

پیاده‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی

نرگس پرهیزی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ موسی مرزبند^۱، استادیار؛ سیدمازیار میرحسینی مقدم^۱، استادیار؛ بهنام محمدی ایواتلو^۲، استادیار؛ فاطمه آذری نژادیان^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- گروه مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - لاهیجان - ایران -
narges_parhizi@yahoo.com, {m.marzband, m.mirhosseini}@liau.ac.ir, niloofar.azari@yahoo.com
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - bmoammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده: بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری در سیستم‌های قدرت، ذخیره‌سازی بهینه انرژی و تولید توان با اثرهای زیست‌محیطی کمتر، توسعه ریزشبکه‌ها را بیش‌ازپیش مورد توجه قرار داده است. در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی ارائه شده است که وظیفه برنامه‌ریزی بهینه واحدهای تولیدی موجود در ریزشبکه، مدیریت سمت تقاضا و تبادل توان با شبکه سراسری را بر عهده دارد. هدف اصلی سیستم مدیریت انرژی پیشنهادشده تأمین توان با کمترین هزینه است. از آنجاکه مدل در نظر گرفته‌شده برای ریزشبکه ماهیتی غیر خطی و گسسته دارد؛ لذا به‌منظور یافتن بهترین راه‌حل ممکن، از یک الگوریتم فرا ابتکاری بنام رقابت استعماری چندبعدی استفاده شده است. در مسئله مطرح‌شده، قیود فنی شامل تغذیه کامل بار، مشخصه‌های هر یک از منابع موجود در ریزشبکه، همچنین قیود اتصال به شبکه سراسری لحاظ شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادشده، چندین سناریو اعمال و نتایج شبیه‌سازی و عملی به‌دست‌آمده از آن با الگوریتم سیستم مدیریت انرژی بر پایه برنامه‌ریزی غیر خطی دودویی عدد صحیح (MS-MINLP)، بهینه‌سازی زنبورعسل چندزمانه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده کارایی الگوریتم پیشنهادشده برای تأمین تقاضای بار، کاهش هزینه کلی تولید (در حدود ۱۷٪، ۱۰٪ و ۲۲٪) و نیز کاهش قیمت برق مصرفی در طول بازه زمانی مورد مطالعه را نسبت به الگوریتم‌های EMS-MINLP، EMS-MABC و EMS-PSO نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت بهینه انرژی، ریزشبکه، شبکه سراسری، الگوریتم رقابت استعماری، مدیریت سمت تقاضا.

The Experimental Implementation of an Energy Management System for a Grid Connected Microgrid by using a Multi-period Imperialist Competition Algorithm

Narges Parhizi¹, MSc Student; Mousa Marzband¹, Assistant Professor; Seyyed Maziar Mirhosseini Moghaddam¹, Assistant Professor; Behnam Mohammadi Ivatloo², Assistant Professor; Fatemeh Azarinejadian¹, MSc Student

1- Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University of Lahijan Branch, Lahijan, Iran,
Emails: narges_parhizi@yahoo.com, {m.marzband, m.mirhosseini}@liau.ac.ir, niloofar.azari@yahoo.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmoammadi@tabrizu.ac.ir

Abstract: The improvement of flexibility, optimum using of power generation units with less environment affects are increased over and over noting the development of the Microgrid (MG) in power systems. An optimum energy management system (EMS) has special importance issues in order to generate power with the least possible production cost. The main duty of the proposed EMS can be attributed to the optimum management of the generation units, demand side management and power exchange with the national grid. Because the problem considered for the MG application has a nonlinear and discrete nature, so a heuristic algorithm called multi-period imperialist competition algorithm (MICA) is used to implement an optimum EMS. The fulfillment of the load requirement, the technical specifications related to each of the resources and the national grid constraints are included in the discussed problem. Furthermore, several scenarios are applied to evaluate the capability of the proposed algorithm then the obtained results are compared to those found with an EMS based on mixed integer non-linear programming (MINLP), multi-period artificial bee colony (MABC) (EMS-MABC) and particle swarm optimization (PSO) (EMS-PSO) approach. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed algorithm for complete supplying load demand, total production cost reduction (about 17%, 10% and 22% respectively) also the reduction of MCP relative to EMS-MINLP, EMS-MABC and EMS-PSO algorithms.

Keywords: Optimum energy management, Microgrid, Main Grid, Imperialist competition algorithm, Demand-side management.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۹ و ۱۳۹۳/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۵

نام نویسنده مسئول: بهنام محمدی ایواتلو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها دارای یک ساختار کنترلی با مدیریت مرکزی و یا توزیع‌شده در سطح ولتاژ توزیع می‌باشند [۱، ۲]. این سیستم‌ها، قابلیت عملکرد در هر دو حالت اتصال به شبکه و مستقل از شبکه را دارا می‌باشند [۲]. به‌منظور دستیابی به قابلیت‌های ریزشبکه‌ها از قبیل افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان، کاهش هزینه عرضه انرژی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، ارائه سیستم مدیریت انرژی (EMS) با در نظر گرفتن عملکرد بهینه هر یک از منابع تولید موجود در ریزشبکه و شبکه سراسری و با هدف مدیریت بهتر تقاضای بار تحت شرایط مختلف حائز اهمیت است. EMS همچنین می‌تواند استفاده بهینه از منابع تولید پراکنده را تحت شرایط بالا بودن کیفیت تولید و قابلیت اعتماد شبکه قدرت تضمین نماید. اما این سیستم‌ها زمانی که تقاضا از ماکزیمم ظرفیت در دسترس بیشتر باشد؛ برای تأمین تقاضا با شکست مواجه می‌شوند. تحت چنین شرایطی، به‌کارگیری سیستم‌های پشتیبان نظیر دیزل ژنراتورها، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی^۱ (ES) و یا به‌کارگیری مدیریت سمت تقاضا گزینه‌هایی هستند که به کاهش عدم تطابق عرضه و تقاضا کمک فراوانی می‌نمایند. با توجه به بالا بودن هزینه تجهیزات سیستم ذخیره‌سازی انرژی، ترکیب این سیستم و مدیریت سمت تقاضا مورد توجه قرار گرفته و متعاقباً این عمل قابلیت اعتماد بیشتری را برای سیستم به ارمغان خواهد آورد. یکی از اهداف برنامه مدیریت سمت تقاضا، حداقل نمودن عدم تطابق عرضه و تقاضا در طول اوج مصرف با اصلاح منحنی بار سیستم است [۲]. مدیریت واحدهای ریزشبکه نیازمند ارائه مدل اقتصادی دقیق جهت توصیف هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن توان خروجی منابع تولید است [۲]. از آنجاکه مدل ریزشبکه ماهیتی غیر خطی و گسسته دارد؛ لذا ارائه الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور یافتن بهترین راه‌حل ممکن، بخش عمده‌ای از مطالعه‌های صورت گرفته در این سیستم‌ها است [۲]. هدف از ارائه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بهینه نمودن عملیات زمان‌بندی منابع موجود در ریزشبکه‌های متصل به شبکه، به همراه لحاظ نمودن حداقل هزینه کلی تولید و نیز کاهش قیمت برق مصرفی^۲ (MCP) برای مصرف‌کنندگان در هر بازه زمانی مورد مطالعه است.

