روی شبکه این مقاله پیاده‌سازی شده تا نتایج عددی در شرایط یکسان بررسی شوند. جدول (۹) نتایج عددی حاصل از مورد مطالعاتی ششم این مقاله را با نتایج حاصل از پیاده‌سازی دو مدل ارائه شده در مقاله‌های مذکور بر روی شبکه ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این نکته قابل ذکر است که مرجع [۳۴] مجهز به خانه‌های هوشمند بوده ولی مرجع [۴۰] تنها دارای مشترکین سنتی است.



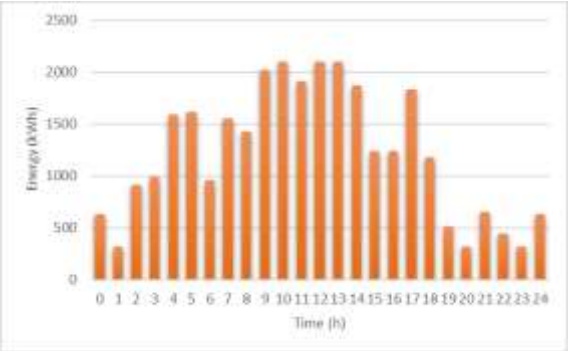
(الف) ریزشبکه ۱ در مورد مطالعاتی دوم



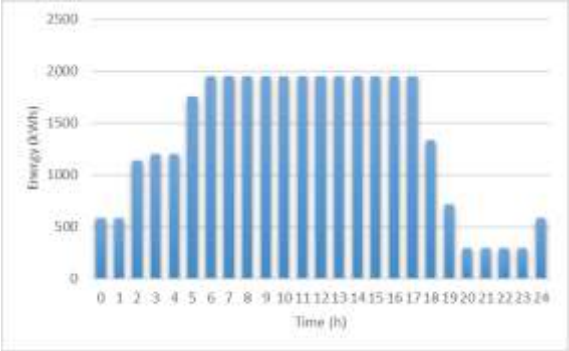
(ب) ریزشبکه ۱ در مورد مطالعاتی سوم



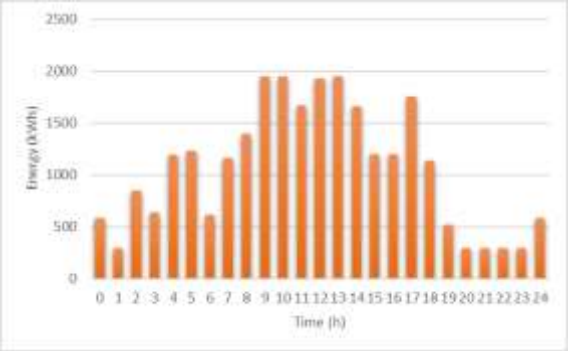
(ج) ریزشبکه ۲ در مورد مطالعاتی دوم



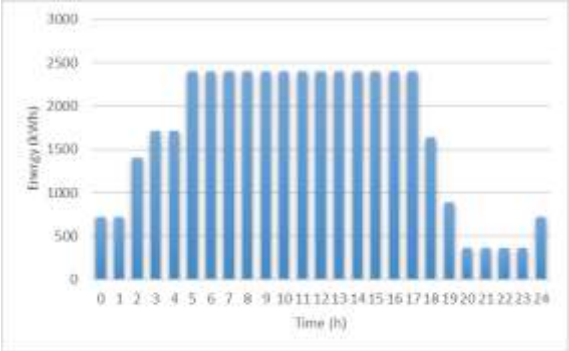
(د) ریزشبکه ۲ در مورد مطالعاتی سوم



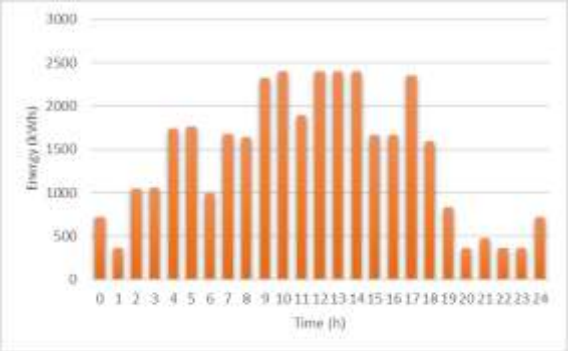
(ن) ریزشبکه ۳ در مورد مطالعاتی دوم



(و) ریزشبکه ۳ در مورد مطالعاتی سوم



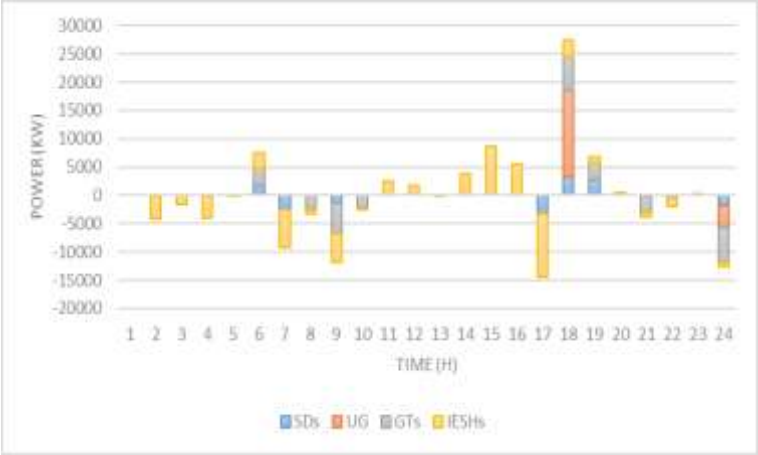
(ه) ریزشبکه ۴ در مورد مطالعاتی دوم



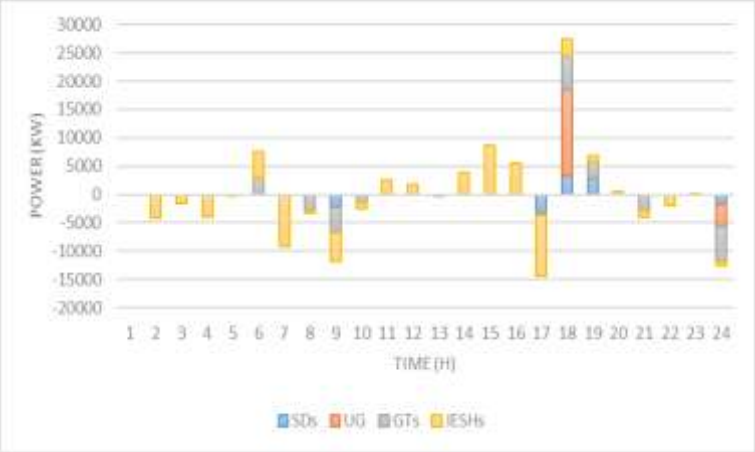
