Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 34-48

Vol. 13/ No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

A three-stage strategic framework for optimizing the cooperation of home microgrids in interconnected electricity and heat networks

Javad Godarzi, Mohammad Tolou Askari, Meysam Amirahmadi, Majid Babaeinik

Department of Electrical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

sinsim247@outlook.com
m.asgary28@gmail.com
amirahmadi58@gmail.com
babaeinik78@yahoo.com

Abstract:
This article presents an innovative three-stage strategic framework for the effective cooperation of home microgrids in interconnected electricity and heat networks. The framework aims to increase the competitiveness of microgrids in the energy market. A two-level optimization model is used for optimal management of electrical and thermal energy, which includes demand management strategies to maximize system profit. The high-level model maximizes the profit of the network operator and the low-level model minimizes the cost of electricity supply to microgrids. To solve this model, a multi-stage stochastic programming approach based on particle swarm optimization algorithm is proposed. The simulation results show a significant reduction in market prices by approximately 36%, a 47% increase in responsive load consumption, and a tripling of local generation. These findings indicate the potential of the proposed approach in increasing the profit of all participants and improving energy management in cooperative microgrids.

Keywords: Home energy management, uncertainty, evolutionary algorithm, two-level optimization, electrical and thermal networks.

Date of sending the article: 2025/01/31
Acceptance date of the article: 2025/03/02

Name of the Corresponding: Mohammad Tolou Askari
Corresponding Author's Address: Department of Electrical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۴۸-۳۴

Vol. 13 / No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

چارچوب استراتژیک سه مرحله‌ای برای بهینه‌سازی همکاری ریزشبکه‌های خانگی در شبکه‌های متصل برق و گرما

نوع مطالعه: پژوهشی

جواد گودرزی[۱]، محمد طلوع عسکری *[۱]، میثم امیراحمدی، مجید بابایی نیک [۱]

[۱] گروه مهندسی برق و الکترونیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

sinsim247@outlook.com
m.asgary28@gmail.com
amirahmadi58@gmail.com
babaeinik78@yahoo.com

چکیده: این مقاله یک چارچوب استراتژیک سه‌مرحله‌ای نوآورانه برای همکاری مؤثر ریزشبکه‌های خانگی در شبکه‌های متصل برق و گرما ارائه می‌دهد. هدف این چارچوب افزایش رقابت‌پذیری ریزشبکه‌ها در بازار انرژی است. از یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای مدیریت بهینه انرژی الکتریکی و حرارتی استفاده شده است که شامل استراتژی‌های مدیریت تقاضا برای حداکثرسازی سود سیستم می‌باشد. مدل سطح بالا به حداکثرسازی سود اپراتور شبکه و مدل سطح پایین به کاهش هزینه تأمین برق برای ریزشبکه‌ها پرداخته است. برای حل این مدل، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده کاهش قابل توجه قیمت بازار به میزان تقریبی ۳۶٪، افزایش ۴۷٪ در مصرف بارهای پاسخگو و سه برابر شدن تولید محلی است. این یافته‌ها نشان‌دهنده توانمندی رویکرد پیشنهادی در افزایش سود تمامی شرکت‌کنندگان و بهبود مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های همکاری‌شده است.

واژه های کلیدی: **مدیریت انرژی خانگی، عدم قطعیت، الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی دو سطحی، شبکه‌های الکتریکی و حرارتی.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمد طلوع عسکری

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی برق و الکترونیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

۱- مقدمه

در دنیای امروز، با رشد روزافزون تقاضا برای انرژی و چالش‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی، مدیریت بهینه منابع انرژی در مقیاس‌های کوچک و محلی اهمیت زیادی یافته است. ریزشبکه‌های خانگی به عنوان واحدهای خودمختار انرژی، قادرند از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی استفاده کنند تا تأمین انرژی پایدارتر و اقتصادی‌تری را فراهم آورند. با این حال، یکی از چالش های اصلی در مدیریت ریزشبکه‌های خانگی، عدم قطعیت‌های ناشی از تولید منابع تجدیدپذیر و تقاضای بار متغیر است که می‌تواند بر بهره‌وری و کارایی سیستم‌های انرژی تأثیر بگذارد. همچنین، یکی از رویکردهای نوین در بهبود عملکرد ریزشبکه‌ها، همکاری آنها در قالب ائتلاف‌هایی است که می‌توانند در شبکه‌های برق و گرمای متصل به یکدیگر مشارکت کنند. این همکاری‌ها می‌توانند به افزایش رقابت‌پذیری ریزشبکه‌ها در بازار انرژی و بهره‌برداری بهتر از منابع محلی منجر شوند. در این راستا، استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و مدل‌های بهینه سازی می‌تواند به حل مسائل پیچیده ناشی از مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی کمک کند. این مقاله به معرفی یک چارچوب استراتژیک سه مرحله‌ای می‌پردازد که به ریزشبکه‌های خانگی این امکان را می‌دهد تا به طور مؤثر در شبکه‌های متصل برق و گرما همکاری کنند. این چارچوب از یک مدل بهینه سازی دو سطحی بهره می برد که به مدیریت بهینه انرژی‌های الکتریکی و حرارتی پرداخته و با استفاده از استراتژی‌های مدیریت تقاضا، به حداکثر سازی سود سیستم کمک می‌کند. همچنین، به منظور مقابله با عدم قطعیت ها و پیچیدگی‌های موجود در بهینه سازی، از الگوریتم تکاملی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای استفاده شده است.

۱-۱- پیشینه پژوهش

مدیریت انرژی خانگی و ریزشبکه‌ها به دلیل چالش‌های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت‌های بار و پیچیدگی‌های توزیع، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. در این راستا، چندین مدل بهینه سازی و استراتژی‌های جدید برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها پیشنهاد شده است.

در **Wei et al. (2022)**، یک مدل بهینه سازی برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای برای سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی هوشمند **(IHEMS)**پیشنهاد شده که هدف آن تعادل بین ترجیحات کاربران، حریم خصوصی و هزینه‌های سیستم توزیع است، با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید باد و نشان دادن کارایی آن از طریق شبیه سازی با **MATLAB.**در **Wang et al. (2019)**، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر نمونه‌برداری ترتیبی برای مدیریت تعاملات بین یک شبکه مرکزی و چندین ریزشبکه معرفی شده که به مدیریت عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر و انرژی متنوع از طریق یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای پرداخته و نتایج نشان‌دهنده مقیاس پذیری و کاهش هزینه‌های سیستم است. در **Home-Ortiz et al. (2022)**، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مبتنی بر سناریوهای تصادفی برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق از طریق پیکربندی مجدد شبکه، تولید قابل کنترل، واحدهای اضطراری سیار و پاسخ به تقاضا پیشنهاد شده است که نتایج عددی اثربخشی آن را در کاهش قطع بار و محدودیت‌ها نشان می‌دهند.

در **Arkhangelski et al. (2021)**، سیستم مدیریت انرژی ریزشبکه‌های شهری با استفاده از کنترل پیش‌بینی با جریان قدرت بهینه روز بعد، یادگیری عمیق و برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح پیشنهاد شده است که کاهش قابل توجهی در قیمت برق و افزایش تاب‌آوری از طریق ذخیره‌سازی مبتنی بر جامعه و تولید تجدید پذیر را نشان می‌دهد. در **Xu & Chung (2016)**، ارزیابی نقش خودروهای برقی **(EVs)** در بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع از طریق فناوری‌های خودرو به خانه و خودرو به شبکه در حالت های ایزوله و متصل به شبکه انجام شده و نتایج بهبودهای قابل توجهی در قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند. در **Ramírez-López et al. (2024)**، یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای ارزیابی خدمات انعطاف پذیری قابل توجهی که مصرف‌کنندگان انرژی خانگی با استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی می‌توانند به شرکت‌های توزیع ارائه دهند، معرفی شده که نتایج نشان‌دهنده ظرفیت‌های انعطاف‌پذیری قابل توجه از ±۷ تا ±۲۹ کیلووات در هر بازه زمانی است.

در **Lee et al. (2014)**، یک طرح مدیریت تقاضای جدید به نام کنترل تقاضای محلی **(LDC)** برای ادغام کارآمد انرژی تجدید پذیر و خودروهای برقی در شبکه‌های محلی معرفی شده است که نسبت به کنترل تقاضای پویا سنتی، پایداری بیشتری را نشان می‌دهد. در **Christakou et al. (2014)**، مکانیزم کنترل تقاضای پاسخگویی غیرمتمرکز و با هزینه کم به نام اعلان ترافیک شبکه صریح **(GECN)** معرفی شده است که خدمات کمکی برای کنترل ولتاژ شبکه در زمان واقعی از طریق مدیریت لوازم خانگی کشسان با کمترین تأثیر بر کاربران نهایی ارائه می‌دهد. در **Nafisi et al. (2016)**، یک روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای کاهش تلفات انرژی در ریز شبکه‌ها با سطوح مختلفی از خودروهای برقی هیبریدی قابل شارژ پیشنهاد شده است که بر نیاز به استراتژی‌های هوشمند شارژ برای کاهش تلفات شبکه تأکید می‌کند.

در **Melatti et al. (2022)**، یک استراتژی کنترل دو لایه برای باتری‌های خانگی پیشنهاد شده است که بهبود کارایی مدیریت محدودیت‌های ایستگاه‌های توزیع را بدون نیاز به کنترل مستقیم توسط تأمین‌کنندگان خدمات فراهم می‌کند و ۸۲٪ از کارایی رویکرد مرکزی بهینه نظری را بر اساس شبیه‌سازی‌ها با داده‌های ۶۲ خانواده دانمارکی به دست می‌آورد. در **Alrumayh et al. (2021)**، چارچوبی برای ادغام سیستم‌های ذخیره سازی انرژی در شبکه‌های توزیع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

پیشنهاد شده است که هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و تأثیر سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی هماهنگ نشده را کاهش می‌دهد. در **Chen & Chang (2023)**، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبور های مصنوعی **(AABC)** برای کاهش هزینه‌های مصرف برق در ریز شبکه‌های مسکونی با سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌سازی باتری معرفی شده است که عملکرد بهتری نسبت به استراتژی‌های مبتنی بر قواعد و کاهش مصرف نشان می‌دهد.

در **Mondal et al. (2017)**، مدل بازی استکلبرگ با رهبران و پیروان متعدد برای مطالعه سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی توزیع‌شده در ائتلاف‌هایی از ریزشبکه‌ها و مشتریان استفاده شده که نشان می‌دهد طرح پیشنهادی می‌تواند سود شبکه را تا ۵۵٪ و مصرف انرژی مشتریان را تا ۳۰.۷۹٪ افزایش دهد. در **Xu et al. (2023)**، استراتژی مدیریت انرژی خانگی هوشمند با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق پیشنهاد شده است که تجارت انرژی محلی بین مشتریان مسکونی را بهبود می‌بخشد و منافع اقتصادی و کارایی تصمیم‌گیری را از طریق فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف و شبیه سازی‌های چندعاملی نشان می‌دهد. در **Mansouri et al. (2022)**، چارچوب برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح دو مرحله‌ای برای زمان‌بندی ریز شبکه‌ها و پیکربندی مجدد فیدرهای توزیع پیشنهاد شده است که هدف آن کاهش هزینه‌های عملیاتی و انحرافات از برنامه‌های ریزشبکه تحت عدم قطعیت‌های تقاضای بار، قیمت بازار و تولید تجدیدپذیر است.

در **Kang et al. (2024)**، الگوریتم بهینه سازی توزیع شده و مقاوم برای تحویل اقتصادی توان در خانه‌های هوشمند در ریز شبکه‌ها پیشنهاد شده است که محدودیت‌های شبکه و حملات امتناع از خدمت **(DoS)**را در نظر می‌گیرد و شبیه سازی‌ها اثربخشی آن را حتی در شرایط ارتباطات نامطلوب نشان می‌دهند. در **Annamalai et al. (2024)**، تکنیک ترکیبی جدیدی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی در ریزشبکه‌های شبکه‌شده معرفی شده است که شبکه‌های کانولوشن گرافی بهبود یافته برای پیش‌بینی تقاضا و الگوریتم بهینه سازی شکار ماهی پیرانا **(NEGCN-PFOA)** برای بهینه‌سازی هزینه‌ها را ترکیب می‌کند. در **Khosravi et al. (2022)**، مدل بهینه‌سازی دو سطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای بهینه‌سازی زمان‌بندی در شبکه‌های توزیع مدرن با هماهنگی برنامه‌های ریز شبکه و پیکربندی مجدد فیدر توزیع پیشنهاد شده است که منجر به کاهش ۲۷.۰۵٪ در هزینه‌های عملیاتی و بهبود راحتی مصرف‌کنندگان می‌شود.