ساختارهای مختلفی برای سیستم‌های مدیریت انرژی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و همچنین پیکربندی‌های مختلفی برای ریزشبکه با انواع مختلف منابع در مراجع ارائه شده است. به‌عنوان مثال، [۳] با استفاده از مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط^۴ (MINLP) و با هدف به حداقل رساندن تابع هدف که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و زیست‌محیطی است، بهره‌برداری ریزشبکه را بهینه می‌نماید. روش‌های حل ریاضیاتی مانند MINLP نمی‌توانند مسائل غیر خطی در مقیاس بزرگ را بهینه نمایند. این مسائل می‌توانند به‌صورت مناسب توسط روش‌های ابتکاری حل شوند. به این منظور، برای مدیریت منابع انرژی یک روش جدید بنام SiPSO^۵ در [۴] ارائه شده است. در [۵] با استفاده از بهینه‌سازی

ازدحام ذرات یک طرح بهینه برای ریزشبکه ترکیبی، تحت سیاست‌های مختلف بازار از جمله بازار برق حوضچه توان و هیبرید ارائه شده است. در [۶] یک فرمول کلی برای تعیین استراتژی بهره‌برداری بهینه و بهینه‌سازی هزینه ریزشبکه ارائه شده است. در این کار، برای به حداقل رساندن تابع هزینه سیستم با توجه به قیود مسئله و برآوردن تقاضای بار از الگوریتم مش تطبیقی جستجو مستقیم استفاده شده است. در [۷] تقاضای بار مربوط به دو ریزشبکه با استفاده از یک پخش توان بهینه و الگوریتم ازدحام ذرات مدل شده است. در این مقاله، نشان داده شده است که چگونه انرژی ذخیره‌شده در ساعات با قیمت پایین و فروخته‌شده در قیمت بالا و همچنین کاهش پیک‌بار می‌تواند هزینه بهره‌برداری کل را کاهش دهد. در [۸] به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان ایجادشده توسط ریزشبکه مستقل از شبکه علاوه بر هزینه نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری، هزینه‌های قطع برق نیز در نظر گرفته شده است. در سیستم‌های قدرت کنونی، به‌دلیل محدودیت‌های استفاده از منابع تجدیدپذیر^۶ (REW)، مدیریت سمت تقاضا از اهمیت به سزایی برخوردار است. در [۹] یک روشی برای برآورده نمودن بارهای خانگی با هدف دستیابی به پایین‌ترین قیمت ارائه شده است. با استفاده از استراتژی پیشنهادشده، بارهای کمکی و یا پاسخ تقاضا به بازه‌های زمانی ارزان‌تر انتقال یافته‌اند. در [۱۰] از الگوریتم جستجوی گرانشی به‌منظور تعیین مدیریت بهینه انرژی استفاده شده است. در [۱۱] ترکیبی از بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل اصلاح‌شده ترکیبی با جستجوی محلی آشوب به‌کاربرده شده است. در [۱۲] یک سیستم مدیریت هوشمند انرژی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه پیشنهاد شده است. در این مقاله، در طول فرآیند بهینه‌سازی یک ماژول پیش‌بینی، یک ماژول مدیریت ES و یک ماژول بهینه‌سازی استفاده شده است.

در این مقاله، به‌منظور ارائه یک EMS در ریزشبکه متصل به شبکه سراسری، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری، بنام الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی^۷ (MICA)، با در نظر گرفتن حداقل هزینه تولید توان و کاهش MCP، پیشنهاد و پیاده‌سازی شده است. به‌واسطه سرعت همگرایی بالا و توانایی در یافتن پاسخ بهینه کلی در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری، می‌توان به نتایج اقتصادی مناسب‌تر و با قابلیت اعتماد بالاتر دست یافت [۱۳]. در الگوریتم پیشنهادشده، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه مدنظر قرار گرفته به‌نحوی که شرایط مندرج در قیود فنی را به‌طور کامل برآورده نماید. این راه‌حل‌ها به اپراتورها مطابق با ملاحظه‌های اقتصادی و قیود فنی مطرح‌شده، گزینه‌های مختلفی را برای انتخاب یک طرح توزیع توان مناسب پیشنهاد می‌دهد. هدف از ارائه این الگوریتم، مدیریت بهینه واحدهای تولید موجود در ریزشبکه، مدیریت سمت تقاضا و تبادل بهینه توان با شبکه سراسری است. الگوریتم ارائه‌شده، مبتنی بر جمعیت و بر پایه تکامل سیاسی و اجتماعی جوامع بشری بوده و دارای مزایای متعددی همچون سادگی، دقت، صرفه‌جویی در زمان، سرعت

کسره در آن، P_t^{GRID+} ، P_t^{k+} ، P_t^l ، P_t^{UP} ، P_t^{GRID-} ، P_t^{k-} ، P_t^j ، P_t^i به ترتیب توان اکتیو تولیدی توسط منبع غیر قابل کنترل Δm ، توان اکتیو تولیدی توسط منبع قابل کنترل Δm ، توان تولیدی توسط سیستم ذخیره‌سازی kam ، توان خریداری شده از شبکه، توان تأمین نشده توسط ریزشبه، توان مصرف شده توسط بار قابل قطع Δm ، توان مصرفی توسط سیستم ذخیره‌سازی kam و توان فروخته شده به شبکه در بازه زمانی t است. همچنین π^l ، π^j ، π^{k-} و π^{GRID-} ، π^{UP} ، π^l ، π^{k+} و π^{GRID+} به ترتیب قیمت پیشنهادی توسط منبع غیر قابل کنترل Δm ، قیمت پیشنهادی توسط منبع قابل کنترل Δm ، قیمت پیشنهادی توسط سیستم ذخیره‌سازی kam به عنوان تولیدکننده، قیمت پیشنهادی توسط شبکه سراسری برای فروش توان، هزینه جریمه برای انرژی تغذیه نشده، قیمت پیشنهادی توسط بار قابل قطع Δm ، قیمت پیشنهادی توسط سیستم ذخیره‌سازی kam به عنوان مصرف کننده، قیمت پیشنهادی توسط شبکه سراسری برای خرید توان است.

۲-۲-۲-۱ قید تعادل

این قید بدین معنی است که در هر ریزشبه مقدار کل توان تولید شده توسط تولیدکنندگان^{۱۳} (TGP) در هر بازه زمانی بایستی برابر مقدار تقاضای کلی مصرف کنندگان^{۱۴} (TCP) باشد.

$$P_t^{TCP} = P_t^{TGP} \quad (2)$$

که در آن، P_t^{TCP} و P_t^{TGP} به ترتیب کل توان مصرفی و تولیدی در بازه زمانی t ام است.

۲-۲-۲-۲ منابع تجدیدپذیر

$$\underline{P}_t^{NDU} \leq P_t^{NDU} \leq \overline{P}_t^{NDU} \quad (3)$$

که در آن، $\underline{P}_t^{NDU}$ و $\overline{P}_t^{NDU}$ به ترتیب حداکثر و حداقل توان تولیدی پیش‌بینی شده توسط REW در بازه زمانی t است. لازم به ذکر است که توان تولیدی واقعی منابع تجدیدپذیر مقداری در این بازه خواهد بود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید این نوع مولدها، در این مقاله میزان تولید به صورت تصادفی در این بازه انتخاب شده است. مشخص است که با افزایش دقت پیش‌بینی این محدوده کوچک‌تر خواهد شد.

۲-۲-۲-۳ منابع تجدیدناپذیر

$$X_t^{DGU} \cdot \underline{P}_t^{DGU} \leq P_t^{DGU} \leq X_t^{DGU} \cdot \overline{P}_t^{DGU} \quad (4)$$

که در آن، $\underline{P}_t^{DGU}$ و $\overline{P}_t^{DGU}$ به ترتیب حداکثر و حداقل توان تولیدی توسط منابع تجدید ناپذیر در بازه زمانی t است. X_t^{DGU} متغیر تصمیم‌گیری منابع قابل کنترل است.

همگرایی بالا است و می‌توان به نتایج اقتصادی مناسب و سطح قابلیت اعتماد بالادست یافت. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از اطلاعات منابع غیر قابل کنترل^۸ و بارهای غیر قابل قطع^۹ که از شبکه واقعی اندازه‌گیری شده‌اند؛ با توجه به متغیرهای مستقل و وابسته و با در نظر گرفتن قیود فنی مطرح شده در این مسئله می‌تواند جمعیت اولیه‌ای را ایجاد نماید. علاوه بر این، نتایج حاصله از الگوریتم پیشنهادی با نتایج به دست آمده از EMS پیاده‌سازی شده بر پایه الگوریتم MINLP و نیز الگوریتم‌هایی بر پایه روش‌های ابتکاری بنام‌های بهینه‌سازی زنبور عسل چند زمانه^{۱۱} (MABC) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۲} (PSO) مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده بهبود زیادی در عملکرد منابع تولید، کاهش زیاد در هزینه تولید و قیمت برق برای مصرف‌کنندگان دارد.