(ی) ریزشبکه ۴ در مورد مطالعاتی سوم

شکل (۷): نقطه کار سیستم‌های ذخیره‌ساز در موارد مطالعاتی دوم و سوم

Figure (7): The working point of storage systems in the second and third case studies, a) Microgrid 1 in the case of the second study, b) Microgrid 1 in the case of the third study, c) Microgrid 2 in the case of the second study, d) Microgrid 2 in the case of the third study, e) Microgrid 3 in the case of the second study, f) Microgrid 3 in the case of the third study, g) Microgrid 4 in the case of the second study, h) Microgrid 4 in the case of the third study



(الف) مورد مطالعاتی چهارم



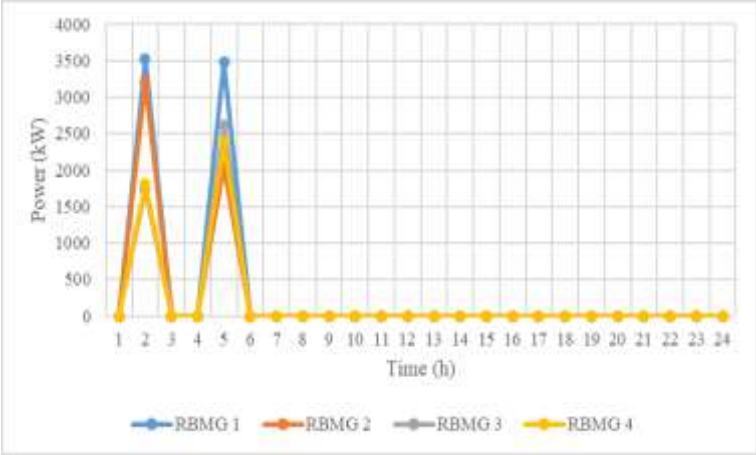
(ب) مورد مطالعاتی پنجم

شکل (۸): تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری در موارد مطالعاتی چهارم و پنجم

Figure (8): Suppliers of flexible capacities in the fourth and fifth study cases, a) The fourth case study, b) The fifth case study