در **Nowbandegani et al. (2024)**، برنامه بهینه‌سازی جامعی برای افزایش کارایی اقتصادی و تاب‌آوری شبکه توزیع با ادغام پاسخ به تقاضا، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خانگی، قیمت گذاری در زمان واقعی و پیکربندی خودترمیم در مدیریت انرژی هوشمند خانه‌ها پیشنهاد شده است. در **Araoye et al. (2024)**، مدل اقتصادی فنی جدیدی برای بهینه‌سازی اندازه ریز شبکه‌های هیبریدی مستقل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جیرجیرک پیشنهاد شده است که پیکربندی‌های بیوگاز/دیزل را به عنوان راه‌حل‌های مقرون به صرفه‌تر برای انرژی پایدار در جوامع دورافتاده نشان می‌دهد.

۲-۱- انگیزه تحقیق

با توجه به تغییرات سریع در فناوری‌های انرژی و چالش‌های جهانی در زمینه تغییرات اقلیمی و کمبود منابع انرژی، استفاده بهینه از منابع انرژی و افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی محلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ریزشبکه‌های خانگی به عنوان واحدهای خودمختار و انعطاف‌پذیر، پتانسیل بالایی برای مدیریت بهینه مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها دارند. با این حال، ریزشبکه‌های خانگی با چالش هایی نظیر عدم قطعیت‌های تولید انرژی تجدیدپذیر، نوسانات تقاضای انرژی و پیچیدگی‌های مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی روبه‌رو هستند. یکی از رویکردهای نوین برای افزایش کارایی و رقابت پذیری ریزشبکه‌های خانگی، همکاری این ریز شبکه‌ها در قالب ائتلاف ها در شبکه‌های متصل برق و حرارت است. این همکاری‌ها می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌ها و افزایش سود در بازار انرژی کمک کند. با این حال، نیاز به مدل‌های بهینه‌سازی پیچیده برای مدیریت این شبکه‌های مشترک و در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و پیچیدگی‌های عملیاتی موجود، به یک چالش اساسی تبدیل شده است. هدف این تحقیق، ارائه یک چارچوب استراتژیک برای مدیریت بهینه ریزشبکه‌های خانگی است که از مدل‌های بهینه سازی دو سطحی و استراتژی‌های مدیریت تقاضا بهره می‌برد. این چارچوب به ریز شبکه‌ها این امکان را می‌دهد که با همکاری یکدیگر در شبکه‌های برق و گرما، بهره‌وری بیشتری را از منابع محلی بدست آورده و به بهبود عملکرد اقتصادی و محیطی سیستم‌ها کمک کنند. انگیزه اصلی این تحقیق، یافتن راه‌حل‌هایی برای حل چالش‌های موجود در مدیریت منابع انرژی خانگی و افزایش رقابت‌پذیری این سیستم‌ها در بازار انرژی است.

۳-۱- شکاف مطالعاتی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها و استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی برای حل مسائل پیچیده انرژی، هنوز چندین شکاف مهم در تحقیقات موجود وجود دارد که نیاز به توجه بیشتری دارند. یکی از این شکاف‌ها، محدودیت‌های موجود در مدل‌های بهینه‌سازی برای مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی در ریزشبکه‌های خانگی است. بیشتر تحقیقات موجود، به‌طور جداگانه به مدیریت انرژی الکتریکی یا حرارتی پرداخته‌اند و کمتر به هماهنگی این دو نوع انرژی در یک مدل جامع توجه کرده‌اند. علاوه بر این، بسیاری از مدل‌ها تنها به عدم قطعیت های بار یا تولید انرژی تجدید پذیر پرداخته‌اند و تأثیرات متقابل بین این دو عامل در محیط‌های پیچیده و واقعی را در نظر نگرفته‌اند. در نتیجه، بیشتر مدل‌ها فاقد انعطاف‌پذیری کافی برای مواجهه با شرایط پویا و عدم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

قطعیت‌های واقعی هستند که می‌توانند منجر به عملکرد ضعیف در شرایط عملیاتی مختلف شود. همچنین، اغلب تحقیقات به بررسی ریزشبکه‌ها در شرایط انفرادی پرداخته‌اند و درک کافی از چگونگی همکاری ریزشبکه‌ها در قالب ائتلاف‌ها و تعاملات پیچیده میان آن‌ها در شبکه‌های متصل برق و حرارت وجود ندارد. این خلا باعث می‌شود که بسیاری از مدل‌ها نتوانند به‌طور کامل پتانسیل همکاری ریز شبکه‌ها را برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها شبیه سازی و تحلیل کنند. در نهایت، بسیاری از روش های بهینه سازی پیشنهادی در مطالعات قبلی پیچیدگی‌های محاسباتی زیادی دارند و قادر به مدیریت عدم قطعیت‌ها و تصمیم‌گیری‌های پیچیده در مقیاس بزرگ نیستند. به این ترتیب، مدل‌هایی که قادر به حل مسائل پیچیده با کمترین هزینه محاسباتی و در شرایط عدم قطعیت بالا باشند، هنوز در مطالعات موجود به‌طور کافی توسعه نیافته‌اند. این تحقیق سعی دارد تا شکاف‌های ذکر شده را پر کرده و مدل بهینه سازی دو سطحی برای مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی در ریز شبکه‌های خانگی معرفی کند که با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و تعاملات پیچیده میان ریزشبکه‌ها، بتواند به بهبود عملکرد اقتصادی و تاب‌آوری این سیستم‌ها کمک کند.

۴-۱- نوآوری تحقیق

نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک چارچوب استراتژیک نوین برای مدیریت بهینه انرژی در ریز شبکه‌های خانگی است که از مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای هماهنگی و مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با بهره می برد. این تحقیق به‌طور خاص به چالش‌هایی می پردازد که در بیشتر تحقیقات قبلی نادیده گرفته شده‌اند، از جمله:

۱. مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی: بیشتر مدل‌ها به‌طور جداگانه به مدیریت هر یک از این دو نوع انرژی پرداخته‌اند، در حالی که این تحقیق یک مدل جامع و هماهنگ برای مدیریت هر دو نوع انرژی ارائه می‌دهد، که این امر باعث افزایش کارایی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ریزشبکه‌های خانگی می‌شود.

۲. مدیریت عدم قطعیت ها در سیستم‌های متصل: برخلاف بسیاری از تحقیقات که تنها به عدم قطعیت‌های بار یا تولید انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند، این تحقیق به مدیریت عدم قطعیت‌ها در شبکه‌های متصل برق و حرارت توجه می‌کند. مدل پیشنهادی با استفاده از یک استراتژی مدیریت تقاضا مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، قادر است عدم قطعیت‌های مربوط به تولید تجدید پذیر و تقاضای بار را به‌طور مؤثر مدیریت کند.

۳. همکاری ریز شبکه‌ها در قالب ائتلاف ها: این تحقیق بر مدل‌های همکاری ریزشبکه‌ها در قالب ائتلاف‌ها تأکید دارد، که می‌توانند به بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در شبکه‌های متصل کمک کند. برخلاف بسیاری از تحقیقات که به مطالعه ریزشبکه‌ها به‌طور جداگانه پرداخته‌اند، این تحقیق نحوه تعامل و همکاری ریز شبکه‌ها برای بهبود عملکرد اقتصادی و محیطی را شبیه‌سازی می‌کند.

۴. کاهش پیچیدگی محاسباتی در مدل‌های بهینه سازی: این تحقیق از الگوریتم تکاملی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای استفاده می‌کند که می‌تواند مسائل پیچیده بهینه‌سازی را با کاهش هزینه‌های محاسباتی حل کند. این نوآوری به مدل قابلیت های محاسباتی بهتری می‌دهد و امکان استفاده از آن را در مقیاس های بزرگ و در شرایط عملیاتی واقعی فراهم می‌آورد.

در مجموع، این تحقیق با معرفی یک مدل بهینه‌سازی جامع و پویا که قادر به مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی در ریز شبکه‌های خانگی است و همچنین توجه به مدیریت عدم قطعیت ها و همکاری ریزشبکه‌ها، گامی مهم در راستای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها در سیستم‌های انرژی خانگی و متصل به شبکه‌های بزرگ‌تر برمی‌دارد.

۲- رویکرد پیشنهادی

در این تحقیق، یک رویکرد استراتژیک و جامع برای مدیریت بهینه انرژی در ریزشبکه‌های خانگی با هدف بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها معرفی می شود. این رویکرد از یک مدل بهینه سازی دو سطحی بهره می‌برد که همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی را مدیریت می‌کند و تعاملات پیچیده میان ریزشبکه‌ها در شبکه‌های متصل برق و حرارت را در نظر می‌گیرد. رویکرد پیشنهادی شامل مراحل زیر است:

۱. مدل‌سازی دو سطحی: در این رویکرد، یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی طراحی می‌شود که در سطح اول، تمرکز بر بهینه سازی سود اپراتور شبکه است، به‌طوری که منابع انرژی تجدید پذیر و منابع تولید همزمان گرما و برق (**CHP**) در نظر گرفته می شود. در سطح دوم، مدل بهینه‌سازی هزینه‌های تأمین انرژی برای ریز شبکه‌های خانگی را هدف قرار می‌دهد، به‌طوری که تقاضای انرژی در این ریزشبکه‌ها به‌صورت بهینه مدیریت شود.

۲. مدیریت تقاضای انرژی با استراتژی‌های نوین: برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در تولید انرژی تجدیدپذیر و تقاضای متغیر، یک استراتژی مدیریت تقاضا به‌طور ویژه طراحی شده است. این استراتژی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای است که می‌تواند نوسانات تقاضا و تولید را در طول زمان پیش‌بینی و به‌طور مؤثری مدیریت کند. این روش به ریزشبکه‌ها این امکان را می‌دهد که به‌طور دقیق‌تر و کارآمدتری منابع خود را مدیریت کرده و از افزایش هزینه‌ها و نوسانات قیمت انرژی جلوگیری کنند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

۳. ایجاد ائتلاف‌های ریزشبکه‌ها: به منظور بهبود بهره‌وری و افزایش رقابت‌پذیری در بازار انرژی، ریزشبکه‌های خانگی به صورت ائتلافی عمل می‌کنند. در این رویکرد، ائتلاف‌ها به همکاری در تامین انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کنند و در عین حال انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های انرژی را افزایش می‌دهند.

۴. حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم های تکاملی: برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی ناشی از عدم قطعیت‌ها و تعاملات متعدد میان ریزشبکه‌ها، از الگوریتم تکاملی برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای (**MSSP-PSO**) استفاده می شود. این الگوریتم قادر است به‌طور مؤثر و با هزینه محاسباتی پایین، مسائل بهینه سازی را در مقیاس بزرگ حل کند و نتایج دقیقی در زمینه کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری ارائه دهد.

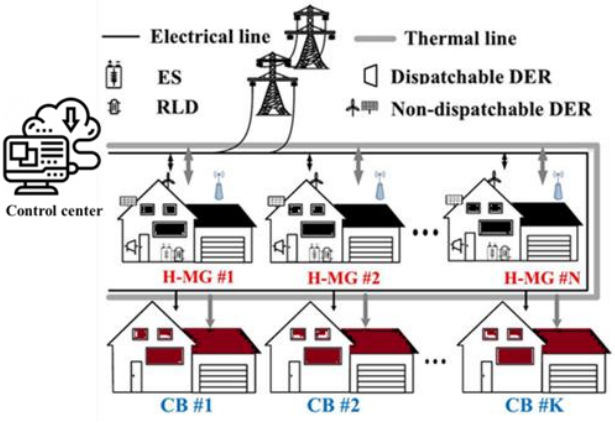
۵. ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی: برای ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی، شبیه سازی‌های جامع در شرایط مختلف انجام می‌شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثری هزینه‌های انرژی را کاهش دهد، مصرف بار های پاسخگو را افزایش دهد و تولید محلی انرژی را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد.