نواوری‌های ارائه شده در این مقاله می‌تواند به صورت موارد زیر خلاصه شوند:

- ۱- ارائه تابع هزینه با لحاظ نمودن هزینه جریمه برای عدم تأمین کامل تقاضای بار
- ۲- مدیریت طرف مصرف با استفاده از بارهای پاسخگو در جهت کاهش مقدار توان تغذیه نشده در زمان اوج مصرف و قیمت بالای برق
- ۳- اعمال اصلاحات لازم در جهت سازگار نمودن الگوریتم پیشنهادی برای کاربردهای MG و پیاده‌سازی عملی آن بر روی یک MG نمونه و تعمیم آسان با دیتاهای مختلف ورودی

۲-۲ فرموله کردن مسئله

۲-۱-۲ تابع هزینه

تابع هزینه تعریف شده در این مقاله، بر پایه هزینه کلی انرژی در ریزشبه‌ها است که شامل تفاضل هزینه‌های ناشی از REW، منابع قابل کنترل، دشارژ شدن منابع ES، خرید توان از شبکه از میزان درآمدی است که توسط بارهای قابل کنترل^{۱۳} (RLD)، شارژ منابع ES و فروش توان به شبکه سراسری به دست می‌آید. در تابع هزینه، جریمه ناشی از توان تأمین نشده نیز در نظر گرفته شده است. تابع هزینه می‌تواند به صورت رابطه زیر فرموله شود:

$$\min f = \sum_{t=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{N_{NDU}} P_t^i \times \pi_t^i + \sum_{j=1}^{N_{DGU}} P_t^j \times \pi_t^j + \sum_{k=1}^{N_{ES}} P_t^{k-} \times \pi_t^{k-} + \sum_{l=1}^{N_{RLD}} P_t^l \times \pi_t^l - \sum_{l=1}^{N_{RLD}} P_t^l \times \pi_t^l - \sum_{k=1}^{N_{ES}} P_t^{k+} \times \pi_t^{k+} - P_t^{GRID+} \times \pi_t^{GRID+} \right] \times \Delta t \quad (1)$$

۲-۲-۴- سیستم ذخیره‌سازی انرژی

$$0 \leq P_t^{ES-} \times X^{ES} \leq \bar{P}^{ES-} \quad (5)$$

که در آن، P_t^{ES-} و $\bar{P}^{ES-}$ به ترتیب توان تولیدی و حداکثر توان تولیدی توسط ES در بازه زمانی است. X^{ES} متغیر باینری تصمیم‌گیری سیستم ذخیره‌سازی است.

$$0 \leq P_t^{ES+} \times (1 - X^{ES}) \leq \bar{P}^{ES+} \quad (6)$$

که در آن، P_t^{ES+} و $\bar{P}^{ES+}$ به ترتیب توان مصرفی و حداکثر توان مصرفی توسط ES در بازه زمانی است.

$$E_t^{ES} = E_{t-1}^{ES} + ((1 - X^{ES}) \times P_t^{ES+} - X^{ES} \times P_t^{ES-}) \times \Delta t \quad (7)$$

که در آن، E_t^{ES} انرژی ذخیره‌شده در ES در بازه زمانی t و E_{t-1}^{ES} انرژی موجود در ES در بازه زمانی $t-1$ است.

$$\underline{E}^{ES} \leq E_t^{ES} \leq \bar{E}^{ES} \quad (8)$$

که در آن، $\underline{E}^{ES}$ و $\bar{E}^{ES}$ به ترتیب حداقل و حداکثر انرژی ذخیره‌شده در ES و E_t^{ES} انرژی ذخیره‌شده در ES در بازه زمانی t است.

$$SOC_t = \frac{E_t^{ES}}{E_{Tot}^{ES}} \quad (9)$$

که در آن، SOC_t نشان‌دهنده وضعیت باتری (SOC) در بازه زمانی t و E_{Tot}^{ES} حداکثر انرژی است که می‌تواند در باتری وجود داشته باشد که در این مطالعه، این مقدار ۲ (kwh) است.

۲-۲-۵- بارهای قابل قطع

$$\sum_{t=1}^{NT} \sum_{l=1}^{N_{RLD}} P_t^l \leq \bar{P}^{RLD} \quad (10)$$

$$\bar{P}^{RLD} = 20\% \times \sum_{t=1}^{NT} P_t^{NRLD} \quad (11)$$

در (۱۰) $\bar{P}^{RLD}$ حداکثر مقدار توان مصرف‌شده توسط RLD است که مطابق رابطه (۱۱) برابر ۲۰٪ کل بارهای غیر قابل قطع است. این رابطه بیان می‌کند که کل توان مصرفی توسط RLD بایستی کمتر یا مساوی حداکثر بار در نظر گرفته‌شده برای RLD باشد.

۲-۲-۶- تبادل با شبکه سراسری

همان‌طور که ذکر شد، در صورتی که ریزشبه در حالت متصل به شبکه باشد می‌تواند با شبکه سراسری تعامل داشته باشد. اما این‌گونه تعامل به قیودی محدود است.

$$P_t^{GRID+} \leq X_t^{GRID} \cdot \bar{P}^{GRID} \quad (12)$$

$$P_t^{GRID-} \leq (1 - X_t^{GRID}) \cdot \bar{P}^{GRID} \quad (13)$$

این دو رابطه بدان معناست که ریزشبه بیشتر از $\bar{P}^{GRID}$ نمی‌تواند از شبکه توان خریداری کند و یا به شبکه توان بفروشد. درواقع این قید ناشی از محدودیت خطوط انتقال واصل بین شبکه و ریزشبه است.

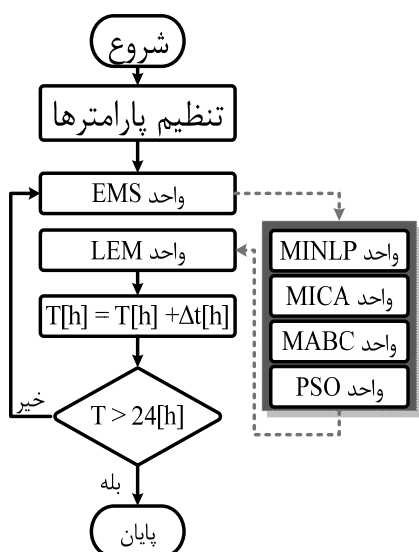
$$\bar{P}^{GRID} \leq 50\% \times P_t^{GEN} \quad (14)$$

$$P_t^{GEN} = \sum_{i=1}^{N_{NDU}} P_t^i + X_t^{DGU} \cdot \sum_{j=1}^{N_{DGU}} P_t^j + X_t^{ES} \cdot \sum_{k=1}^{N_{ES}} P_t^{k-} \quad (15)$$

به‌منظور محدود نمودن تبادل با شبکه و استفاده بهتر از منابع موجود در ریزشبه رابطه ۱۴ و ۱۵ در نظر گرفته شده‌اند. که در آن، P_t^{GEN} مجموع توان‌های تولیدی در بازه زمانی t است.

۳- الگوریتم پیشنهادشده برای پیاده‌سازی EMS

در شکل ۱ فلوچارت الگوریتم پیشنهادشده به‌منظور پیاده‌سازی EMS در ریزشبه‌ها نشان داده شده است. همان‌طوری که از این شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادشده از واحدهایی شامل EMS و بازار انرژی محلی^{۱۶} (LEM) تشکیل شده است. واحد EMS با استفاده از واحدهای مختلفی بنام‌های واحد برنامه‌ریزی غیر خطی دودویی عدد صحیح (EMS-MINLP)، واحد رقابت استعماری چندبعدی (EMS-MICA)، واحد بهینه‌سازی زنبورعسل چندزمانه (MABC) و واحد بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) پیاده‌سازی شود. واحد LEM برای تمامی الگوریتم‌های پیشنهادشده به یک نحو پیاده‌سازی شده است. الگوریتم مربوطه و نیز ساختار واحدهای LEM و MINLP در مقاله‌های قبلی توسط نویسندگان ارائه شده است [۱۵-۱۲، ۱۴]. در ادامه نحوه پیاده‌سازی واحدهای MICA، MABC و PSO به تفصیل شرح داده شده است. ضمناً توضیح مختصری در رابطه با LEM در این مقاله برای درک بهتر خروجی این واحد ارائه می‌شود.