مقایسه عددی نشان می‌دهد که هزینه بهره‌برداری توربین‌های گازی و سیستم‌های ذخیره‌ساز در مدل پیشنهادی این مقاله کمی بالاتر از هزینه‌های بهره‌برداری دو مدل دیگر است که این می‌تواند به عنوان یک نکته مثبت تلقی شود. زیرا مدل پیشنهادی توانسته ساعت‌های بیشتری از منابع محلی حود استفاده کرده و از حداکثر ظرفیت آن‌ها استفاده کند. مقایسه هزینه‌های بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری نیز نشان می‌دهد که بالاترین هزینه‌ها برای مرجع [۴۰] به‌دست آمده و پس از آن مرجع [۳۴] قرار دارد. دلیل هزینه‌های بالای مرجع [۴۰] به دلیل عدم در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند مجهز به پنل‌های خورشیدی و تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء نیست. نتایج نشان می‌دهند که هزینه‌های بازار های انرژی و انعطاف‌پذیری در مرجع [۳۴] بسیار کمتر از مرجع [۴۰] بوده که این موضوع به دلیل در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند در مدل پیشنهادی در این مرجع است.

در نهایت نتایج نشان می‌دهند که کمترین هزینه‌های بازارهای انرژی و انعطاف‌پذیری توسط مدل پیشنهادی به‌دست آمده که دلیل آن در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند با طیف بزرگی از تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء بوده که قادر به تامین نیازهای انعطاف‌پذیری سیستم هستند. به‌طور کلی نتایج عددی اثبات می‌کنند که مدل بهینه‌سازی سه‌لایه‌ای پیشنهادی با بهره‌گیری از ماکزیمم پتانسیل توربین‌های گازی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و خانه‌های هوشمند مجهز به پنل‌های خورشیدی توانسته هزینه‌های روزانه سیستم را در هر دو بازار انرژی و انعطاف‌پذیری به‌طور قابل توجهی در مقایسه با مدل‌های مشابه، کاهش دهد.



(الف) مورد مطالعاتی پنجم

(ب) مورد مطالعاتی ششم

شکل (۹): برنامه‌ریزی به دست‌آمده برای خودروهای الکتریکی در موارد مطالعاتی پنجم و ششم

Figure (9): Scheduling achieved for electric vehicles in fifth and sixth case studies, a) The fifth case study, b) The sixth case study

جدول (۹): مقایسه نتایج عددی با دو مقاله در زمینه مشابه

Table (9): Comparison of numerical results with two papers in the same field

مدل اجرا شده	توربین‌های گازی (دلار)	سیستم‌های ذخیره‌ساز (دلار)	هزینه‌های تبادل انرژی و انعطاف‌پذیری کل سیستم با شبکه بالادست (دلار)	
			انرژی	انعطاف‌پذیری
[۱۳]	۴۶۸۹۷/۲	۱۲۴/۶	۱۲۵۸۸/۳	۸۰۹۹/۶
[۱۸]	۴۶۸۱۷/۳	۱۲۶/۳	۱۶۱۹۷۰/۱	۹۰۷۸/۴
این مقاله	۴۶۹۱۱/۵	۱۳۰/۷	۱۲۳۳۱۰/۳	۷۵۷۳/۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک استراتژی بهینه‌سازی چندلایه‌ای برای مدیریت انرژی سیستم‌های توزیع مدرن متشکل از ریزشبکه‌های تجدیدپذیر ارائه شده است. در استراتژی پیشنهادی، بهره‌بردار شبکه توزیع اصلی ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای بهره‌برداری ایمن سیستم را از طریق خانه‌های هوشمند، خودروهای الکتریکی، واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز درون ریزشبکه‌ها تأمین می‌کند. در استراتژی پیشنهادی برنامه‌ریزی شبکه توزیع اصلی در یک ساختار چندلایه با توجه به برنامه‌ریزی بهینه خانه‌های هوشمند، خودروهای الکتریکی و ریزشبکه‌ها انجام می‌گیرد. در این مقاله پارامترهای نایقین شامل تقاضای بار، سرعت باد و تابش خورشید به روش مبتنی بر سناریو مدل شدند تا امنیت بهره‌برداری از طریق پیاده‌سازی روش

تصادفی تضمین شود. این استراتژی در چندین مورد مطالعاتی تست شد و نتایج نشان دادند که مشارکت واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز درون ریزشبکه‌ها در تأمین نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه توزیع اصلی نه تنها مجموع هزینه‌های ریزشبکه‌ها را پایین می‌آورد بلکه با کاهش وابستگی شبکه اصلی به شبکه بالادست منجر به پایین آمدن قابل توجه هزینه‌های روزانه آن می‌شود. نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان دادند که ساکنین خانه‌های هوشمند با تغییر برنامه‌ریزی وسایل کنترل‌پذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز خود می‌توانند سهم زیادی در تأمین ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم داشته باشند. خروجی‌های شبیه‌سازی به وضوح نشان دادند که مشارکت خانه‌های هوشمند در بازار انعطاف‌پذیری علی‌رغم کاهش نسبی شاخص رفاه ساکنین، سود قابل توجهی برای آن‌ها به ارمغان می‌آورد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که ساکنین خانه‌های هوشمند توانستند با تغییر برنامه‌ریزی شارژ به خودروهای الکتریکی تحت مالکیت خود مشارکت بیشتری در بازار انعطاف‌پذیری و همچنین کسب سود بیشتری داشته باشند. به‌طور کلی نتایج اثبات کردند که استراتژی سه‌لایه‌ای بهینه پیشنهادی توانسته است ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری مورد نیاز شبکه توزیع را از طریق منابع هوشمند درون ریزشبکه‌ها تأمین کند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