در مجموع، رویکرد پیشنهادی این تحقیق، به‌عنوان یک راه‌حل جامع و کارآمد، می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های خانگی کمک کرده و با کاهش هزینه‌ها و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های انرژی، عملکرد اقتصادی و محیطی این سیستم‌ها را بهبود بخشد.

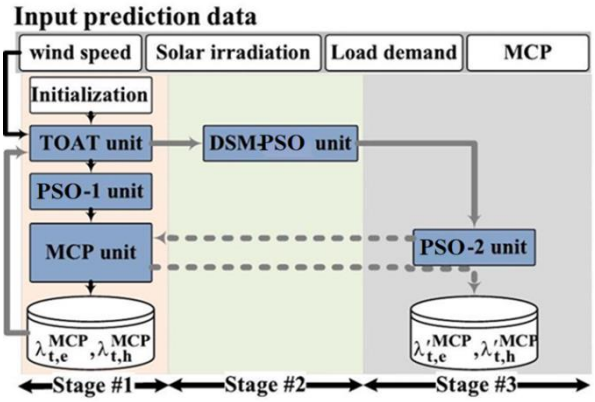
این بخش به معرفی برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای (**MSSP**) همراه با الگوریتم بهینه سازی تجمعی ذرات (**PSO**) برای مدیریت انرژی در ریز شبکه‌های خانگی متصل (**H-MGs**) پرداخته است. الگوریتم **MSSP-PSO** به‌طور خاص برای بهینه سازی عملیات ریزشبکه‌های خانگی طراحی شده است، به‌طوری که تولید، مصرف و ذخیره‌سازی انرژی را در پاسخ به نوسانات تقاضا و تولید تجدید پذیر مدیریت می‌کند.

شکل ۱ نمای کلی از ریزشبکه‌های خانگی متصل به ساختمان‌های سنتی (**CB**) مختلف را نشان می‌دهد. این سیستم به‌عنوان یک شبکه فعال از ریزشبکه‌های خانگی متعدد طراحی شده است که هر کدام مجهز به منابع انرژی توزیع شده قابل کنترل و غیرقابل کنترل (**DERs**)، واحدهای ذخیره‌سازی و بارهای مصرفی مسکونی (**RLDs**) مربوطه هستند. منابع انرژی غیرقابل کنترل مانند سیستم‌های بادی و فتوولتائیک خورشیدی به منابع انرژی تجدیدپذیر وابسته هستند، اما به دلیل تغییرپذیری و غیرقابل پیش‌بینی بودن این منابع، قابلیت کنترل ندارند. در این تنظیم، هر ریزشبکه خانگی که یک تجمیع‌کننده دارد، می‌تواند کمبود برق خود را از سایر ریزشبکه‌ها تأمین کند. ساختمان‌های سنتی انرژی را از چندین ریزشبکه یا شبکه بالادستی خریداری می‌کنند و مصرف انرژی آنها قابل کنترل نیست. هنگامی که یک ریزشبکه خانگی برق مازاد تولید می‌کند، می‌تواند این انرژی اضافی را به سایر ریزشبکه‌ها در شبکه، شبکه بالادستی یا ساختمان‌های سنتی متصل بفروشد. برق بر اساس شرایط مناقصه توزیع می‌شود. به‌عکس، اگر یک ریزشبکه خانگی با کمبود برق روبه‌رو شود و نتواند تقاضای خود را تأمین کند، باید انرژی را از سایر ریزشبکه‌ها یا شبکه بالادستی وارد کند یا بارهای خود را تنظیم نماید. یک مرکز کنترل که در شکل ۱ نشان داده شده است، عملیات و مدیریت ریز شبکه خانگی مربوطه را نظارت می‌کند. این مرکز استراتژی‌هایی برای هماهنگ سازی عملکرد ریز شبکه‌های خانگی متصل در یک سیستم توزیع چند ریزشبکه خانگی طراحی می‌کند. مرکز کنترل به‌طور مستقل عمل می‌کند و هدف آن حداکثرسازی سود برای تمام ریزشبکه‌های خانگی است، در حالی که ائتلاف های ممکن میان آنها را در نظر می‌گیرد. شکل ۲ فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نمایش می‌دهد. مدل، عدم قطعیت‌هایی مانند تقاضای بار، تولید انرژی تجدیدپذیر و قیمت پاکسازی بازار (**MCP**) را در نظر می‌گیرد. برای مدیریت این عدم قطعیت ها، از روش آمون آرایه متعامد تاگوچی (**TOAT**) استفاده می‌شود که دقت راه حل را با کارایی محاسباتی متعادل می‌کند. روش **TOAT** حداقل سناریوهای مورد نیاز را انتخاب می‌کند در حالی که ویژگی های آماری کل مجموعه داده را حفظ می‌کند. جزئیات بیشتر در مورد چارچوب تصادفی مطالعه در منابع [۲۶] موجود است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ساختار شامل واحدهای **TOAT**، **PSO-1**، **DSM-PSO**، **PSO-2** و **MCP** است. در حالی که واحدهای **TOAT** و **MCP** به‌طور کامل در منبع [۲۶] توضیح داده شده‌اند، تمرکز در اینجا بر روی واحدهای **PSO-1**، **DSM-PSO** و **PSO-2** است. ابتدا، الگوریتم **PSO** به ظرفیت اسمی و محدودیت‌های عملیاتی **DER**های موجود نیاز دارد. سپس داده‌های پیش‌بینی‌شده، شامل تابش خورشیدی، سرعت باد، تقاضای الکتریکی/حرارتی و قیمت برق به واحد **TOAT** ارسال می‌شود. پس از آن، واحد **PSO-1** برای تعیین مقدار **MCP-1** اجرا می‌شود. پس از تعیین **MCP-1**، مدیریت تقاضای انرژی برای بهبود کارایی انرژی و کاهش تقاضای اوج، بر اساس تابع هدف واحد **PSO-2** انجام می‌شود. پس از تنظیم منحنی بار و کاهش **MCP** از برنامه **RLD**، **MCP-2** محاسبه و به اپراتور بازار گزارش می شود. در شکل ۲، خطوط مشکی یکپارچه روند اجرای واحد **PSO-1** را نشان می دهد، در حالی که خطوط خاکستری چین نشان دهنده اجرای واحد **PSO-2** برای محاسبه **MCP-2** است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]



شکل (۱): ساختار پیشنهادی توزیع و شبکه‌های خانگی چندگانه (Goodarzi, et al. 2024)



شکل (۲): الگوریتم MSSP-PSO پیشنهادی

۲-۱- واحد PSO-1

ورودی‌های مدل شامل توان حرارتی پیش‌بینی‌شده تولید شده توسط سیستم‌های حرارتی خورشیدی، توان الکتریکی پیش‌بینی شده تولید شده توسط توربین های بادی، تقاضای پیش‌بینی شده توان الکتریکی و حرارتی، قیمت پاکسازی بازار پیش‌بینی شده برای توان الکتریکی و حرارتی است. این داده‌ها اطلاعات موردنیاز برای مدیریت بهینه انرژی در ریزشبکه‌های خانگی متصل را فراهم می‌کنند و نقش کلیدی در تصمیم‌گیری‌های سیستم دارند.

متغیرهای تصمیم شامل توان الکتریکی و حرارتی تولیدشده، نرخ شارژ و دشارژ واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و ذخیره سازی انرژی حرارتی، توان تبادلی با ریز شبکه‌های خانگی دیگر و شبکه بالادستی، پیشنهادهای خرید و فروش منابع انرژی توزیع شده، ریز شبکه‌های خانگی و مصرف‌کنندگان، و متغیرهای باینری است. علاوه بر این، قیمت‌های پاکسازی بازار برای توان الکتریکی و حرارتی نیز به‌عنوان متغیرهای کلیدی در نظر گرفته شده‌اند که به تخصیص بهینه منابع کمک می‌کنند.

اهداف مدل شامل بهینه‌سازی تولید توان الکتریکی و حرارتی به‌منظور حداکثرسازی سود است. این اهداف از طریق الگوریتم‌های بهینه سازی تجمعی ذرات دنبال می‌شوند که شامل حداکثرسازی سود از عملیات ریزشبکه خانگی به‌صورت مستقل یا در تعامل با سایر ریز شبکه‌ها در قالب ائتلاف‌های مختلف، ایجاد تعادل الکتریکی و حرارتی در سیستم، و بهبود وضعیت شارژ واحدهای ذخیره سازی انرژی و ذخیره سازی انرژی حرارتی می‌شود. رویکرد پیشنهادی تلاش می‌کند تا ضمن ایجاد تعادل در تولید و مصرف، بهبود وضعیت ذخیره‌سازی انرژی و مدیریت هزینه‌ها، سودآوری کل سیستم را به حداکثر برساند.

۲-۲- واحد PSO-DSM

ورودی‌های مدل شامل تقاضای توان الکتریکی در زمان مشخص و قیمت پاکسازی بازار برای توان الکتریکی در همان زمان است. این داده‌ها اطلاعات پایه‌ای برای مدیریت تقاضای انرژی و بهینه سازی مصرف را فراهم می‌کنند.

متغیر های تصمیم در این بخش شامل توان الکتریکی مصرفی افزایش‌یافته و کاهش‌یافته توسط بارهای قابل‌انعطاف خانگی است. این متغیرها به عنوان ابزارهایی برای کنترل و تنظیم مصرف انرژی در واکنش به تغییرات قیمت بازار عمل می‌کنند.

هدف اصلی این بخش، هموارسازی منحنی تقاضای انرژی است. این کار با انتقال مصرف انرژی از دوره‌های اوج (با قیمت پاکسازی بازار بالا) به دوره‌های کم‌باری (با قیمت پایین) انجام می‌شود. این رویکرد که معمولاً در پاسخ به تغییرات قیمت بازار اجرا می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش بهره‌وری شبکه شود.

۲-۳- واحد PSO-2

ورودی‌های مدل شامل توان حرارتی پیش‌بینی‌شده تولید شده توسط سیستم‌های حرارتی خورشیدی، توان الکتریکی پیش‌بینی شده تولید شده توسط توربین های بادی، تقاضای پیش‌بینی شده توان الکتریکی و حرارتی، بارهای قابل‌انعطاف افزایش‌یافته و کاهش‌یافته، و قیمت‌های پاکسازی بازار برای توان الکتریکی و حرارتی است. این ورودی‌ها داده‌های کلیدی برای بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی در ریزشبکه‌های خانگی را فراهم می‌کنند.

متغیرهای تصمیم شامل توان الکتریکی و حرارتی تولیدی، نرخ تولید ترکیبی حرارت و برق، نرخ مصرف سوخت، تغییرات بار های قابل‌انعطاف در دوره‌های زمانی مختلف، قیمت های نهایی بازار برای توان الکتریکی و حرارتی، و توان تبادلی بین ریز شبکه‌های مختلف و شبکه بالادستی است. این متغیرها ساختار دینامیک و انعطاف پذیری سیستم را به‌خوبی منعکس می‌کنند.

هدف این مدل، بهینه‌سازی مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه بارهای قابل‌انعطاف و تولید توان از منابع مختلف برای حداکثرسازی سود است. در این راستا، پروفایل تقاضای بار با استفاده از قیمت های پاکسازی بازار برای توان الکتریکی و حرارتی بهینه‌سازی می‌شود. واحد **PSO-2** به‌طور خاص مسئولیت توزیع مجدد بارهای منتقل‌شده از دوره‌های اوج

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

با قیمت‌های بالا به دوره‌های کم‌باری با قیمت‌های پایین را برعهده دارد. علاوه بر این، مقدار بار منتقل‌شده در هر دوره زمانی با تقاضای همان دوره مطابقت داده می‌شود.

واحد **PSO-2** همچنین مقدار مشخصی از بارهای قابل‌انعطاف را برای دوره مشخص بررسی می‌کند که از سایر دوره‌های زمانی جابجا شده است. در نهایت، مصرف نهایی در هر دوره، با در نظر گرفتن انتقال بارهای ورودی و خروجی و هرگونه کاهش، ممکن است بیشتر یا کمتر از تقاضای اولیه پیش‌بینی‌شده باشد. لازم به ذکر است که در صورتی که برخی از وسایل نتوانند مصرف خود را به دوره های دیگر انتقال دهند، مصرف کلی ممکن است کمتر از تقاضای اولیه پیش‌بینی شده باشد.