شکل ۱: فلوچارت مربوط به الگوریتم‌های پیشنهادشده برای EMS

۳-۱- واحد MICA

در این واحد به منظور پیاده‌سازی مدیریت انرژی از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری چندبعدی استفاده شده است. الگوریتم رقابت استعماری که مبتنی بر جمعیت و بر پایه تکامل سیاسی و اجتماعی جوامع بشری است؛ در سال ۲۰۰۷ توسط آتش‌پز و لوکاس معرفی شده است. این الگوریتم دارای مزایای متعددی همچون سادگی، دقت و صرفه‌جویی در زمان است. مشابه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، این الگوریتم نیز با جمعیت اولیه‌ای که هر جز آن یک کشور محسوب می‌شود و با در نظر گرفتن قیودی که برای مسئله مورد نظر اختصاص داده شده است، شروع می‌شود. کشورها به دودسته مستعمره و استعمارگر تقسیم‌بندی می‌شوند. استعمارگر به همراه مستعمره‌هایش یک امپراتوری را تشکیل می‌دهند. اساس کار این الگوریتم بر پایه رقابت استعماری بین امپراتوری‌ها است. در این میان، تلاش استعمارگرها به منظور به دست آوردن مستعمره‌های بیشتر، فرآیند رقابتی استعماری نامیده می‌شود. با توجه به این فرآیند، به تدریج قدرت امپراتوری قدرتمندتر افزایش و قدرت امپراتوری‌هایی که ضعیف‌ترند، کاهش می‌یابد. اگر چنانچه امپراتوری تمامی مستعمره‌های خود را از دست بدهد، این امپراتوری سقوط خواهد کرد. با گذشت زمان، قدرتمندترین استعمارگر در جهان باقی مانده و تمامی کشورها، مستعمره این امپراتوری منحصربه‌فرد خواهند شد. آخرین امپراتوری نشان‌دهنده بهترین راه‌حل برای این مسئله است. لازم به ذکر است نحوه تولید جمعیت اولیه در MICA، با توجه به تابع هدف و قیود مربوط به سیستم در ساختار مدیریت انرژی اصلاح شده است. در این رابطه در ادامه به تفصیل صحبت شده است.

فلوچارت واحد EMS-MICA در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در مسئله مطرح‌شده، بازه زمانی مورد مطالعه ۲۴ ساعته بوده و اطلاعات مربوط به حداکثر توان خروجی REW و پیک‌بار مصرفی در بازه‌های زمانی نیم‌ساعته اندازه‌گیری شده است. سپس مقادیر بهینه متغیرهای مسئله، توسط واحد EMS-MICA تعیین می‌شود، به طوری که ضمن برآورده نمودن کلیه قیود فنی ارائه‌شده، در نهایت با استفاده از تابع هزینه مورد نظر منجر به یافتن کمترین مقدار هزینه تولید توان می‌شود. متغیرهای مسئله را می‌توان به دودسته مستقل و وابسته تقسیم نمود. متغیرهای مستقل، متغیرهایی هستند که مربوط به منابع غیر قابل کنترل (در این مطالعه توربین بادی و خورشیدی) بوده به نحوی که تغییر مقادیر دیگر متغیرها تأثیری بر روی آن‌ها ندارند و فقط به مقدار توان قابل دسترس در هر بازه زمانی وابسته است. در حالی که متغیرهای وابسته متغیرهای هستند که مقدارشان به تغییرات متغیرهای مستقل حساس بوده و متناسب با آن‌ها تغییر می‌نماید.

توان خروجی منابع قابل کنترل (در این مطالعه میکروتوربین^{۱۷} (MT))، توان فروخته‌شده و خریداری‌شده از شبکه، توان تولیدی و مصرفی ES و RLD از جمله متغیرهای وابسته محسوب می‌شوند.

بنابراین مطابق فلوچارت ۳، ابتدا بایستی متغیرهای مستقل به صورت تصادفی با در نظر گرفتن محدوده توان تولیدی پیش‌بینی‌شده توسط این منابع، ایجاد شوند. سپس، با توجه به متغیرهای مستقل و نیز قیود مطرح‌شده برای حل مسئله، مقادیری به صورت تصادفی برای متغیرهای وابسته ایجاد خواهد شد. سپس، مطابق با فلوچارت ۲، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود. لازم به ذکر است پارامترهای مربوط به الگوریتم MICA می‌توانند در جدول ۱ خلاصه شوند.

جدول ۱: پارامترهای تنظیم الگوریتم MICA

۱۰۰	تعداد جمعیت اولیه
۲۰	تعداد امپراتوری‌ها
۸۰	تعداد مستعمرات
۹۰	تعداد تکرار الگوریتم در هر بازه
۰/۸	ضریب جذب
۰/۱	نرخ انقلاب
۰/۱	درصد قدرت مستعمرات یک امپراتوری

۳-۲- واحد LEM

در بازار برق، قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولیدشده/ مصرف‌شده توسط منابع تولید و مصرف‌کنندگان به اپراتور بازار اعلام می‌شود. انواع مختلف مناقصه از قبیل حراج تک‌سویه و حراج دوسویه در بازار برق پیشنهاد شده است [۱]. در حراج دوسویه قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولیدشده و مصرف‌شده توسط منابع تولید و مصرف به اپراتور بازار ارسال می‌شود. مقدار انرژی تولیدشده توسط تولیدکنندگان به شکل تابع پله‌ای به صورت صعودی بر اساس قیمت پیشنهادی‌شان مرتب می‌شوند. همچنین، مقدار انرژی مصرف‌شده توسط مصرف‌کنندگان به شکل تابع پله‌ای نزولی بر اساس قیمت پیشنهادی‌شان مرتب می‌شوند. محل تقاطع این دو منحنی مقدار MCP را مشخص خواهد کرد. در حراج تک‌سویه قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولیدشده توسط تولیدکنندگان و تنها مقدار انرژی مصرف‌شده توسط مصرف‌کنندگان به اپراتور بازار ارسال می‌شود. محل تقاطع دو منحنی، مشابه رویه توضیح داده‌شده برای حراج دوسویه، مقدار MCP را ارائه می‌دهد. در واحد LEM پیشنهادشده در این مقاله با استفاده از ساختار حراج یک‌سویه، یک بازار انرژی محلی برای ریزشبه تحت مطالعه معرفی شده است. این واحد به طور جامع در [۱] ارائه شده است.

۳-۳- واحد MABC

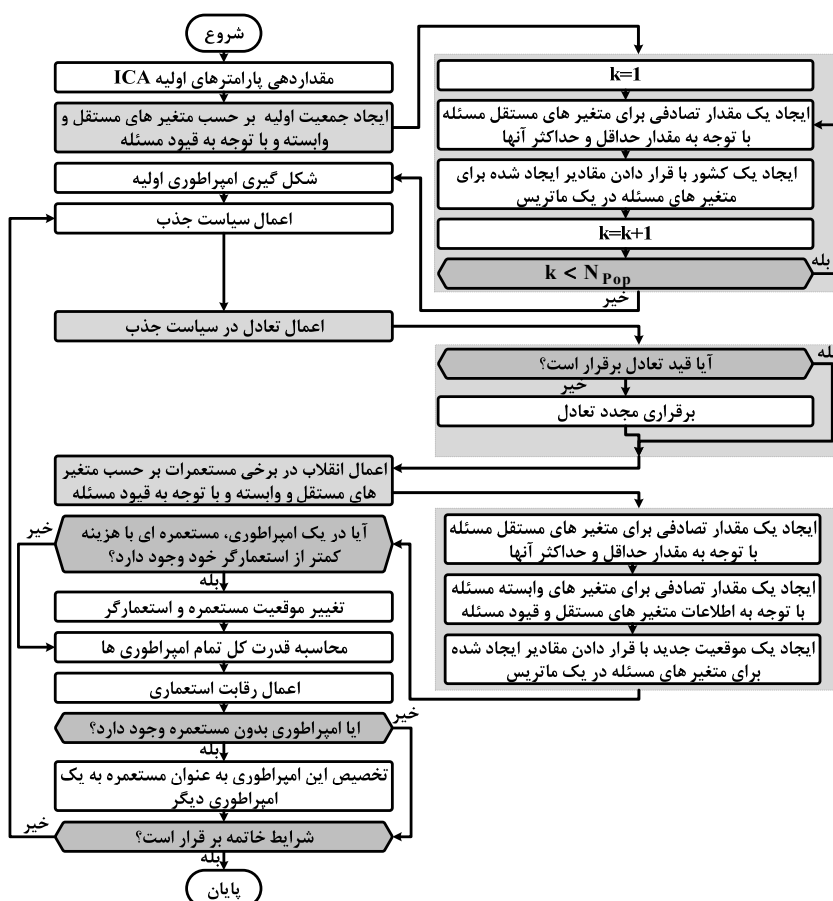
مشابه با الگوریتم‌های مبتنی بر روش‌های ابتکاری، الگوریتم ABC نیز یک فرآیند تکرارشونده بوده که با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود که شامل پاسخ‌های قابل قبول (جواب‌هایی که قیود در نظر گرفته‌شده برای مسئله را برآورده می‌کنند) است. در این مقاله، $D = 8$ بوده و دربرگیرنده پارامترهایی چون توان‌های P_t^{MT} ، P_t^{PV} ، P_t^{WT} ، P_t^{GRD+} و P_t^{GRD-} است. هدف پیدا نمودن