[1] M. Tostado-Véliz, A. Rezaee-Jordehi, S.A. Mansouri, F. Jurado, "Day-ahead scheduling of 100% isolated communities under uncertainties through a novel stochastic-robust model", Applied Energy, vol. 328, Article Number: 120257, Dec. 2022 (doi:10.1016/j.apenergy.2022.120257).

[2] M. Tostado-Véliz, S.A. Mansouri, A. Rezaee-Jordehi, D. Icaza-Alvarez, F. Jurado, "Information gap decision theory-based day-ahead scheduling of energy communities with collective hydrogen chain", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 48, pp. 7154-7169, March 2023 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.183).

[3] A. Sahoo, P.K. Hota, "Impact of energy storage system and distributed energy resources on bidding strategy of micro-grid in deregulated environment", Journal of Energy Storage, vol. 43, Article Number: 103230, Nov. 2021 (doi: 10.1016/j.est.2021.103230).

[4] S.A. Mansouri, M.S. Javadi, "A robust optimisation framework in composite generation and transmission expansion planning considering inherent uncertainties", Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, vol. 29, pp. 717-730, Nov. 2017 (doi: 10.1080/0952813X.2016.1259262).

[5] N.E. Koltsaklis, J. Knápek, "Assessing flexibility options in electricity market clearing", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 173, Article Number: 113084, Mar 2023 (doi: 10.1016/j.rser.2022.113084).

[6] M. Debouza, A. Al-Durra, T.H.M. EL-Fouly, H.H. Zeineldin, "Survey on microgrids with flexible boundaries: Strategies, applications, and future trends", Electric Power Systems Research, vol. 205, Article Number: 107765, April 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2021.107765).

[7] Z. Yu, F. Lu, Y. Zou, X. Yang, "Quantifying energy flexibility of commuter plug-in electric vehicles within a residence–office coupling virtual microgrid. Part II: Case study setup for scenario and sensitivity analysis", Energy and Buildings, vol. 254, Article Number: 111552, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111552).

[8] T. Hai, J. Zhou, A.K. Alazzawi, T. Muranaka, "Management of renewable-based multi-energy microgrids with energy storage and integrated electric vehicles considering uncertainties", Journal of Energy Storage, vol. 60, Article Number: 106582, April 2023 (doi: 10.1016/j.est.2022.106582).

[9] S.A. Shirmardi, M. Joorabian, H. Barati, "Flexible-reliable operation of green microgrids including sources and energy storage-based active loads considering ANFIS-based data forecasting method", Electric Power Systems Research, vol. 210, Article Number: 108107, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2022.108107).

[10] S.M. Hashemi, H. Arasteh, M. Shafiekhani, M. Kia, J.M. Guerrero, "Multi-objective operation of microgrids based on electrical and thermal flexibility metrics using the NNC and IGDT methods", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 144, Article Number: 108617, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108617).

[11] A. Majzoobi, A. Khodaei, "Application of microgrids in supporting distribution grid flexibility", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 32, pp. 3660-3669, Sept. 2017 (doi: 1109/TPWRS.2016.2635024).

[12] F. Garcia-Torres, C. Bordons, J. Tobajas, R. Real-Calvo, I. Santiago, S. Grieu, "Stochastic optimization of microgrids with hybrid energy storage systems for grid flexibility services considering energy forecast uncertainties", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 36, pp. 5537-5547, Nov. 2021 (doi: 10.1109/TPWRS.2021.3071867).

[13] C. Huang, M. Zhang, C. Wang, N. Xie, Z. Yuan, "An interactive two-stage retail electricity market for microgrids with peer-to-peer flexibility trading", Applied Energy, vol. 320, Article Number: 119085, Aug. 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119085).

[14] W. Hua, H. Xiao, W. Pei, W.Y. Chiu, J. Jiang, H. Sun, P. Matthews, "Transactive energy and flexibility provision in multi-microgrids using Stackelberg game", CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 9, pp. 505-515, March 2023 (doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.04370).