در مجموع، الگوریتم **MSSP-PSO** که شامل معیار نوآورانه بار های قابل‌انعطاف از طریق واحدهای **PSO-1** و **PSO-2** است، به عنوان رویکردی قابل‌اعتماد، کارآمد و مقرون‌به صرفه برای مدیریت بهینه انرژی در ریزشبکه‌های خانگی به اثبات رسیده است.

۴-۲- واحد MCP

در این بخش، قیمت پاکسازی بازار (**MCP**) با استفاده از برنامه‌های بهینه حاصل از واحدهای **PSO-1** و **PSO-2** و پیشنهادهای عرضه و تقاضای شرکت‌کنندگان در بازاری پیش‌نگر و مبتنی بر مزایده دوطرفه تعیین می‌شود. واحد **MCP** این پیشنهادها و برنامه‌های بهینه را به‌عنوان پارامترهای ورودی دریافت می‌کند.

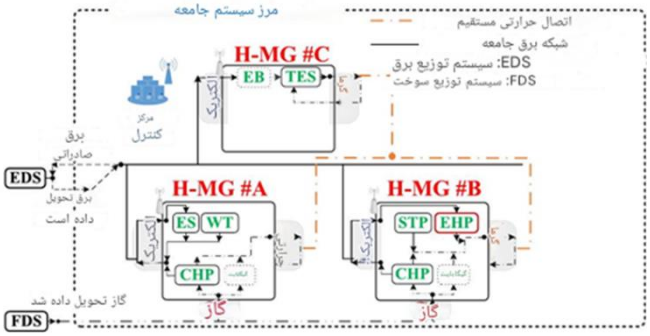
در بازار پیش‌نگر، عرضه و تقاضا به صورت جفت های قیمت-مقدار تنظیم و بر اساس ترتیب شایستگی مرتب می شوند. مقادیر از برنامه‌های بهینه واحدهای **PSO-1** و **PSO-2** استخراج می شوند، در حالی که قیمت‌ها بازتاب‌دهنده پیشنهادهای شرکت‌کنندگان هستند. همان‌طور که انتظار می‌رود، عرضه تجمیعی به شکل یک منحنی پلکانی صعودی و تقاضای تجمیعی به صورت یک منحنی پلکانی نزولی شکل می‌گیرد. نقطه تقاطع این دو منحنی، **MCP** را مشخص می‌کند. پس از تعیین **MCP**، واحد **MCP** مقدار تابع پرداخت را برای هر شرکت‌کننده محاسبه می‌کند. این مقدار نشان‌دهنده سود یا هزینه‌ای است که هر شرکت‌کننده بر اساس پیشنهادها و برنامه‌های اجرایی متحمل می‌شود.

۳- مدل پیشنهادی

در این تحقیق، چارچوب بهینه‌سازی سه‌سطحی به‌عنوان روشی برای حل مسائل پیچیده همکاری ریزشبکه‌ها در شبکه‌های متصل برق و گرما ارائه شده است. این رویکرد سه سطح دارد که هر کدام وظایف خاصی را در فرایند بهینه‌سازی برعهده دارند. در سطح اول، مدل به‌طور کلی به بهینه‌سازی سود اپراتور شبکه می پردازد و هدف آن حداکثر کردن سود کلی سیستم با توجه به منابع انرژی تجدید پذیر و تولید همزمان برق و گرما است. در این سطح، تصمیم‌گیری‌هایی در مورد تخصیص منابع و قیمت‌گذاری انرژی انجام می‌شود تا سود کل سیستم به حداکثر برسد. در سطح دوم، این مدل به بررسی هزینه تأمین برق برای ریز شبکه‌ها پرداخته و هدف آن کاهش هزینه‌های تأمین انرژی با بهینه‌سازی مصرف انرژی در ریزشبکه‌ها است. در این سطح، تصمیمات مربوط به انتخاب منابع تأمین انرژی و میزان خرید برق از شبکه بالادستی گرفته می‌شود. در سطح سوم، مدل به مدیریت تقاضای انرژی می‌پردازد و تلاش می‌کند تا با استفاده از استراتژی‌های مختلف مانند برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، نوسانات تقاضا و تولید انرژی را به‌طور مؤثری کنترل کند. این رویکرد سه‌سطحی به‌طور کامل شرایط پیچیده و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های ریز شبکه‌ای را در نظر می‌گیرد و از طریق این سطوح به‌طور همزمان به بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش سود کمک می‌کند.

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، این روش در یک مطالعه موردی شامل سیستم چند ریزشبکه خانگی (ریز شبکه‌های **H**) نشان داده شده در شکل ۳ اعمال شده است. این سیستم شامل سه ریزشبکه خانگی مجزا به نام‌های **A**، **B** و **C** است که هر کدام دارای ترکیبی از منابع انرژی قابل برنامه‌ریزی و غیرقابل برنامه‌ریزی هستند. در این شکل، ریزشبکه‌های **H-A** و **H-B** دارای منابعی برای ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی مازاد هستند.

در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، هر ریزشبکه تصمیم می‌گیرد که به صورت مستقل یا در ائتلاف با دیگر ریز شبکه‌ها عمل کند و قیمت های مصرف‌کننده را برای کل دوره تعیین می‌کند. پس از تعیین وضعیت عملیاتی (به‌صورت فردی، مانند {**A**}، {**B**}، {**C**}، {**UG**}) یا به صورت ائتلافی (مانند {**AB**}، {**AC**}، {**BC**}، {**ABC**}) و قیمت ها، هر ریزشبکه مقدار انرژی مورد نیاز برای خرید یا فروش به منظور تأمین تقاضای مصرف‌کننده برای هر دوره (مانند یک ساعت) در کل افق برنامه‌ریزی (مانند ۲۴ ساعت) را مشخص می‌کند. اطلاعات دقیق در مورد ظرفیت تجهیزات هر ریزشبکه در مرجع [۲۶] موجود است و در اینجا تکرار نمی‌شود. ابتدا، توابع هدف برای این مطالعه موردی تشریح می‌شوند و سپس نتایج اصلی حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرند.



شکل (۳): دیاگرام سیستم مورد مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

۱-۳- تابع هدف

توابع هدف در واحدهای **PSO-1** و **PSO-2** بر حداکثرسازی سود برای هر ریزشبکه **H** متمرکز هستند، چه در حالت عملکرد مستقل و چه در حالت مشارکت در ائتلاف. با این حال، تابع هدف واحد **PSO-2** شامل سود حاصل از مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه تغییر بار (**RLD**) نیز می‌شود. بخش‌های بعدی مدل ریاضی مسئله مورد بحث در این مقاله را ارائه می‌دهند. الگوریتم **MSSP-PSO** یک مسئله تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای را با توابع هدف تعریف شده در واحدهای **PSO-1** و **PSO-2** حل می‌کند. این مسئله تحت محدودیت‌هایی از جمله مسائل پاکسازی بازار مرتبط با معاملات پُلی قرار دارد و هر تابع هدف بر حداکثرسازی سود تمرکز دارد.

برای دستیابی به این اهداف، الگوریتم **MSSP-PSO** برای افزایش سود مشارکت‌کنندگان در یک بازار برق آزادسازی شده طراحی شده است. مدل ریاضی منعکس‌کننده تعادل در یک بازار مبتنی بر پُل است و بر حداکثرسازی سود مورد انتظار ریزشبکه‌های **H** در بازار روزانه تمرکز دارد و به سودهای پیش‌بینی‌شده از تشکیل ائتلاف با شبکه بالادستی یا دیگر ریزشبکه‌های **H** نیز توجه دارد. تقاضا به‌عنوان یک عامل خارجی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که پیشنهادهای تأمین و تولید انرژی منابع انرژی توزیع‌شده (**DER**) به‌عنوان متغیر های مدل در نظر گرفته شده‌اند.

بهینه‌سازی مدل با هدف حداکثر سازی سود ریز شبکه‌های **H**، با درنظرگرفتن ائتلاف‌های بالقوه و محدودیت‌های مرتبط با ریزشبکه‌های **H**، منابع انرژی توزیع‌شده، و زمان‌بندی برنامه‌های تغییر بار طراحی شده است. این مدل تضمین می‌کند که بازار انرژی روزانه تحت شرایط مختلف به‌طور مؤثر پاکسازی شده و چالش های حداکثر سازی سود همه ریزشبکه‌های **H** مورد توجه قرار می‌گیرند.

چارچوب پیشنهادی تشریح می‌کند که چگونه می‌توان استراتژی‌های بهینه برای تمامی مشارکت‌کنندگان، شامل ریز شبکه‌های **H**، منابع انرژی توزیع‌شده آن‌ها، و شبکه بالادستی را تعیین کرد. این چارچوب به ریزشبکه‌های **H** اجازه می‌دهد سطح مشارکت خود در بازار را انتخاب کرده و قیمت‌های خرید/فروش را با هدف حداکثر سازی سود مورد انتظار تعیین کنند. مسئله بهینه‌سازی به‌صورت ریاضی به شرح زیر فرمول‌بندی شده است.

در حالت عملکرد مستقل، هر ریزشبکه **H** تلاش می‌کند سود خود را از طریق بهینه‌سازی تولید، مصرف، و تبادل انرژی با شبکه بالادستی یا دیگر ریزشبکه‌ها به حداکثر برساند. این بهینه سازی شامل مدیریت منابع انرژی توزیع‌شده قابل مدیریت و غیرقابل مدیریت، همچنین واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و گرما است. تقاضای بار در این سناریو به‌عنوان یک ورودی خارجی در نظر گرفته می شود و مدل به دنبال بیشینه‌سازی سود خالص تولید شده پس از کسر هزینه‌های عملیاتی و تأمین انرژی است.

در حالت ائتلاف، ریزشبکه‌های **H** می‌توانند به‌صورت گروهی فعالیت کرده و منابع خود را برای دستیابی به سود بیشتر ترکیب کنند. ائتلاف‌ها ممکن است شامل ترکیب دو یا چند ریزشبکه **H** یا ترکیب با شبکه بالادستی باشد. توابع هدف در این سناریو به دنبال حداکثرسازی سود کلی ائتلاف هستند، با این فرض که سود هر ریز شبکه به صورت عادلانه در میان اعضا تقسیم می‌شود. این سناریو مزایای بالقوه‌ای از جمله کاهش هزینه‌ها از طریق اشتراک منابع و بهبود انعطاف پذیری شبکه فراهم می‌کند.

علاوه بر این، واحد **PSO-2** تأثیر مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه تغییر بار (**RLD**) را نیز در نظر می‌گیرد. این واحد تلاش می‌کند تا با جابه‌جایی بار از ساعات اوج مصرف (با قیمت‌های بالاتر) به ساعات غیر اوج (با قیمت‌های پایین‌تر)، سودآوری را افزایش دهد. همچنین، این جابه‌جایی باید به‌گونه‌ای انجام شود که تقاضای کل در هر دوره زمانی به تعادل برسد و از ایجاد اضافه‌بار یا کاهش شدید تقاضا جلوگیری شود.