سپس، با توجه به این متغیرهای مستقل و نیز قیود مطرح‌شده برای حل مسئله، مقادیری به‌صورت تصادفی برای متغیرهای وابسته ایجاد خواهد شد. پارامترهای مربوط به الگوریتم پیشنهادشده در جدول ۲ به‌طور کامل لیست شده‌اند. فلوجارت پیشنهادشده برای الگوریتم MABC در شکل ۴ نشان داده شده است. قسمت‌های رنگی اصلاحات صورت پذیرفته بر روی الگوریتم MABC به‌منظور سازگاری این روش برای کاربردهای MG می‌باشند.

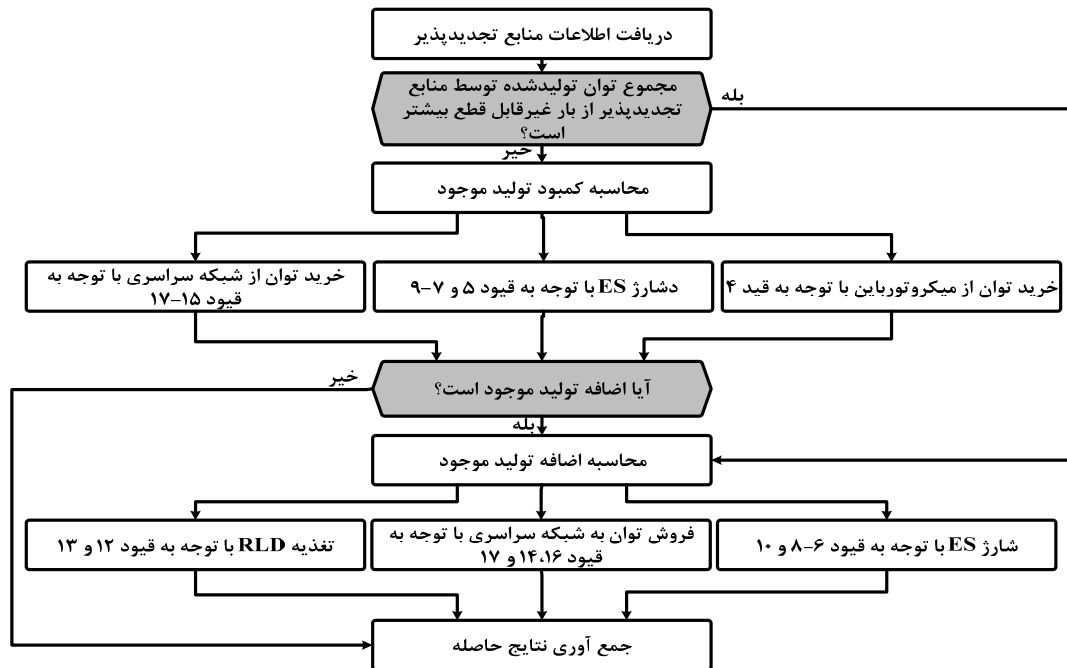
جدول ۲: پارامترهای مربوط به الگوریتم MABC

مقدار	نام متغیر
۸ عدد	تعداد متغیرها
۱۰۰	تعداد جمعیت اولیه
۲۰۰	تعداد منابع غذا
۱۰۰	ماکزیمم تعداد سیکل (maximum cycle number- MCN)
۱۰۰	Limit (بدین معنی هست که اگر به‌اندازه این معیار جواب الگوریتم بهبود پیدا نکند جواب قبلی حذف شده و زنبور پیشاهنگ به‌عنوان یکی از جواب‌ها منظور می‌شود)

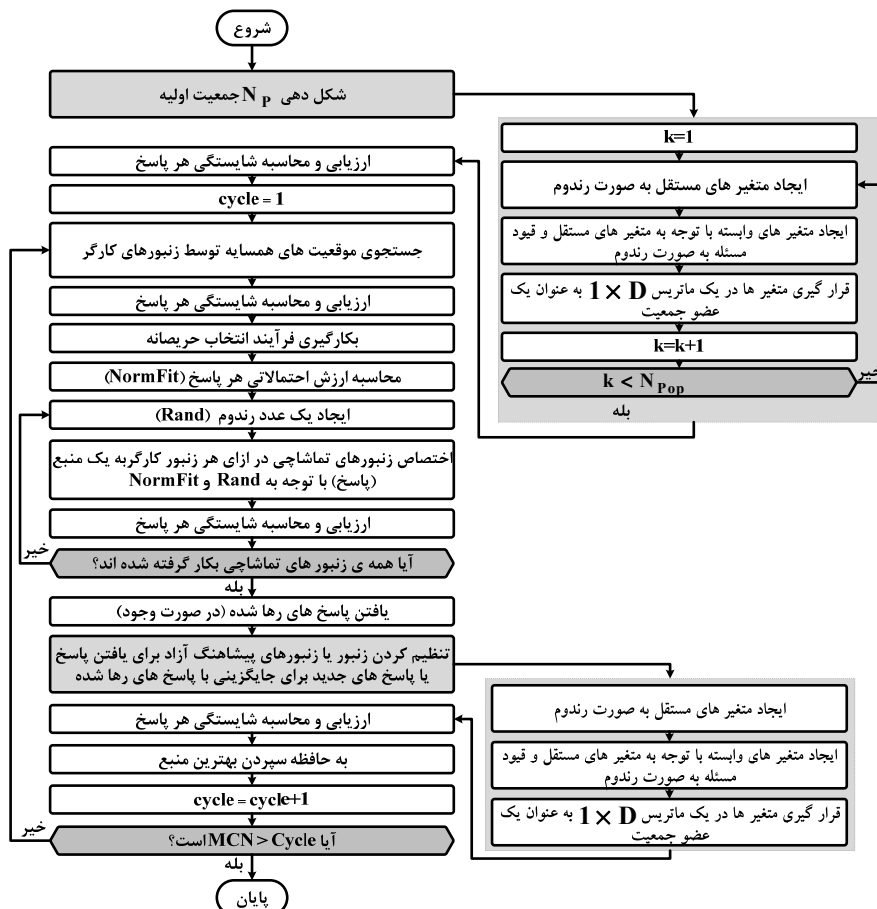
مقادیر این متغیرها است که در نهایت منجر به یافتن کمترین مقدار هزینه تولید الکتریسیته با استفاده از تابع هزینه (۱)، شود. بنابراین، $X_t^i = \{x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^8\}$ به‌صورت یک بردار ۸ بعدی به‌صورت تعریف شده که هر یک از درایه‌های آن $x_t^2 = P_t^{PV}$, $x_t^1 = P_t^{WT}$, $x_t^7 = P_t^{GRID+}$, $x_t^6 = P_t^{EWH}$, $x_t^5 = P_t^{ES-}$, $x_t^4 = P_t^{ES+}$, $x_t^3 = P_t^{MT}$ و $x_t^8 = P_t^{GRID-}$ هستند. این متغیرها به دو نوع متغیر وابسته و مستقل تقسیم‌بندی می‌شوند. توان‌های MT, ES, DR, خریداری‌شده و فروخته‌شده از/به شبکه سراسری به‌عنوان متغیرهای وابسته و توان خروجی WT و PV به‌عنوان متغیرهای مستقل فرض شده‌اند. دلیل آن این است که منابع WT و PV به‌عنوان منابع تولید غیر قابل کنترل هستند و بسته به شرایط آب و هوایی توان خروجی آن‌ها قابل تغییر و مستقل از توان بار و یا منابع تولید دیگر می‌باشند. درحالی‌که توان خروجی MT و ES بسته به توانی که توسط منابع تجدیدپذیر (WT و PV) تولیدشده و میزان بار مصرفی، می‌تواند تغییر نماید. در نتیجه، ابتدا بایستی متغیرهای مستقل (P_t^{PV} و P_t^{WT}) به‌صورت تصادفی با در نظر گرفتن ماکزیمم توان تولیدی توسط این منابع، ایجاد شوند.