[15] S. Bahramara, P. Sheikhahmadi, A. Mazza, G. Chicco, "Day-ahead self-scheduling from risk-averse microgrid operators to provide reserves and flexible ramping ancillary services", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 142, Article Number: 108381, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108381).

[16] A. Kathirgamanathan, M. Rosa, E. Mangina, D.P. Finn, "Data-driven predictive control for unlocking building energy flexibility: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 135, Article Number: 110120, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.rser.2020.110120).

[17] H. Khajeh, H. Firoozi, H. Laaksonen, "Flexibility potential of a smart Home to provide TSO-DSO-level services", Electric Power Systems Research, vol. 205, Article Number: 107767, April 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2021.107767).

[18] M. Khatibi, S. Rahnama, P. Vogler-Finck, J. Dimon Bendtsen, A. Afshari, "Towards designing an aggregator to activate the energy flexibility of multi-zone buildings using a hierarchical model-based scheme", Applied Energy, vol. 333, Article Number: 120562, March 2023 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120562).

[19] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A.R. Jordehi, J.P.S. Catalão, "Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach", Sustainable Cities and Society, vol. 69, Article Number: 102852, June 2021 (doi: 10.1016/j.scs.2021.102852).

[20] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, M.S. Javadi, A.E. Nezhad, M. Shafie-Khah, J.P.S. Catalão, "Demand response role for enhancing the flexibility of local energy systems", Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems, pp. 279-313, March 2021 (doi: 10.1016/B978-0-12-823899-8.00011-X).

[21] P. Balakumar, T. Vinopraba , K. Chandrasekaran, "Machine learning based demand response scheme for IoT enabled PV integrated smart building", Sustainable Cities and Society, vol. 89, Article Number: 104260, Feb. 2023 (doi: 10.1016/j.scs.2022.104260).

[22] G.R. Aghajani, I. Heydari, "Energy management in microgrids containing electric vehicles and renewable energy sources considering demand response", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, vol. 9, pp. 34-48, April 2021 (doi: 10.22098/joape.2020.5854.1438).

[23] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Sept. 2020 (dor: 20.1001.1.23223871.1399.11.43.4.7).

[24] M. Zare, S.A. Saeed, H. Akbari, "Demand response programs modeling in multiple energy and structure management in microgrids equipped by combined heat and power generation", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 53, pp. 99-120, Feb. 2022 (dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.6.0).

[25] J.A. Aguado, Á. Paredes, "Coordinated and decentralized trading of flexibility products in Inter-DSO local electricity markets via ADMM", Applied Energy, vol. 337, Article Number: 120893, May 2023 (doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120893).

[26] Y. Ye, D. Papadaskalopoulos, Q. Yuan, Y. Tang, G. Strbac, "Multi-agent deep reinforcement learning for coordinated energy trading and flexibility services provision in local electricity markets", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 14, pp. 1541-1554, Feb. 2022 (doi: 10.1109/tsg.2022.3149266).

[27] H. Nagpal, I-I. Avramidis, F. Capitanescu, A.G. Madureira, "Local energy communities in service of sustainability and grid flexibility provision: hierarchical management of shared energy storage", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 13, pp. 1523-1535, July 2022 (doi: 10.1109/tste.2022.3157193).

[28] Y. Chen, W. Wei, H. Wang, Q. Zhou, J.P.S. Catalao, "An energy sharing mechanism achieving the same flexibility as centralized dispatch", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 12, pp. 3379-3389, July 2021 (doi: 10.1109/tsg.2021.3060380).

[29] I. Avramidis, F. Capitanescu, G. Deconinck, "Grid-friendly smart sustainable buildings: flexibility-to-cost mapping", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 13, pp. 1857-1860, July 2022 (doi: 10.1109/tste.2022.3160886).