توابع هدف در تمامی سناریوها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر حداکثرسازی سود، پایداری شبکه، تعادل عرضه و تقاضا، و بهره‌وری استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را تضمین کنند. این رویکردها با درنظرگرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با تقاضای بار، تولید انرژی تجدیدپذیر، و قیمت‌های بازار انرژی طراحی شده‌اند تا نتایج بهینه و قابل اعتماد حاصل شود. در این تحقیق، تابع هدف به‌گونه‌ای انتخاب شده است که به حداکثرسازی سود سیستم از طریق مدیریت بهینه انرژی الکتریکی و حرارتی در ریزشبکه‌ها بپردازد. این انتخاب به دلیل نیاز به هماهنگی دقیق بین تولید و مصرف انرژی، به ویژه در شرایط عدم قطعیت و نوسانات بازار انرژی است. از این رو، تابع هدف به گونه‌ای طراحی شده که می‌تواند بهترین راه‌حل های ممکن را برای کمینه کردن هزینه‌ها و بیشینه کردن سود برای تمامی اجزای سیستم پیشنهاد دهد. این انتخاب، اهمیت ویژه‌ای در مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند و بهینه سازی منابع در مقیاس کوچک دارد و به‌طور خاص در بهبود عملکرد اقتصادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در ریزشبکه‌ها مؤثر است.

$$Profit^{\,i}\big|_{\forall i} = \boldsymbol{max} \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{\forall k \mapsto i} \left(P_{t,e}^{k,i} \times \pi_{t,e}^{k,i} + P_{t,h}^{k,i} \right) - \sum_{\forall j \neq i} \begin{pmatrix} P_{t,e}^{i-,j} \times \pi_{t,e}^{i-j} + P_{t,h}^{i-,j} \times \pi_{t,h}^{i-j} \\ -\left(P_{t,e}^{i+j} \times \pi_{t,e}^{i+,j} + P_{t,h}^{i+,j} \times \pi_{t,h}^{i+,j} \right) \end{pmatrix} + P_{t,e}^{UG} - \sum_{\forall k \mapsto i} FU_t^{k,i} \times \pi^{ng} \right) \quad (۱)$$

اولین جمله در سمت راست معادله (۱) نشان‌دهنده درآمد حاصل از تولید برق و حرارت توسط منابع انرژی توزیع شده ***k (DER)*** در ریزشبکه ***H-MG_i*** است. جمله بعدی به هزینه سوخت مورد نیاز

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

برای منابع حرارتی ا شاره دارد. جم له سوم ب یانگر درآ مد حا صل از فروش برق به دیگر ریزشبکه‌ها، منهای هزینه خرید برق از آن‌ها برای تأمین نیازهای ریزشبکه ***H-MG_i*** است. جمله نهایی نیز هزینه خرید برق از شبکه بالادستی برای تأمین تقاضای بار ریز شبکه ***H-MG_i*** را نشان می‌د هد. سود حا صل از ریز شبکه ***H-MG_i*** و ریز شبکه ***H-MG_j*** (که در آن $j \neq i$ است) در صورت تشکیل ائتلاف شامل مجموع درآمدهای حاصل از فروش برق و حرارت، کاهش هزی نه‌های تول ید و بهره‌گیری از منابع مشترک می‌باشد. این سود بهینه‌سازی شده شامل منافع اقتصادی ناشی از تقسیم بار، کاهش اتلاف انرژی، و مدیریت بهتر عدم قطعیت ها در تول ید م نابع تجدید پذیر ا ست که با ترک یب استراتژی‌های ریزشبکه‌ها در ائتلاف حاصل می‌شود.

$$\sum_{\forall t} \boldsymbol{Profit} = \sum_{\forall t} \boldsymbol{Profit^i} \;@\; \sum_{\forall t} \boldsymbol{Profit^j},\ \forall \boldsymbol{j} \neq \boldsymbol{i} \qquad (۲)$$

سود حاصل از شبکه بالادستی شامل درآ مد نا شی از خر ید و فروش برق بین ریزشبکه‌ها و شبکه بالاد ستی ا ست. ا ین سود می‌توا ند از فروش برق ا ضافی که تو سط ریز شبکه‌ها تول ید شده و به شبکه بالاد ستی منت قل می شود، یا از خر ید برق برای تأمین نیاز های ریزشبکه‌ها در مواقعی که تولید منابع داخلی کافی نی ست، به د ست آید. هدف این است که شبکه بالادستی به‌عنوان یک من بع پ شتیبان برای ریزشبکه‌ها عمل کند و در عین حال از تبادل ا نرژی بهره برداری اقتصادی به‌عمل آورد.

$$\boldsymbol{Profit^{UG}} = \sum_{\forall i,t} \left(\boldsymbol{P_{t,e}^{UG+,i}} \times \boldsymbol{\pi_{t,e}^{UG+,i}} - \boldsymbol{P_{t,e}^{UG-,i}} \times \boldsymbol{\pi_{t,e}^{UG-,i}} \right) \qquad (۳)$$

توابع هدف در ا ین شبیه سازی م شابه توا بع هدف وا حد ***PSO-1*** ه ستند، با ا ین ت فاوت که با ید شامل سود حا صل از م شارکت مصرف‌کنندگان در برنامه مدیریت تقا ضای بار ***(RLD)*** ن یز با شند. بنابراین، جمله زیر باید به تمامی معادلات (۱)-(۳) اضافه شود:

$$\mathbf{Proffit_t^{RLD}} = \mathbf{P_t^{RLD+,i}} \times \boldsymbol{\pi}_\mathbf{t}^{\mathbf{RLD+,i}} - \mathbf{P_t^{RLD-,i}} \times \boldsymbol{\pi}_\mathbf{t}^{\mathbf{RLD-,i}} \qquad (۴)$$

۲-۳- محدودیت‌های فنی و اقتصادی

معادلات مختلف مدل محدودیت‌های خاصی را برای ا جزای مخت لف سی ستم ا نرژی تع یین می‌ک ند. معاد له ۵ م حدودیت‌هایی برای قیمت‌های پیشنهادی برق و حرارت از منابع **DER** تعیین می‌ک ند. در این معادله، $\boldsymbol{\pi}_{e/h}^{k,i}$ نشان‌دهنده قیمت حداقل پیشنهادی و $\bar{\boldsymbol{\pi}}_{elh}^{k,i}$ قیمت حداکثر پیشنهادی برای برق و حرارت در **H-MGi** است. ا ین معاد له معمولاً با استفاده از مقادیر حداقل و حداکثر قیمت برای هر واحد برق و حرارت به‌طور معین، قیمت‌های پیشنهادی را م حدود می‌ک ند تا از وقوع رفتارهای نامناسب در بازار ج لوگیری شود. به‌طور ک لی، ا ین معادله نقش اساسی در ت ضمین پا یداری اقت صادی سی ستم و ح فظ ت عادل بین عر ضه و تقا ضای ا نرژی دارد. از طر یق تع یین ا ین محدودیت‌ها، سیستم قادر به انجام معاملات منصفانه و کارآمد در بازار انرژی می‌شود و ریزشبکه‌ها می‌توانند به‌طور بهینه به تأمین نیاز های انرژی خود پرداخته و به تبادل انرژی با سایر ریزشبکه‌ها یا شبکه‌های بالادستی بپردازند. همچ نین م عادلات ۶ و ۷ هزی نه‌های مرزی برق (**MC_e**) و حرارت (**MC_h**) را برای منابع فسیلی محاسبه می‌ک ند. این هزینه‌ها به‌وسیله معادلات خاصی بر ا ساس قدرت تول ید شده و بهره‌وری منابع تعیین می‌شود. م عادلات ۸ تا ۱۵ به م حدودیت‌های مربوط به ذخیره سازی ا نرژی (**ES**) و ذخیره سازی حرار تی (**TES**) ا شاره دار ند. ا ین م عادلات م حدودیت‌هایی را برای م یزان توان ذخیره‌شده، توان شارژ/دشارژ و تعادل توان در هر دوره ز مانی تعر یف می‌کنند. معادلات ۹ و ۱۴ به‌طور خاص به تغی یرات و ضعیت شارژ (**SOC**) در هر دوره زمانی پرداخ ته و ن حوه به‌روزر سانی آن ها را با استفاده از توان ورودی نشان می‌دهند. مدل‌سازی باتری در این تحقیق به‌عنوان ی کی از ا جزای کل یدی سی ستم ذخیره سازی ا نرژی برای مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی در ریزشبکه‌ها مورد ا ستفاده قرار گرفته است. این مدل‌سازی شامل ت مام جن به‌های ف نی، اقت صادی و رفتاری باتری‌ها می‌شود تا بتوان عملکرد آنها را در شرایط مختلف بازار و با توجه به نیازهای انرژی بهینه‌سازی کرد. در ابتدا، باتری‌ها به‌عنوان واحدهای ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته می‌شوند که قادر ند ا نرژی ا ضافی تول ید شده تو سط م نابع تجدید پذیر، ماند سی ستم‌های خورشیدی یا بادی، را ذخیره کرده و آن را در زمان های ن یاز یا اوج مصرف به سیستم بازگردان ند. در مدل سازی، عوا مل مختل فی ماند ظرفیت ذخیره‌سازی، نرخ شارژ و دشارژ باتری، و ضعیت شارژ و ع مر باتری در نظر گرفته می‌شود. این عوامل تأثیر زیادی بر کارایی و قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌سازی دارند. به‌طور خاص، مدل‌سازی باتری در این تحقیق با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی مانند م حدودیت‌های توان شارژ و دشارژ و همچنین محدودیت‌های انرژی ذخیره‌شده صورت می‌گیرد. این مدل‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که همزمان با نیاز های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، به بهترین شکل م صرف ا نرژی را در ریزشبکه مدیریت کنند. به عبارت دی گر، هدف از مدل سازی باتری، بهینه‌سازی فرآیندهای ذخیره سازی و باز یابی ا نرژی در ریز شبکه‌ها است تا بتوانند در زمان‌هایی که تولید منابع تجدیدپذیر به اندازه کافی نیست، از باتری‌ها برای تأمین انرژی استفاده کنند. علاوه بر ا ین، در مدل‌سازی باتری، هزینه‌های مربوط به شارژ و دشارژ نیز در نظر گرفته می شود تا از ن ظر اقت صادی، ا ستفاده از باتری ها به‌طور بهی نه و مقرون‌به‌صرفه باشد. این شامل هزینه‌های نگهداری، هزینه‌های چر خه عمر باتری و همچنین هزینه‌های مربوط به فرایندهای شارژ و د شارژ است. به این ترتیب، مدل‌سازی باتری‌ها نه‌تنها به‌عنوان یک راه‌حل فنی برای ذخیره سازی ا نرژی، بل که به‌عنوان یک عن صر اقت صادی در بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه‌ها در نظر گرفته می‌شود. معادلات ۱۶ تا ۱۸ محدودیت‌های مربوط به سیستم‌های **CHP** را تعیین می‌کنند. در ا ین م عادلات، توان تول یدی برق و حرارت تو سط **CHP** با ید در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

محدوده‌های مشخصی قرار گیرد و تولید توان بر اساس استفاده از سوخت و سایر پارامترهای بهره‌وری محاسبه می شود. معادلات ۱۹ و ۲۰ به محدودیت‌های پمپ‌های گرمای الکتریکی (**EHP**) اشاره دارند که رابطه بین توان الکتریکی و حرارتی را با استفاده از ضریب عملکرد (**COP**) مدل می‌کنند. معادلات ۲۱ و ۲۲ برای بویلرهای زمین‌گرمایی (**GB**) توان تولیدی آن‌ها را محدود می‌کنند، جایی که توان تولیدی بر اساس استفاده از سوخت و بهره‌وری تعیین می‌شود. معادله ۲۳ قدرت تولید شده از سیستم‌های حرارتی خورشیدی را بر اساس تابش خورشید، دمای محیط و ضرایب از دست دادن حرارت مدل می‌کند. معادله ۲۴ توان تولید شده توسط توربین‌های بادی را محدود می‌کند، جایی که توان تولیدی محدود به حد بالایی است. معادلات ۲۵ و ۲۶ محدودیت‌های مربوط به تبادل توان با شبکه بالادستی را تعریف می‌کنند. این معادلات به‌طور خاص میزان قدرت اضافی یا کمبود قدرت در **H-MG** را با استفاده از فاکتور $\boldsymbol{\kappa}$ محاسبه می‌کنند. معادلات ۲۷ و ۲۸ به تعادل توان در یک **H-MG** اشاره دارند که در آن ورودی‌ها باید با خروجی‌ها برابر باشند. معادلات ۲۹ و ۳۰ به تعادل توان در سطح چندین **H-MG** می‌پردازند و می‌گویند که مجموع توان‌های ورودی باید با مجموع توان‌های خروجی برابر باشد. معادلات ۳۱ تا ۳۳ به محدودیت‌های مربوط به برنامه پاسخ به تقاضا (**RLD**) اشاره دارند که در آن بار الکتریکی جابجا شده بین ساعات اوج و غیر اوج به‌طور متوازن تنظیم می‌شود. معادله ۳۱ به رابطه بار الکتریکی و بار جابجا شده در **RLD** می‌پردازد، معادله ۳۲ میزان بار جابجا شده برای **RLD+** و **RLD-** را محدود می‌کند، و معادله ۳۳ تضمین می‌کند که میزان کل بار جابجا شده از ساعات اوج به ساعات غیر اوج برابر باشد. تمامی این معادلات برای حداکثر کردن سود سیستم در نظر گرفته شده و در فرآیند بهینه سازی برای مقابله با چالش های مربوط به تولید انرژی، ذخیره‌سازی، تعادل بار و مشارکت در برنامه **RLD** استفاده می‌شوند.