شکل ۲: نمایش گرافیکی فرآیند طی‌شده در الگوریتم MICA



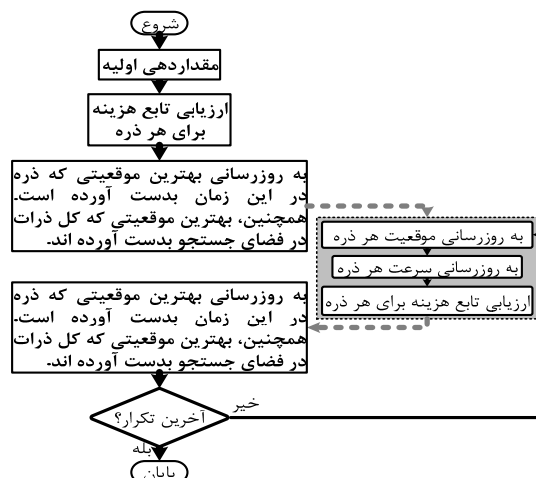
شکل ۳: نمایش گرافیکی فرآیند ایجاد جمعیت اولیه در الگوریتم MICA



شکل ۴: فلوچارت پیشنهادشده برای پیاده‌سازی واحد MABC

۴-۳- واحد PSO

مشابه واحدهای قبلی برای پیاده‌سازی EMS، متغیرهای ورودی این واحد مشابه آنچه در بخش ۳-۳ توضیح داده شده، در نظر گرفته شده است. نحوه پیاده‌سازی و روابط ریاضی این واحد در [۱۳] به تفصیل تشریح شده است. الگوریتم پیاده‌سازی شده برای این واحد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: فلوچارت پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی واحد PSO

۴- سیستم تحت مطالعه

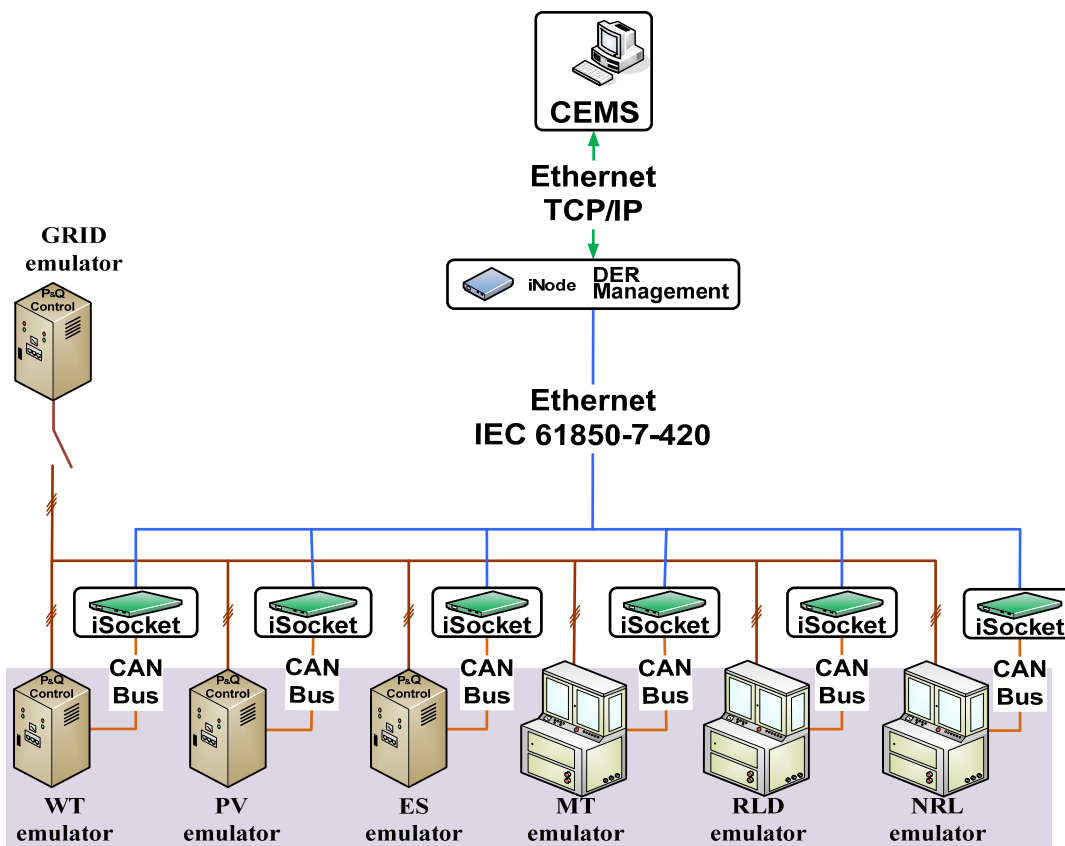
در شکل ۶ ساختار تک‌خطی ریزشبه مرکز تحقیقات انرژی کاتولونیا-بارسلونا نشان داده شده است. جزئیات مربوط به این سیستم و نحوه پیکربندی ایمولاتورهای موجود به‌طور کامل در مقاله‌های قبلی ارائه شده است [۱،۲]. پروفایل توان مربوط به منابع تجدیدپذیر (توربین بادی و خورشیدی در این مطالعه) و نیز توان مصرفی توسط بار غیر قابل قطع از [۱] اخذ شده است. قیمت پیشنهادی مربوط به تولیدکنندگان تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر یا رزرو چرخان^{۱۸} (SR) (میکروتوربین در این مطالعه)، RLD، تعرفه خرید/فروش برق از/به شبکه سراسری و جریمه ناشی از توان تأمین نشده نیز از [۱] اخذ شده است. سناریوهای مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهاد شده به‌منظور نشان دادن قابلیت پاسخگویی سریع الگوریتم به وقوع هر رویدادی در سیستم در نظر گرفته شده است. نهایتاً، این سناریوها بر روی ریزشبه مرکز تحقیقات انرژی کاتولونیا به‌صورت عملی نیز تست شده است. این سناریوها عبارت‌اند از:

سناریو ۱: عملکرد نرمال

سناریو ۲: افزایش ناگهانی بار

سناریو ۳: قابلیت وصل کن و استفاده کن (از سرویس خارج شدن

ناگهانی منابع تجدیدپذیر)



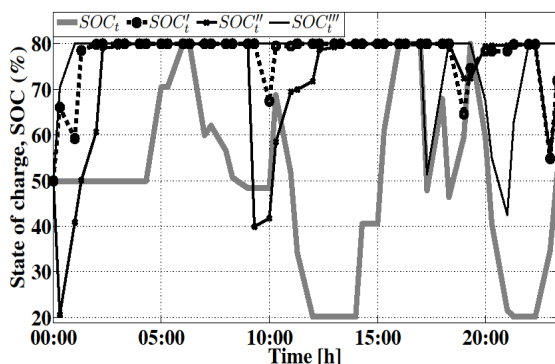
شکل ۶: دیاگرام تک‌خطی سیستم تحت مطالعه

۵- نتایج شبیه‌سازی و عملی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی و عملی ناشی از پیاده‌سازی دو الگوریتم ارائه شده است.