[30] M. Babagheibi, S. Jadid, A. Kazemi, "An incentive-based robust flexibility market for congestion management of an active distribution system to use the free capacity of Microgrids", Applied Energy, vol. 336, Article Number: 120832, April 2023 (doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120832).
[31] N. Pourghaderi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, M. Kabirifar, P. Dehghanian, "A local flexibility market framework for exploiting DERs' flexibility capabilities by a technical virtual power plant", IET Renewable Power Generation, vol. 17, pp. 681-695, Feb. 2023 (doi: 10.1049/rpg2.12624).
[32] Z. Foroozandeh, S. Ramos, J. Soares, Z. Vale, "Goal programming approach for energy management of smart building". IEEE Access, vol. 10, pp. 25341-25348, Feb. 2022 (doi: 10.1109/access.2022.3153341).
[33] M. Ebrahimi, A.S. Gazafroudi, M. Ebrahimi, H. Laaksonen, M. Shafie-Khah, J.P.S. Catalao, "Iterative game approach for modeling the behavior of agents in a competitive flexibility trading", IEEE Access, vol. 9, pp. 165227-165238, Dec. 2021 (doi: 10.1109/access.2021.3134937).
[34] M. Yu, J. Jiang, X. Ye, X. Zhang, C. Lee, S.H. Hong, "Demand response flexibility potential trading in smart grids: A multileader multifollower stackelberg game approach", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 53, pp. 2664-2675, May 2023 (doi: 10.1109/tsmc.2022.3218039).
[35] X. Lu, X. Ge, K. Li, F. Wang, H. Shen, P. Tao, Hu J, Lai J, Zhen Z, Shafie-khah M, Catalão J.P.S, "Optimal bidding strategy of demand response aggregator based on customers' responsiveness behaviors modeling under different incentives", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 57, pp. 3329-3340, Augst 2021 (doi: 10.1109/tia.2021.3076139).
[36] S. Cordova, C.A.C. nizares, A. Lorca, D.E. Olivares, "Aggregate modeling of thermostatically controlled loads for microgrid energy management systems", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 336, pp. 1-13, March 2023 (doi: 10.1109/tsg.2023.3254655).
[37] X. Zhang, D. Shin, Y. Son, H. Woo, S.Y. Kim, S. Choi, "Three-stage flexibility provision framework for radial distribution systems considering uncertainties", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 14, pp. 948-961, April 2023 (doi: 10.1109/tste.2022.3230774).
[38] K. Antoniadou-Plytaria, D. Steen, L.A. Tuan, O. Carlson, B. Mohandes, M.A.F. Ghazvini, "Scenario-based stochastic optimization for energy and flexibility dispatch of a microgrid", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 13, pp. 3328-3341, Sept. 2022 (doi: 10.1109/tsg.2022.3175418).
[39] G. Tsaousoglou, N. Efthymiopoulos, P. Makris, E. Varvarigos, "Multistage energy management of coordinated smart buildings: a multiagent markov decision process approach", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 13, pp. 2788-2797, July 2022 (doi: 10.1109/tsg.2022.3162915).
[40] Á. Paredes, J.A. Aguado, P. Rodrí-guez, "Uncertainty-aware trading of congestion and imbalance mitigation services for multi-DSO local flexibility markets", IEEE Trans. on Sustainable Energy, pp. 1-13, March 2023 (doi: 10.1109/tste.2023.3257405).
[41] S.A. Mansouri, A. Rezaee Jordehi, M. Marzband, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, J.A. Aguado, "An IoT-enabled hierarchical decentralized framework for multi-energy microgrids market management in the presence of smart prosumers using a deep learning-based forecaster", Applied Energy, vol. 333, Article Number: 120560, March 2023 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120560).
[42] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A. Esmaeel Nezhad, J.P.S. Catalão, "A sustainable framework for multi-microgrids energy management in automated distribution network by considering smart homes and high penetration of renewable energy resources", Energy, vol. 245, Article Number: 123228, April 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2022.123228).
[43] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, M.S. Javadi, J.P.S. Catalão, "Two-stage stochastic framework for energy hubs planning considering demand response programs", Energy, vol. 206, pp. 118124, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2020.118124).

ضمیمه

مجموعه‌ها	
شاخص سیستم‌های ذخیره‌سازی	e
شاخص توربین‌های گازی	g
شاخص گره‌های شبکه	i,j
شاخص ریزشبکه‌ها	mg
شاخص لوازم خانگی	n,m
شاخص پنل‌های خورشیدی متمرکز شده	pv
شاخص سناریوهای عدم قطعیت	s
شاخص زمانی	t
شاخص توربین‌های بادی	w
شاخص شاخه‌های شبکه	l

اسکالرها	
سطح اطمینان (درصد)	α
گام زمانی (ساعت)	Δt
بهره‌وری شارژ و دشارژ (درصد)	η^{C}
بهره‌وری پنل‌های خورشیدی	η^{PV}
حداقل سطح راحتی (درصد)	Θ^{Min}
تابش خورشیدی در شرایط تست استاندارد (کیلووات بر مترمربع)	G^{STC}
ضریب انحراف راحتی	κ
هزینه بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌سازی (دلار بر کیلووات ساعت)	λ^{S}
توان پایه (کیلووار)	S^{base}
تعداد مراحل زمانی در یک روز	T
حداقل/ حداکثر زاویه ولتاژ (رادیان)	$\theta^{Min} / \theta^{Max}$
حداقل/ حداکثر مقدار ولتاژ (پریونیت)	V^{Min} / V^{Max}
ضریب ریسک‌گریزی	ω