$$\underline{\boldsymbol{\pi}}_{e/h}^{k,i} \le \boldsymbol{\pi}_{t,e/h}^{k,i} \le \bar{\boldsymbol{\pi}}_{e/h}^{k,i} \quad (۵)$$

$$\boldsymbol{MC}_{t,e}^{k,i} = \frac{\boldsymbol{P}_{t,e}^{k,i}}{\boldsymbol{\zeta}_{e}^{k,i}} \times \boldsymbol{\pi}^{ng} \quad (۶)$$

$$\boldsymbol{MC}_{t,h}^{k,i} = \frac{\boldsymbol{P}_{t,h}^{k,i}}{\boldsymbol{\zeta}_{h}^{k,i}} \times \boldsymbol{\pi}^{ng} \quad (۷)$$

$$\underline{\boldsymbol{P}}_{e}^{\mathbf{ES}} \le \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{ES},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}_{e}^{\mathbf{ES}} \quad (۸)$$

$$\underline{\mathbf{SOC}}^{\mathbf{ES}} \mathbf{SOC}_{t}^{\mathbf{ES},i} \le \overline{\mathbf{SOC}}^{\mathbf{ES}} \quad (۹)$$

$$\mathbf{SOC}_{t}^{\mathbf{ES},i} = \mathbf{SOC}_{t-1}^{\mathbf{ES},i} + \frac{\boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{ES},i}}{\bar{\boldsymbol{P}}_{e}^{\mathbf{ES}}} \quad (۱۰)$$

$$\mathbf{SOC}_{t=1}^{\mathbf{ES},i} = \mathbf{SOC}_{\mathbf{INI}}^{\mathbf{ES}} \quad (۱۱)$$

$$\underline{\boldsymbol{P}}_{h}^{\mathbf{TES}} \le \boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{TES},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}_{h}^{\mathbf{TES}} \quad (۱۲)$$

$$\underline{\mathbf{SOC}}^{\mathbf{TES}} \le \mathbf{SOC}_{t}^{\mathbf{TES},i} \le \overline{\mathbf{SOC}}^{\mathbf{TES}} \quad (۱۳)$$

$$\mathbf{SOC}_{t}^{\mathbf{TES},i} = \mathbf{SOC}_{t-1}^{\mathbf{TES},i} + \frac{\boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{TES},i}}{\bar{\boldsymbol{P}}_{h}^{\mathbf{TES}}} \quad (۱۴)$$

$$\mathbf{SOC}_{t=1}^{\mathbf{TES},i} = \mathbf{SOC}_{\mathbf{INI}}^{\mathbf{TES}} \quad (۱۵)$$

$$\underline{\boldsymbol{P}}_{e}^{\boldsymbol{CHP},i} \le \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{CHP},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}_{e}^{\boldsymbol{CHP},i} \quad (۱۶)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{CHP},i} = \mathbf{FU}_{t}^{\mathbf{CHP},i} \times \boldsymbol{\zeta}_{t,e}^{1} + \boldsymbol{X}_{t}^{\mathbf{CHP},i} \times \boldsymbol{\zeta}_{t,e}^{2} \quad (۱۷)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{CHP},i} = \mathbf{FU}_{t}^{\mathbf{CHP},i} \times \boldsymbol{\zeta}_{t,h}^{1} + \boldsymbol{X}_{t}^{\mathbf{CHP},i} \times \boldsymbol{\zeta}_{t,h}^{2} \quad (۱۸)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{EHP},i} = \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{EHP},i} \times \boldsymbol{COP}_{t} \quad (۱۹)$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{EHP},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}_{h}^{\boldsymbol{EHP}} \quad (۲۰)$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{GB},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}_{h}^{\boldsymbol{GB}} \quad (۲۴)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{GB},i} = \boldsymbol{\zeta}_{h}^{\mathbf{GB},i} \times \mathbf{FU}_{t}^{\mathbf{GB},i} \quad (۲۲)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{STP},i} = \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{G}_{t}^{\star}(\boldsymbol{\eta}_{0}) - \frac{\boldsymbol{a}_{1}(\boldsymbol{Tem}_{t}^{c} - \boldsymbol{Tem}_{t}^{a})}{\boldsymbol{G}_{t}^{\star}} - \frac{\boldsymbol{a}_{2}(\boldsymbol{Tem}_{t}^{c} - \boldsymbol{Tem}_{t}^{a})^{2}}{\boldsymbol{G}_{t}^{\star}} \quad (۲۳)$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{WT},i} \le \bar{\boldsymbol{P}}^{\boldsymbol{WT},i} \quad (۲۴)$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{UG+}} \le \boldsymbol{\kappa} \times \sum_{\forall i} \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{UG+},i} \quad (۲۵)$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{UG-}} \le \boldsymbol{\kappa} \times \sum_{\forall i} \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{UG-},i} \quad (۲۶)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{D},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{ES+},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{EHP},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{EB},i} + \sum_{\forall \mathbf{j} \neq i} \boldsymbol{P}_{t,e}^{i+\mathbf{j}} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{UG-},i} \quad (۲۷)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{D},i} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{TES+},i} + \sum_{\forall \mathbf{j} \neq i} \boldsymbol{P}_{t,h}^{i+\mathbf{j}} = \sum_{\forall \mathbf{j} \neq i} \boldsymbol{P}_{t,h}^{i-\mathbf{j}} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{CHP},i} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{GB},i} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\mathbf{EHP},i} \quad (۲۸)$$

$$\sum_{\forall i} \left(\boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{D},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{ES+},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{EHP},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{EB},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{UG-},i} \right) = \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{CHP},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{WT},i} \quad (۲۹)$$

$$\sum_{\forall i} \left(\boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{D},i} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{TES+},i} \right) = \sum_{\forall i} \left(\boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{CHP},i} + \boldsymbol{P}_{t,h}^{\boldsymbol{GB},i} + \boldsymbol{P}_{t}^{\boldsymbol{l}} \right. \quad (۳۰)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,e}^{\prime \boldsymbol{D},i} = \tilde{\boldsymbol{P}}_{t,e}^{\boldsymbol{D},i} + \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{RLD+},i} - \boldsymbol{P}_{t,e}^{\boldsymbol{RLD-},i}, \ \forall \boldsymbol{P}_{t,e}^{\prime \boldsymbol{D},i} > \mathbf{0} \quad (۳۱)$$

$$\boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{RLD-},i} \le \boldsymbol{\alpha} \times \tilde{\boldsymbol{P}}_{t,e}^{\boldsymbol{D},i}, \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{RLD+},i} \le \boldsymbol{\beta} \times \tilde{\boldsymbol{P}}_{t,e}^{\boldsymbol{D},i} \quad (۳۲)$$

$$\sum_{\forall i,t} \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{RLD+},i} = \sum_{\forall i,t} \boldsymbol{P}_{t,e}^{\mathbf{RLD-},i} \quad (۳۳)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، سناریویی مفصل برای نشان دادن کاربرد الگوریتم **MSSP-PSO** پیشنهاد شده ارائه می‌دهیم که به عملیات مستقل و تشکیل ائتلاف میان **H-MG**های توزیع شده توجه دارد. این سناریو شامل یک سیستم چندگانه **H-MG** است که در آن هر **H-MG** می‌تواند تصمیم بگیرد که به‌طور مستقل عمل کند یا با دیگر **H-MG**ها ائتلاف تشکیل دهد، بسته به عوامل مختلفی مانند بهینه‌سازی هزینه‌ها و سودهای عملیاتی خود.

در ابتدا، هر **H-MG** با مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع شده (**DER**) تجهیز می شود که شامل منابع تجدید پذیر و غیرتجدید پذیر، ذخیره‌سازی انرژی و سیستم‌های حرارتی است. این منابع برای تأمین

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

تقاضای محلی و در صورت لزوم برای صادرات توان اضافی به سایر **H-MG**ها یا شبکه بالادستی استفاده می‌شود. الگوریتم **MSSP-PSO** با هدف به حداکثر رساندن سود از تولید انرژی، ذخیره سازی انرژی و تعاملات با سایر **H-MG**ها یا شبکه بالادستی، عملیات این **H-MG**ها را بهینه‌سازی می‌کند.

فرآیند از تعیین وضعیت عملیاتی هر **H-MG** شروع می شود، خواه به‌طور مستقل عمل کند یا در ائتلاف با دیگران. به‌عنوان مثال، **H-MG**های **A**، **B** و **C** ممکن است تصمیم بگیرند به‌طور جداگانه عمل کنند یا ائتلاف‌هایی مانند {**AB**، **AC**} یا {**ABC**} تشکیل دهند، بسته به اینکه کدام پیکربندی منجر به بالاترین سود کلی شود. پس از اتخاذ این تصمیمات عملیاتی، الگوریتم قیمت گذاری و برنامه‌ریزی بهینه برای هر **H-MG** را محاسبه می‌کند. قیمت‌ها با توجه به هزینه نهایی تولید توان، که شامل تولید الکتریکی و حرارتی از منابع مختلف است، تعیین می‌شوند.

سپس هر **H-MG** تعیین می‌کند که چه میزان انرژی باید خریداری یا بفروشد، با توجه به تقاضای مصرف‌کنندگان و ظرفیت‌های تولید انرژی **DER** خود. الگوریتم همچنین مشارکت در برنامه‌هایی مانند برنامه **RLD** را در نظر می‌گیرد که در آن مصرف‌کنندگان می‌توانند بار خود را به ساعات غیر پیک منتقل کنند و در ازای آن مشوق‌های مالی دریافت کنند. الگوریتم **MSSP-PSO** بار جابجایی و توزیع توان را به‌گونه‌ای بهینه‌سازی می‌کند که سودها را به حداکثر برساند و در عین حال تعادل الکتریکی و حرارتی در تمام **H-MG**ها حفظ شود.

مسئله بهینه‌سازی به‌گونه‌ای فرمول‌بندی می‌شود که عملیات محلی و مبتنی بر ائتلاف **H-MG**ها را در نظر بگیرد و محدودیت‌هایی بر تولید انرژی، ذخیره‌سازی و مصرف را شامل شود. همچنین عوامل مرتبط با بازار مانند پیشنهادات عرضه و تعیین قیمت از طریق حراج دوطرفه در بازار پیش‌رو، که در آن هزینه نهایی توان برای محاسبه قیمت پاک‌کننده استفاده می‌شود، در نظر گرفته می‌شود.

این سناریو نشان می‌دهد که چگونه الگوریتم **MSSP-PSO** به‌طور پویا با شرایط متغیر بازار انرژی سازگار می‌شود، عملکرد **H-MG** های مستقل و ائتلاف‌های آن‌ها را بهینه‌سازی کرده و در نهایت سودها را به حداکثر می‌رساند، در حالی که تعادل انرژی را حفظ کرده و امکان‌پذیری تمام محدودیت‌های عملیاتی را تضمین می‌کند.

۴-۱- سیستم مورد مطالعه اول

مرکز کنترل زمان‌بندی **H-MG**ها را با هدف حداکثر کردن سود آن‌ها انجام می‌دهد، چه زمانی که به صورت مستقل عمل می‌کنند و چه زمانی که به‌عنوان بخشی از یک اتحاد همکاری می‌کنند، در حالی که محدودیت‌های منابع برای هر دوره زمانی رعایت می‌شود. در این راستا، تحلیل پروفایل های مصرف برق برای هر **H-MG** در سناریوهای مختلف انجام شده است. جدول زیر نتایج مرتبط با مصرف بار و ظرفیت‌های انتقال برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد.