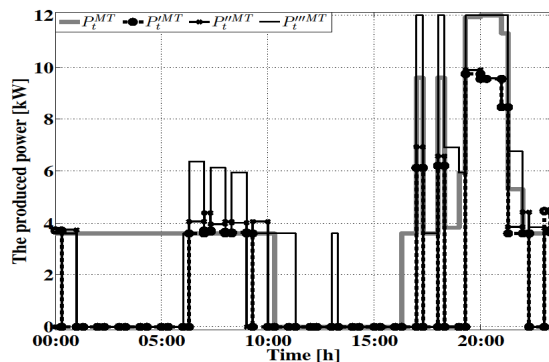
SOC و ES برای هر دو الگوریتم در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نشان داده شده است. در طول بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰، ES در الگوریتم EMS-MICA شروع به شارژ شدن نموده و پس از ساعت ۰۴:۰۰ به مقدار حداکثر مقدار خود (SOC) رسیده و در همان مقدار تا آخر این دوره زمانی، باقی مانده است. این در حالی است که ES در الگوریتم EMS-MINLP تا ساعت ۰۵:۰۰ در مقدار اولیه خود (SOC_i) باقی مانده است. سپس، در این لحظه شروع به شارژ شدن نموده و در پایان بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰ به مقدار SOC رسیده است. در بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰، MT در الگوریتم EMS-MINLP همواره با حداقل ظرفیت خود (P^{MT}) توان تولید می‌نماید و ES مشارکتی در تأمین توان مورد نیاز بار غیر قابل قطع ندارد. بخش اعظم توان مازاد تولید شده توسط MT نیز صرف تغذیه RLD شده است و مقدار کل بار RLD در این الگوریتم در حدود ۸۶٪ بیشتر از مقدار آن در الگوریتم EMS-MICA در طول بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰ تخمین زده شده است. با توجه به بالاتر بودن قیمت پیشنهادی RLD نسبت به ES، در نتیجه الگوریتم EMS-MICA تصمیم گرفته است تا مازاد توان تولیدی^{۱۹} (EGP) را صرف تغذیه ES نماید. تا این که علاوه بر کاهش هزینه مصرفی برای مصرف‌کنندگان، ES شارژ بیشتری برای بازه‌های زمانی در خود داشته باشد. در این بازه زمانی، MT به‌جز در ساعت ۰۰:۰۰ در بقیه مواقع خارج از سرویس است. ES در الگوریتم EMS-MABC ابتدا به‌طور کامل دشارژ شده و مقدارش به $\overline{SOC}$ می‌رسد. به‌منظور جبران انرژی دشارژ شده در ES، این الگوریتم در بازه زمانی بعدی با به سرویس آوردن MT و عمدتاً با خرید توان از شبکه اصلی شروع به شارژ ES نموده است. ES در الگوریتم EMS-PSO با توجه به این که MT در این الگوریتم با توان $\overline{P}^{MT}$ وارد مدار شده و علاوه بر تأمین تقاضای بار مابقی توان تولیدی صرف شارژ ES می‌شود. در بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۱۲:۰۰، ES در الگوریتم EMS-MICA تنها در یک بازه کوتاهی شروع به دشارژ نموده و دوباره به حالت شارژ بازگشته تا این که در پایان بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۱۲:۰۰ مقدار SOC آن به $\overline{SOC}$ رسیده است. MT در این الگوریتم تا ساعت ۱۹:۰۰ در سرویس بوده و کمبود توان توسط آن جبران می‌شود. این در حالی است که ES تا این لحظه در حالت ایده‌آل عمل نموده است. ولی پس از این زمان، MT خاموش شده و کمبود توان توسط ES تأمین شده است. این در حالی است که MT در الگوریتم EMS-MINLP همچنان با توان $\overline{P}^{MT}$ به تولید خود ادامه داده و در ساعت ۱۰:۳۰ از سرویس خارج شده است. در این لحظه، ES شروع به دشارژ نموده و تا پایان بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۱۲:۰۰ در این حالت کار می‌نماید تا این که مقدار SOC آن به $\overline{SOC}$ می‌رسد. ES در الگوریتم EMS-MABC تا ساعت ۰۹:۳۰ تغییر نکرده

و به ترتیب ۴۲/۶ و ۲۳/۵ درصد از کمبود توان توسط MT و خرید از شبکه تأمین شده است. مقدار SOC در الگوریتم EMS-MICA (SOC'_t) در بازه زمانی ۱۲:۰۰ - ۱۸:۰۰ در همان مقدار خود (یعنی $\overline{SOC}$) باقی مانده و الگوریتم کمبود توان خود حتی طی وقوع سناریوی ۲ را از طریق MT برآورده نموده است. در الگوریتم EMS-MINLP پس از یک دوره شارژ ES، در زمان وقوع سناریوی ۲، ES شروع به دشارژ شدن نموده و مقدار آن تا ۴۶٪ در پایان این بازه زمانی متوقف می‌شود. در بازه زمانی ۱۲:۰۰ - ۱۸:۰۰، ES در الگوریتم EMS-MICA نقشی در تأمین توان مورد نیاز نداشته و کمبود توان توسط MT و یا خرید از شبکه سراسری تأمین شده است. در حالی که ES در الگوریتم EMS-MINLP نقش پررنگ‌تری نسبت به شبکه سراسری داشته و فقط بخش ناچیزی از کمبود توان از شبکه سراسری خریداری شده است. کمبود توان در الگوریتم EMS-MABC در این بازه زمانی عمدتاً توسط خرید از شبکه جبران شده است؛ و ES نقش چندانی برای تأمین تقاضای بار ایفا نمی‌نماید. همان‌طوری که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، در پایان عملکرد ۲۴ ساعته سیستم، SOC'_t به میزان ۲۸٪ بیشتر از مقدار SOC در الگوریتم EMS-MINLP (SOC_t) شده است. بنابراین ES شارژ بیشتری برای روز بعد به‌منظور استفاده در صورت نیاز دارا است. با آنالیز انجام شده مشخص شده است که مقدار متوسط SOC'_t در حدود ۷۷٪ بوده که در حدود ۳۶٪ از مقدار متوسط SOC_t در طول عملکرد روزانه سیستم بیشتر است. بنابراین، در الگوریتم EMS-MICA با شارژ بهتر ES اگر چنانچه سیستم در حالت مستقل از شبکه قرار گیرد سعی در بالا بردن قابلیت سیستم در پشتیبانی بار دارد. در الگوریتم EMS-MABC از MT و شبکه اصلی استفاده شده و ES عمدتاً در حالت ایده‌آل است. همان‌طوری که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، SOC در الگوریتم EMS-PSO عمدتاً در مقدار $\overline{SOC}$ در طول باقی مانده است. در پایان روز نیز به مقدار حداکثر خود $\overline{SOC}$ رسیده است. علی‌رغم پایین‌تر بودن آفر ES نسبت به منابع دیگر، قاعدتاً مصرف‌کننده در EMS-PSO هزینه بیشتری برای تأمین تقاضای خود بایستی پرداخت نماید.



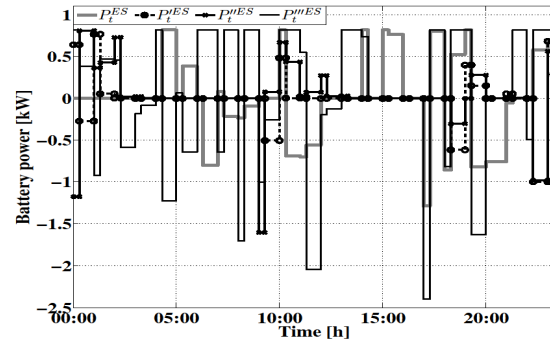
شکل ۷: SOC در طول عملکرد روزانه سیستم

توجه به بالا بودن مقدار متوسط MCP در بازه‌های زمانی ۲ و ۳ و بنابراین نیاز به تغذیه مصرف‌کنندگان با منابع با قیمت پیشنهادی پایین‌تر بیش‌ازپیش احساس می‌شود. برای نیل به این هدف، الگوریتم EMS-MICA با توجه به پایین‌تر بودن قیمت پیشنهادی π^{GRID-} نسبت به آفر π^{MT} در این زمینه پیشگام بوده است. در زمان وقوع سناریوی ۲، با توجه به این‌که مقدار λ_t^{MCP} کمترین مقدار را در بین الگوریتم‌های دیگر را دارا است و با توجه به π^{GRID-} کمتر از π^{MT} بوده، لذا الگوریتم EMS-MABC عمدتاً از شبکه سراسری کمبود توان را تأمین نموده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، در MT در EMS-PSO در بازه‌های زمانی بیشتری در مدار بوده است. علاوه بر این، ظرفیت تولیدی آن نیز به‌مراتب بیشتر از الگوریتم‌های دیگر است. با توجه به این‌که آفر MT از تمامی منابع تولید بالاتر موجود در سیستم تحت مطالعه بالاتر است، لذا الگوریتمی که از منابع جایگزین دیگر (خرید توان از شبکه سراسری و ES) بیشتر استفاده نماید، هزینه تولید و قیمت برق مصرفی به‌مراتب پایین‌تری خواهد داشت.