متغیرهای باینری	
حالت‌های شارژ/دشارژ باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء	$i^{C,BESS}_{i,t,s} / i^{D,BESS}_{i,t,s}$
حالت‌های شارژ/دشارژ باتری وسایل ذخیره‌سازی	$i^{C,DES}_{e,t,s} / i^{D,DES}_{e,t,s}$
حالت‌های شارژ/دشارژ باتری خودروهای برقی متصل به شبکه	$i^{C,EV}_{i,t,s} / i^{D,EV}_{i,t,s}$
حالت‌های پرچم شروع و پایان لوازم هوشمند	$i^{S,App}_{i,t,n,s} / i^{E,App}_{i,t,n,s}$
حالت‌های کاری لوازم هوشمند	$i^{SH,App}_{i,t,n,s}$
حالت‌های الزامات انعطاف‌پذیری بالادست/پایین‌دست	$I^{R,UFlex}_{t,s} / I^{D,UFlex}_{t,s}$

پارامتر	
α_n / β_n	ساعت شروع/پایان پنجره زمانی وسایل لوازم خانگی
δ_g^{max}	ظرفیت تولید راکتیو توربین‌های گازی (درصد)
$E_i^{BESS,Min}$ / $E_i^{BESS,Max}$	حالت حداقل/ حداکثر انرژی در باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات ساعت)
$E_{i,s}^{BESS,Initial}$	حالت اولیه شارژ در باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات ساعت)
$E_e^{DES,Min}$ / $E_e^{DES,Max}$	حالت حداقل/ حداکثر انرژی انرژی در باتری وسایل ذخیره‌سازی (کیلووات ساعت)
$E_{e,s}^{DES,Initial}$	حالت اولیه شارژ در باتری وسایل ذخیره‌سازی (کیلووات ساعت)
$E_i^{EV,Min}$ / $E_i^{EV,Max}$	حالت حداقل/ حداکثر انرژی در باتری خودرهای برقی متصل به شبکه (کیلووات ساعت)
$E_{i,s}^{EV,Initial}$ / $E_{i,s}^{EV,Final}$	حالت اولیه/ نهایی در باتری خودروهای برقی متصل به شبکه (کیلووات ساعت)
$E_n^{SH,App}$	مصرف انرژی لوازم خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات ساعت)
$\varphi_{l,mg}$	جهت جریان خطوط اتصال ریزشبکه
$G_{t,s}$	تابش خورشید (کیلووات بر مترمربع)
GL_l / BL_l	کندوکتانس/ سوسپتانس شاخه‌های شبکه (پریونیت)
$I_{l,t,s}^{Line}$	جریان شاخه‌های شبکه
λ_t^{Flex}	هزینه انعطاف‌پذیری در سطح توزیع (دلار بر کیلووات ساعت)
$\lambda_t^{Flex-NS}$	هزینه انعطاف‌پذیری در سطح انتقال (دلار بر کیلووات ساعت)
λ_g^{GT}	هزینه بهره‌برداری توربین‌های گازی (دلار بر کیلووات ساعت)
λ_t^{UG}	قیمت برق در شبکه بالادست (دلار بر کیلووات ساعت)
$P_i^{CMax,BESS}$ / $P_i^{DMax,BESS}$	حداکثر شارژ/دشارژ باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات)
$P_e^{CMax,DES}$ / $P_e^{DMax,DES}$	حداکثر شارژ/دشارژ باتری وسایل ذخیره‌سازی (کیلووات)
$P_i^{CMax,EV}$ / $P_i^{DMax,EV}$	حداکثر شارژ/دشارژ باتری خودروهای برقی متصل به شبکه (کیلووات)
$P_g^{GT,Min}$ / $P_g^{GT,Max}$	حداقل/حداکثر ظرفیت توان اکتیو توربین‌های گازی (کیلووات)
P_i^{Meter}	ظرفیت اندازه‌گیری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات)
$P_{i,t,s}^{NH}$	مصرف بار در خانه‌های عادی (کیلووات)
P_{pv}^{Rated}	توان مجاز پنل‌های خورشیدی (کیلووات)
P_w^{Rated}	توان مجاز توربین‌های بادی (کیلووات)
$P_{n,t,s}^{SH,Fix}$	مصرف توان ثابت در خانه‌های هوشمند (کیلووات)
r_l	مقاومت شاخه‌های شبکه (پریونیت)
ρ_s	احتمال سناریوهای عدم قطعیت (درصد)
$S_l^{Line,Max}$	حداکثر ظرفیت شاخه‌های شبکه (کیلووار)
$P_{l,t,s}^{Loss}$	تلفات توان اکتیو شاخه‌های شبکه (کیلووات)
S_i^{PV}	سطح صفحات خورشیدی پشت‌بام (مترمربع)
t_i^{ar} / t_i^{dp}	زمان ورود/خروج خودروهای برقی متصل به شبکه (ساعت)
$T_{n,m}^{Gap}$	فاصله زمانی مجاز بین وسایل متصل شده (ساعت)
$T_n^{SH,App}$	زمان کاری لوازم هوشمند (ساعت)
v_{ci} / v_r / v_{co}	سرعت بادی متصل/مجاز/قطع (متر بر ثانیه)
$v_{t,s}$	سرعت بادی (متر بر ثانیه)
$\varpi_{l,(i,mg)}$	جهت جریان شاخه‌های شبکه
ξ_i	ضریب توان محلی گره‌های شبکه