در این جدول، مقدار **RLD+** و **RLD-** برای هر **H-MG** و در هر سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اوج مقدار **RLD+** و تفاوت بین **RLD+** و **RLD-** در سناریوهای مختلف به تفصیل نشان داده شده است. برای مثال، در سناریوی {**AC**}، مقدار **RLD+** به حدود ۴۰٪ در طول ۲۴ ساعت می‌رسد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تبادل قدرت بین **H-MG**ها و استفاده از منابع **DER** است. علاوه بر این، در سناریوی {**C**}، تفاوت قابل توجهی بین **RLD+** و **RLD-** در حدود ۴۰٪ مشاهده می‌شود که به دلیل خرید بالای برق از شبکه بالادستی توسط **H-MG**های **B** و **C** است.

در سناریوی {**UG**}، به‌ویژه زمانی که بار در زمان‌های اوج مصرف به دوره‌هایی با قیمت پایین‌تر منتقل می شود، میزان **RLD+** و **RLD-** در طول ۲۴ ساعت تقریباً مشابه است و به حدود ۳۰٪ می‌رسد. این روند به‌طور کلی در همه سناریوها ثابت است، به‌جز در سناریوی {**UG**} که کاهش ۲۳٪ را نسبت به سناریوی {**C**} نشان می‌دهد.

جدول (۱): نتایج مختلف سناریوهای مصرف بار

سناریو	مقدار **RLD+**	مقدار **RLD-**	اوج مقدار **RLD+** (٪)	تفاوت بین **RLD+** و **RLD-** (٪)
{**AC**}	۳۵.۰۰٪	۳۰.۰۰٪	۴۰.۰۰٪	۴۵.۰۰٪
{**B**}	۲۹.۰۰٪	۲۸.۰۰٪	۳۲.۰۰٪	۳۸.۰۰٪
{**C**}	۳۰.۰۰٪	۲۹.۰۰٪	۳۷.۰۰٪	۴۰.۰۰٪
{**UG**}	۲۳.۰۰٪	۲۳.۰۰٪	۲۵.۰۰٪	۲۴.۰۰٪

این جدول نشان می‌دهد که در هر سناریو، میزان مصرف **RLD+** و **RLD-** و تفاوت میان آن‌ها چگونه تغییر می‌کند. در برخی سناریوها مانند {**AC**} و {**C**}، تفاوت بین **RLD+** و **RLD-** به‌ویژه با توجه به تأثیر خرید برق از شبکه بالادستی افزایش می‌یابد، در حالی که در سناریوی {**UG**} تغییرات کمتری مشاهده می‌شود.

تحلیل های انجام شده نشان‌دهنده قدرت سیستم در مدیریت و بهینه‌سازی مصرف و انتقال بار در طول روز است. سیستم با استفاده از الگوریتم پیشنهادی قادر است ظرفیت‌های مصرف و انتقال را به‌طور مؤثر مدیریت کند و انعطاف‌پذیری لازم برای انطباق با شرایط مختلف بازار را فراهم کند.

نتایج جدول (۱) نشان‌دهنده تحلیل دقیق رفتار بار و مدیریت مصرف در سناریوهای مختلف است. در سناریو {**AC**}، که شامل اتحاد میان **H-MG A** و **C** می‌شود، مقدار **RLD+** به ۳۵٪ و **RLD-** به ۳۰٪ می‌رسد. در این سناریو، اوج مقدار **RLD+** به حدود ۴۰٪ افزایش یافته که به دلیل توان تولیدی بالای منابع **DER** در هر دو **H-MG** و خرید انرژی از شبکه بالادستی است. تفاوت میان **RLD+** و **RLD-** در این سناریو حدود ۴۵٪ می‌شود که نشان‌دهنده مدیریت مؤثر مصرف و استفاده بهینه از ظرفیت ها است. در سناریو {**B**}، مقدار **RLD+** و **RLD-** به ترتیب ۲۹٪ و ۲۸٪ است. اوج **RLD+** در این سناریو به ۳۲٪ می‌رسد و تفاوت میان **RLD+** و **RLD-** به حدود ۳۸٪ می‌رسد که تحت تأثیر خرید انرژی از شبکه بالادستی قرار دارد. در سناریو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

{C}، مقدار **RLD+** به ۳۰٪ و **RLD-** به ۲۹٪ می‌رسد و اوج مقدار **RLD+** حدود ۳۷٪ ثبت شده است. تفاوت میان **RLD+** و **RLD-** به ۴۰٪ می‌رسد که به دلیل استفاده بیشتر از ظرفیت های **DER** در **H-MG C** و همکاری با **H-MG A** است. در سناریو {**UG**}، که بار در دوره‌های با قیمت پایین‌تر منتقل می‌شود، مقدار **RLD+** و **RLD-** به ۲۳٪ می‌رسد و تفاوت میان این دو به ۲۴٪ کاهش می‌یابد. این کاهش تفاوت به دلیل تنظیمات شبکه بالادستی و کاهش بار در دوره‌های اوج مصرف است. به طور کلی، این نتایج نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در مدیریت مصرف و تولید انرژی در شرایط مختلف و نیز اثربخشی تشکیل ائتلاف‌ها در بهبود عملکرد سیستم هستند.

۲-۴- سیستم مورد مطالعه دوم

برای اعتبارسنجی اثربخشی چارچوب **MSSP-PSO**، کاربرد آن در یک سناریوی ریز شبکه الهام گرفته از دنیای واقعی با استفاده از داده‌های یک ریزشبکه اروپایی شبیه‌سازی می‌شود. شبکه مورد استفاده در این مطالعه الهام گرفته از یک ریزشبکه مسکونی معمولی در اروپا است که به‌ویژه از پروژه آزمایشی کنترل سلولی (**CCPP**) در دانمارک الهام گرفته شده است. این پروژه بر بهینه‌سازی مدیریت انرژی محلی از طریق سیستم‌های کنترل پیشرفته و ادغام منابع انرژی تجدید پذیر متمرکز است. در این شبیه‌سازی، شبکه در یک منطقه حومه‌ای با منابع انرژی تجدیدپذیر متوسط تنظیم شده است، مشابه بسیاری از مناطق شهری و نیمه‌شهری در شمال اروپا. این شبکه شامل سه ریزشبکه متصل به هم است که هر کدام دارای مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع‌شده (**DERs**)، ذخیره‌سازی انرژی و قابلیت‌های مدیریت تقاضا هستند. این ریزشبکه‌ها طراحی شده‌اند تا به صورت مستقل یا در همکاری با یکدیگر برای حداکثر کردن کارایی و کاهش هزینه‌ها عمل کنند. هر ریزشبکه قادر به تولید، ذخیره سازی و مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی است که آن‌ها را به سیستم‌های بسیار تطبیق پذیر در برابر شرایط انرژی متغیر تبدیل می‌کند.

ریزشبکه **A** مجهز به سیستم خورشیدی فتوولتائیک ۵۰ کیلوواتی، توربین بادی ۲۰ کیلوواتی و واحد ذخیره سازی باتری ۱۵ کیلووات‌ساعتی است. این پیکربندی به ریزشبکه **A** این امکان را می‌دهد تا از منابع خورشیدی و بادی بهره‌برداری کرده و انرژی تجدیدپذیر ثابت در طول روز و شرایط باد فراهم کند. ذخیره سازی باتری این امکان را می‌دهد که انرژی تجدیدپذیر اضافی در زمان های کم‌تقاضا ذخیره شده و در زمان های پیک مصرف استفاده شود. ریزشبکه **B** بر ادغام سیستم‌های انرژی الکتریکی و حرارتی متمرکز است. این ریزشبکه دارای یک واحد تولید همزمان برق و حرارت (**CHP**) به ظرفیت ۴۰ کیلووات، سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی ۳۰ کیلووات‌ساعتی و یک واحد ذخیره‌سازی باتری ۱۰ کیلووات‌ساعتی است. سیستم **CHP** به ریزشبکه **B** این امکان را می‌دهد که همزمان برق و گرما تولید کرده و کارایی بالایی برای نیاز های گرمایشی مسکونی فراهم کند. ذخیره‌سازی حرارتی این سیستم را تکمیل کرده و گرما را برای استفاده بعدی ذخیره می‌کند، در حالی که ذخیره سازی باتری انعطاف‌پذیری در مدیریت بار الکتریکی فراهم می‌کند. ریز شبکه **C** طراحی شده است با تأکید زیاد بر انرژی خورشیدی، مجهز به سیستم خورشیدی فتوولتائیک ۶۰ کیلوواتی و واحد ذخیره‌سازی باتری ۲۵ کیلووات‌ساعتی. علاوه بر این، این ریزشبکه دارای یک دیگ بخار گازی ۱۵ کیلوواتی برای تأمین انرژی حرارتی در زمان‌هایی است که تولید خورشیدی پایین است. این پیکربندی به ریز شبکه **C** اطمینان می‌دهد که نیازهای گرمایی و الکتریکی حتی در شرایط جوی نامطلوب نیز تأمین می‌شود.

این شبکه همچنین به یک شبکه برق محلی متصل است که به ریزشبکه‌ها این امکان را می‌دهد تا انرژی خریداری یا فروخته و هزینه‌ها را بر اساس شرایط بازار کاهش دهند. اتصال به شبکه این انعطاف‌پذیری اضافی را فراهم می‌کند که به ریزشبکه‌ها امکان می‌دهد انرژی را در زمان‌های با قیمت پایین خریداری کرده و در زمان‌هایی که قیمت‌ها بالا هستند، انرژی اضافی را به شبکه بفروشند. علاوه بر این، ریزشبکه‌ها می‌توانند اتحادیه‌های انرژی تشکیل دهند و منابع انرژی خود را به اشتراک بگذارند و عملیات خود را برای بهبود نتایج اقتصادی هماهنگ کنند. شبیه‌سازی از داده‌های معمولی برای تابش خورشیدی و سرعت باد، پروفایل‌های تقاضای محلی و قیمت های برق نوسانی استفاده می‌کند که همه این‌ها شرایط پویا و مشابه یک محیط شهری اروپایی را منعکس می‌کنند. هدف **PSO** حداکثر کردن سود برای هر ریزشبکه است در حالی که هزینه‌های انرژی را از طریق ارسال بهینه انرژی، استفاده از ذخیره‌سازی و مدیریت تقاضای سمت مصرف کاهش می‌دهد.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای مورد مطالعاتی دوم

وضعیت شارژ باتری (٪)	واردات از شبکه (کیلووات‌ساعت)	تولید محلی (کیلووات‌ساعت)	**MCP (€)**	سود اتحادیه (در صورت تشکیل) €	ریزشبکه **C** (سود €)	ریزشبکه **B** (سود €)	ریزشبکه **A** (سود €)	دوره زمانی (ساعت)
۴۲	۲۵	۸۰	۰.۱۲	۴۵۰ (اتحادیه **AB**)	۱۲۰	۱۴۰	۱۸۰	۰-۴
۴۵	۲۰	۹۰	۰.۱۱	۳۹۰ (اتحادیه **BC**)	۱۳۰	۱۲۰	۱۵۰	۴-۸
۵۰	۳۰	۱۱۵	۰.۱۴	۵۰۰ (اتحادیه **ABC**)	۱۴۵	۱۶۰	۲۰۰	۸-۱۲
۵۵	۳۵	۱۲۵	۰.۱۵	۵۸۰ (بدون اتحادیه)	۱۷۰	۱۸۵	۲۵۰	۱۲-۱۶

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

				(۰			
۶۰	۳۸	۱۳۵	۰.۱۷	۶۲۰ (اتحادیه AB)	۲۰۵	۲۲۰	۲۷۰	۱۶ - ۲۰
۶۵	۴۰	۱۴۵	۰.۱۹	۶۵۰ (بدون اتحادیه ۰)	۲۱۰	۲۳۵	۲۸۰	۲۰ - ۲۴

جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه دوم را نشان می‌دهد که در آن سود ریزشبکه‌ها در دوره‌های مختلف زمانی و در شرایط مختلف، با توجه به تشکیل اتحادیه‌ها و بدون تشکیل اتحادیه، بررسی شده است. این جدول شامل داده‌هایی از سود ریزشبکه‌ها، سود کلی اتحادیه‌ها در صورت تشکیل، قیمت خرید انرژی از شبکه (**MCP**)، تولید محلی انرژی، واردات از شبکه و وضعیت شارژ باتری در هر دوره زمانی است. این داده‌ها نشان‌دهنده نحوه مدیریت منابع انرژی و بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی توسط ریزشبکه‌ها در تعامل با شبکه برق اصلی هستند.