متغیرهای	
حالت شارژ در باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات ساعت)	$E_{i,t,s}^{BESS}$
حالت شارژ در باتری وسایل ذخیره‌سازی (کیلووات ساعت)	$E_{e,t,s}^{DES}$
حالت شارژ در باتری خودروهای برقی متصل به شبکه (کیلووات ساعت)	$E_{i,t,s}^{EV}$
سطح آسایش (درصد)	$\Theta_{i}^{Comfort}$
انحراف از ارزش در معرض خطر (دلار)	γ_s
توان شارژ/ دشارژ باتری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات)	$P_{i,t,s}^{C,BESS} / P_{i,t,s}^{D,BESS}$
توان شارژ/ دشارژ باتری وسایل ذخیره‌سازی (کیلووات)	$P_{e,t,s}^{C,DES} / P_{e,t,s}^{D,DES}$
توان شارژ/ دشارژ باتری خودروهای برقی متصل به شبکه (کیلووات)	$P_{i,t,s}^{C,EV} / P_{i,t,s}^{D,EV}$
تولید توان اکتیو و راکتیو توربین‌های گازی (کیلووات بر کیلووار)	$P_{g,t,s}^{GT} / Q_{g,t,s}^{GT}$
پخش بار شاخه‌های شبکه (کیلووات بر کیلووار)	$P_{l,t,s}^{line} / Q_{l,t,s}^{line}$
سطح مشارکت انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها (کیلووات)	$P_{mg,t,s}^{MG,UFlex} / P_{mg,t,s}^{MG,DFlex}$
بار خالص سیستم (کیلووات)	$P_{t,s}^{Net}$
توان تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی پشت‌بام (کیلووات)	$P_{i,t,s}^{PV}$
مصرف توان خانه هوشمند (کیلووات)	$P_{i,t,s}^{SH}$
مصرف توان توسط لوازم خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات)	$P_{i,t,n,s}^{SH,App}$
سطح مشارکت انعطاف‌پذیری خانه‌های هوشمند مجهز به اینترنت اشیاء (کیلووات)	$P_{i,t,s}^{SH,UFlex} / P_{i,t,s}^{SH,DFlex}$
تبادل توان اکتیو/ راکتیو با شبکه بالادست (کیلووات/ کیلووار)	$P_{t,s}^{UG} / P_{t,s}^{QG}$
انعطاف‌پذیری خریداری شده از شبکه بالادست (کیلووات)	$P_{t,s}^{UG,UFlex} / P_{t,s}^{UG,DFlex}$
الزامات انعطاف‌پذیری بالادست/ پایین‌دست (کیلووات)	$P_{t,s}^{R,UFlex} / P_{t,s}^{R,DFlex}$
توان تولید شده توسط توربین‌های بادی (کیلووار)	$P_{w,t,s}^{Wind}$
حداکثر تولید توان راکتیو توربین‌های گازی (کیلووار)	$Q_{g,t,s}^{GT,Max}$
ارزش مشروط در معرض خطر (دلار)	$Risk^{CVaR}$
ارزش در معرض خطر (دلار)	$Risk^{VaR}$
زاویه ولتاژ (رادیان)	$\theta_{i,t,s}$
مقدار ولتاژ (پریونیت)	$V_{i,t,s}$

زیرنویس‌ها

1. Flexibility
2. Flexibility services
3. Local resources
4. Distributed generation (DG)
5. Demand side management (DSM)
6. Electric vehicle fleets
7. Flexible operation
8. Stochastic planning
9. Information decision gap theory
10. Fuzzy method
11. Peer-to-Peer
12. Flexibility and reserve markets
13. Renewable energy resources
14. Independent system operator
15. Risk-averse
16. Heating, ventilation and air conditioning
17. Demand response program (DRP)
18. Internet of things (IoT)
19. Scenario-based stochastic
20. Flag
21. Comfort index
22. Modes
23. Solar panels
24. Upward and downward ramp
25. Net load
26. Weibull function
27. Beta function
28. Upward flexibility
29. Downward flexibility