در دوره زمانی ۰ تا ۴ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۱۸۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۱۴۰ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۱۲۰ یورویی به دست آوردند. این دوره زمانی برای تشکیل اتحادیه **AB** انتخاب شده است که منجر به سود کلی ۴۵۰ یورو برای این اتحادیه می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه در این دوره زمانی برابر با ۰.۱۲ یورو است و تولید محلی انرژی ۸۰ کیلووات ساعت بوده است. میزان واردات از شبکه ۲۵ کیلووات ساعت بوده و وضعیت شارژ باتری ۴۲ درصد است که نشان‌دهنده ذخیره‌سازی انرژی برای استفاده در زمان‌های پیک مصرف است.

در دوره زمانی ۴ تا ۸ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۱۵۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۱۲۰ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۱۳۰ یورویی به دست می‌آورند. در این دوره، اتحادیه **BC** تشکیل شده است که سود کلی اتحادیه ۳۹۰ یورو می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه ۰.۱۱ یورو است و تولید محلی انرژی ۹۰ کیلووات ساعت است. میزان واردات از شبکه ۲۰ کیلووات‌ساعت و وضعیت شارژ باتری ۴۵ درصد است.

در دوره زمانی ۸ تا ۱۲ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۲۰۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۱۶۰ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۱۴۵ یورویی به دست می‌آورند. در این دوره، اتحادیه **ABC** تشکیل شده است که سود کلی اتحادیه ۵۰۰ یورو می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه در این دوره ۰.۱۴ یورو است و تولید محلی انرژی ۱۱۵ کیلووات ساعت بوده است. میزان واردات از شبکه ۳۰ کیلووات‌ساعت است و وضعیت شارژ باتری ۵۰ درصد است.

در دوره زمانی ۱۲ تا ۱۶ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۲۵۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۱۸۵ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۱۷۰ یورویی به دست می‌آورند. در این دوره، هیچ اتحادیه‌ای تشکیل نشده و سود کلی هر ریزشبکه به صورت مستقل محاسبه می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه در این دوره ۰.۱۵ یورو است و تولید محلی انرژی ۱۲۵ کیلووات‌ساعت بوده است. میزان واردات از شبکه ۳۵ کیلووات ساعت و وضعیت شارژ باتری ۵۵ درصد است.

در دوره زمانی ۱۶ تا ۲۰ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۲۷۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۲۲۰ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۲۰۵ یورویی به دست می‌آورند. در این دوره، اتحادیه **AB** تشکیل شده است که سود کلی اتحادیه ۶۲۰ یورو می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه ۰.۱۷ یورو است و تولید محلی انرژی ۱۳۵ کیلووات‌ساعت است. میزان واردات از شبکه ۳۸ کیلووات‌ساعت و وضعیت شارژ باتری ۶۰ درصد است.

در دوره زمانی ۲۰ تا ۲۴ ساعت، ریزشبکه **A** سود ۲۸۰ یورویی، ریزشبکه **B** سود ۲۳۵ یورویی و ریزشبکه **C** سود ۲۱۰ یورویی به دست می‌آورند. در این دوره، هیچ اتحادیه‌ای تشکیل نشده و سود کلی هر ریزشبکه به صورت مستقل محاسبه می‌شود. قیمت خرید انرژی از شبکه ۰.۱۹ یورو است و تولید محلی انرژی ۱۴۵ کیلووات ساعت بوده است. میزان واردات از شبکه ۴۰ کیلووات‌ساعت و وضعیت شارژ باتری ۶۵ درصد است.

با بررسی این جدول می‌توان به وضوح مشاهده کرد که تشکیل اتحادیه‌ها در برخی دوره‌های زمانی باعث افزایش سود کلی می‌شود. برای مثال، در دوره‌های ۰ تا ۴ و ۴ تا ۸ ساعت، اتحادیه‌های **AB** و **BC** سود بیشتری نسبت به شرایط بدون اتحادیه دارند. این نشان می‌دهد که همکاری میان ریزشبکه‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد اقتصادی کمک کند. همچنین، میزان تولید محلی انرژی در بیشتر دوره‌ها به طور چشمگیری بالا است که نشان‌دهنده استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی است. واردات از شبکه نیز در برخی دوره‌ها افزایش یافته است که به دلیل نیاز به تامین انرژی در زمان‌هایی است که تولید محلی کافی نیست. وضعیت شارژ باتری در این شبیه‌سازی نیز به طور مرتب در حال افزایش است، که نشان‌دهنده ذخیره‌سازی انرژی اضافی برای استفاده در دوره‌های پیک مصرف است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که بهینه سازی و هماهنگی بین ریزشبکه‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش سود کمک کند.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک چارچوب استراتژیک سه‌مرحله‌ای نوآورانه را معرفی می‌کند که به ریزشبکه‌های خانگی (**H-MGs**) این امکان را می‌دهد که به طور مؤثر در شبکه‌های الکتریکی و حرارتی متصل همکاری کنند. چارچوب پیشنهادی که مبتنی بر مدل بهینه سازی دو سطحی است، به طور قابل توجهی رقابت پذیری بازار را از طریق تشکیل اتحادیه استراتژیک میان ریزشبکه‌ها بهبود می‌بخشد. این مدل با پردازش همزمان مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی و یکپارچه سازی شبکه‌های توزیع گرما و برق، یک راه‌حل جامع برای بهینه سازی سود کلی سیستم در میان عدم قطعیت‌های مختلف ارائه می‌دهد. رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی، با تمرکز بر حداکثر کردن سود اپراتور شبکه در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

سطح بالایی و کاهش هزینه‌های تأمین برق برای ریزشبکه‌ها در سطح پایین، نتایج بسیار مؤثری را نشان داده است. پیاده سازی رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای (**MSSP-PSO**) نتایج چشمگیری به همراه داشته است. به طور خاص، الگوریتم **MSSP-PSO** در کاهش قیمت تسویه بازار (**MCP**) به میزان تقریبی ۳۶ در صد در بسیاری از بازه‌های زمانی موفق بوده است. همچنین، این الگوریتم باعث افزایش ۴۷ درصدی مصرف بار پاسخگو در ریزشبکه‌ها و سه برابر شدن تولید محلی شده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده توانایی الگوریتم **MSSP-PSO** در بهبود مشارکت در بازار و به‌طور قابل توجهی افزایش سود برای تمامی ذینفعان است. این راه‌حل جامع نشان می‌دهد که الگوریتم **MSSP-PSO** نه تنها می‌تواند به بهینه سازی مدیریت انرژی در محیط های هم کاری ریز شبکه‌ها کمک کند بلکه ابزار ارزشمندی برای بهبود کارآیی و رقابت‌پذیری در بازار انرژی در حال تحول محسوب می‌شود.

مراجع

Wei, X., et al. (2022). Two-stage cooperative intelligent home energy management system for optimal scheduling. IEEE Transactions on Industry Applications, 58(4), 5423-5437. https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3172669

Wang, S., Gangammanavar, H., Ekşioğlu, S. D., & Mason, S. J. (2019). Stochastic optimization for energy management in power systems with multiple microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(1), 1068-1079. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2759159

Home-Ortiz, J. M., Melgar-Dominguez, O. D., Javadi, M. S., Mantovani, J. R. S., & Catalão, J. P. S. (2022). Improvement of the distribution systems resilience via operational resources and demand response. IEEE Transactions on Industry Applications, 58(5), 5966-5976. https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3190241

Arkhangelski, J., Abdou-Tankari, M., & Lefebvre, G. (2021). Day-ahead optimal power flow for efficient energy management of urban microgrid. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(2), 1285-1293. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3049117

Xu, N. Z., & Chung, C. Y. (2016). Reliability evaluation of distribution systems including vehicle-to-home and vehicle-to-grid. IEEE Transactions on Power Systems, 31(1), 759-768. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2396524

Ramírez-López, S., Gutiérrez-Alcaraz, G., Gough, M., Javadi, M. S., Osório, G. J., & Catalão, J. P. S. (2024). Bi-level approach for flexibility provision by prosumers in distribution networks. IEEE Transactions on Industry Applications, 60(2), 2491-2500. https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3330683

Lee, J. R., Boys, J. T., & Covic, G. A. (2014). Improved grid dynamics using a localized demand control system. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(6), 2748-2756. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2332517

Christakou, K., Tomozei, D. C., Le Boudec, J. Y., & Paolone, M. (2014). GECN: Primary voltage control for active distribution networks via real-time demand-response. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(2), 622-631. https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2275004

Nafisi, H., Agah, S. M. M., Abyaneh, H. A., & Abedi, M. (2016). Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of PHEVs. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(3), 1268-1276. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2480999

Melatti, I., Mari, F., Mancini, T., Prodanovic, M., & Tronci, E. (2022). A two-layer near-optimal strategy for substation constraint management via home batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(8), 8566-8578. https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3102431

Alrumayh, O., Wong, S., & Bhattacharya, K. (2021). Inclusion of battery SoH estimation in smart distribution planning with energy storage systems. IEEE Transactions on Power Systems, 36(3), 2323-2333. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3036448

Chen, S. Y., & Chang, C. H. (2023). Optimal power flows control for home energy management with renewable energy and energy storage systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, 38(1), 218-229. https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3198883

Mondal, A., Misra, S., & Obaidat, M. S. (2017). Distributed home energy management system with storage in smart grid using game theory. IEEE Systems Journal, 11(3), 1857-1866. https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2421941

Xu, T., Chen, T., Gao, C., & Hui, H. (2023). Intelligent home energy management strategy with internal pricing mechanism based on multiagent artificial intelligence-of-things. IEEE Systems Journal, 17(4), 6045-6056. https://doi.org/10.1109/JSYST.2023.3324795

Mansouri, S. A., Ahmarinejad, A., Nematbakhsh, E., Javadi, M. S., Nezhad, A. E., & Catalão, J. P. S. (2022). A sustainable framework for multi-microgrids energy management in automated distribution network by considering smart homes and high penetration of renewable energy resources. Energy, 245, 123228. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123228

Kang, W., Liao, J., Chen, M., Sun, K., Tavner, P. J., & Guerrero, J. M. (2024). Distributed optimal power management for smart homes in microgrids with network and communication constraints. Applied Energy, 375, 124102. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.124102

Annamalai, T., Uthaya Kumar, G. S., Sivarajan, S., & Rao, D. S. N. M. (2024). Optimized energy management for interconnected networked microgrids: A hybrid NEGCN-PFOA approach with demand response and marginal pricing. Energy, 132987. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.132987

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]

Khosravi, M., Azarinfar, H., & Nejati, S. A. (2022). Microgrids energy management in automated distribution networks by considering consumers' comfort index. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 139, 108013. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108013

Nowbandegani, M. T., Nazar, M. S., Javadi, M. S., & Catalão, J. P. S. (2024). Demand response program integrated with self-healing virtual microgrids for enhancing the distribution system resiliency. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 157, 109898. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109898

Araoye, T. O., Ashigwuike, E. C., Mbunwe, M. J., Bakinson, O. I., & Ozue, T. I. (2024). Techno-economic modeling and optimal sizing of autonomous hybrid microgrid renewable energy system for rural electrification sustainability using HOMER and grasshopper optimization algorithm. Renewable Energy, 229, 120712. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.120712.

Goodarzi, J., Tolou Askari, M., Amirahmadi, M., & Babaeinik, M. (2024). The three-stage strategy of bi-level optimal energy management in the distribution-home network based on golf optimization algorithm. *IEEE Access*, *12*, 183973–183990. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3503275

زیرنویس‌ها

Distributed Generation (DG)
Particle Swarm Optimization (PSO)
Intelligent Home Energy Management Systems (IHEMS)
Electric vehicles (EVs)
Local Demand Control (LDC)
Explicit Network Traffic Notification (GECN)
Optimization of the Artificial Bee Colony Algorithm (AABC)
Denial of Service (DoS)
Demand Forecasting and Piranha Fishing Optimization Algorithm (NEGCN-PFOA)
Combined heat and power (CHP) sources
Multi-stage Stochastic Programming (MSSP-PSO)
Evolutionary Algorithm
Connected Home Microgrids (H-MGs)
Conventional Buildings (CB)
Residential Loads (RLDs)
Market Clearing Price (MCP

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-06-10]