شکل ۹: توان تولیدی توسط MT در طول عملکرد روزانه سیستم

پروفایل TCP برای هر دو الگوریتم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در بازه زمانی ۰۶:۰۰ - ۰۰:۰۰ در تمامی مواقع مقدار کل توان مصرفی الگوریتم EMS-MINLP (P_t^{TCP}) بزرگ‌تر از مقدار کل توان مصرفی الگوریتم EMS-MICA (P_t^{TCP}) شده است. با توجه به بالا بودن مقدار متوسط λ_t^{MCP} نسبت به λ_t^{MCP} در این بازه زمانی، بنابراین الگوریتم EMS-MINLP مصرف‌کننده بیشتری با قیمت بالاتری تغذیه نموده است. در بازه‌های زمانی ۲ و ۳، TCP در هر دو الگوریتم تقریباً الگوی مشابهی را دنبال نموده‌اند. ناگهان در ساعت ۱۶:۳۰ - ۱۷:۰۰ مقدار P_t^{TCP} بیشتر از P_t^{TCP} شده است که این موضوع ناشی از به سرویس وارد شدن MT با توان P_t^{MT} و تغذیه توان مازاد تولیدشده به RLD و شبکه سراسری است. در این بازه زمانی، مقدار MCP در هر دو الگوریتم برابر است؛ لذا الگوریتم EMS-MINLP مصرف‌کننده بیشتری را با قیمت برابر در این بازه زمانی تغذیه نموده است. این شرایط در بازه زمانی ۱۷:۳۰ - ۱۸:۰۰ نیز به وقوع پیوسته

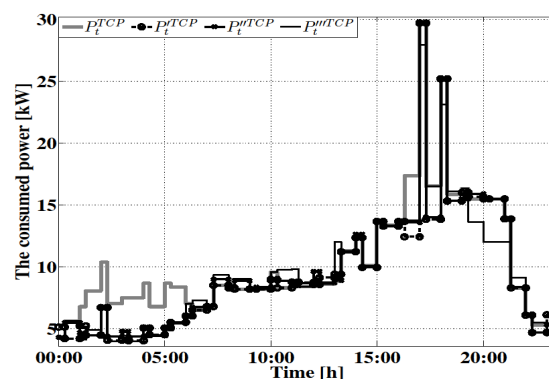


شکل ۸: توان شارژ/ دشارژ ES در طول عملکرد روزانه سیستم (نمودارهای با خط ممتد و خاکستری مربوط به الگوریتم EMS-MINLP (بدون علامت پریم)، خط چین با دایره مربوط به الگوریتم EMS-MICA (با یک علامت پریم)، با خط ممتد سیاه به همراه ستاره مربوط به الگوریتم EMS-MABC (با دو علامت پریم) و با خط ممتد سیاه نازک مربوط به الگوریتم EMS-PSO (با سه علامت پریم) می‌باشند.)

پروفایل توان MT در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، MT در الگوریتم EMS-MINLP در ۷۵٪ مواقع در حال سرویس بوده درحالی‌که این مقدار در الگوریتم EMS-MICA ۳۵٪ کاهش پیدا کرده است. الگوریتم EMS-MICA با توجه به پایین‌تر بودن قیمت پیشنهادی خرید از شبکه سراسری (π^{GRID-}) نسبت به قیمت پیشنهادی MT (π^{MT}) در نتیجه سعی نموده است کمبود توان خود را بیشتر از طریق شبکه سراسری جبران نماید تا این‌که ماحصل این عمل کاهش کلی در هزینه تولید و نیز بهبود پروفایل ES توسط این الگوریتم در پی داشته است. همان‌طوری که از شکل مشاهده می‌شود، MT در الگوریتم EMS-MICA در بازه‌های زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰ و ۱۲:۰۰ - ۱۸:۰۰ عمدتاً خارج از سرویس بوده و از شبکه برق سراسری خریداری نموده است. این در حالی است که در الگوریتم EMS-MINLP، MT در کل بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰ و بخشی از بازه زمانی ۰۶:۰۰ - ۱۲:۰۰ همواره با توان P_t^{MT} در سرویس بوده و در طول این بازه‌های زمانی توانی از شبکه سراسری خریداری ننموده است. در زمان وقوع سناریوی ۲، مقدار توان تولیدی توسط MT در الگوریتم EMS-MINLP (P_t^{MT}) نسبت به الگوریتم دیگر به میزان ۲۶٪ بزرگ‌تر است و مقدار متوسط توان خریداری‌شده از شبکه در الگوریتم EMS-MICA (P_t^{GRID-}) در حدود ۵۱٪ بیشتر از مقدار متوسط توان خریداری‌شده از شبکه در الگوریتم EMS-MINLP (P_t^{GRID-}) در این بازه زمانی به دست آمده است. این موضوع برای سناریوی ۳ نیز صادق است. طی وقوع این سناریو، مقدار متوسط P_t^{MT} به میزان ۲۱٪ بیشتر از مقدار متوسط P_t^{MT} شده است و به تبع مقدار توان خریداری‌شده نیز به همان نسبت (در حدود ۵۴٪) کمتر از مقدارش در الگوریتم EMS-MICA شده است. ذکر این نکته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه با

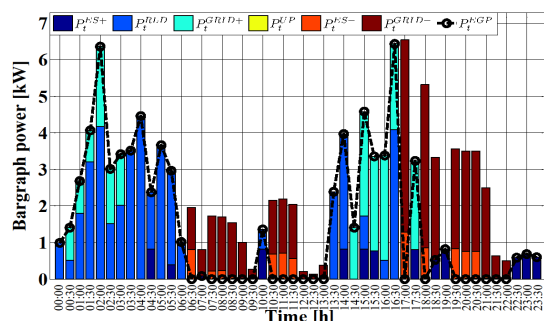
برای تغذیه RLD و فروش به شبکه سراسری استفاده شده است. با توجه به پایین بودن مقدار متوسط λ_t^{MCP} در این بازه زمانی، علی‌رغم این‌که ES قیمت پیشنهادی بالاتری برای شارژ نسبت به شبکه و RLD ارائه کرده است، با این‌وجود عمده توان مازاد تولیدی صرف تغذیه RLD شده است. از آنجایی‌که MT در الگوریتم EMS-MICA خارج از سرویس است، بنابراین EGP به‌مراتب کمتری نسبت به الگوریتم EMS-MINLP تولید شده است. تحت این شرایط، الگوریتم قاعداً صرفاً به دنبال تأمین توان مورد نیاز بار غیر قابل قطع با در نظر گرفتن کاهش هزینه نهایی تولید بوده است. در بازه زمانی ۰۶:۰۰-۱۲:۰۰، به‌تدریج توان مصرفی بار غیر قابل قطع افزایش یافته در نتیجه الگوریتم EMS-MINLP علاوه بر تأمین بخشی از توان مورد نیاز خود با استفاده از MT، بخش دیگر را از طریق شبکه سراسری تأمین نموده است. تا این‌که، منبع خورشیدی نیز وارد مدار شده و با افزایش توان تولیدی توسط آن، به‌تدریج MT از سرویس خارج شده است. در الگوریتم EMS-MICA نیز وضع به همین منوال بوده، با این تفاوت که توان خریداری از شبکه سراسری به میزان ۵۱٪ بیشتر از توان تأمین‌شده به‌وسیله MT است. با توجه به افزایش مقدار متوسط λ_t^{MCP} در این بازه زمانی نسبت به بازه زمانی ۰۰:۰۰-۰۶:۰۰، الگوریتم EMS-MICA با توجه به پایین‌تر بودن قیمت پیشنهادی π^{GRID} نسبت به π^{MT} تصمیم به تأمین بخش بزرگ‌تری از توان مورد نیاز خود از طریق شبکه سراسری نموده است. در بازه زمانی ۱۲:۰۰-۱۸:۰۰ همچنان مقدار متوسط MCP در هر دو الگوریتم افزایش پیدا نموده است با این‌حال عملکرد دو الگوریتم به‌منظور استفاده بهینه از توان EGP متفاوت است. با وجود بالا بودن مقدار متوسط λ_t^{MCP} نسبت به بازه‌های زمانی ۱ و ۲، با این‌حال الگوریتم EMS-MICA به میزان ۷۹٪ از توان EGP تولیدی را برای تغذیه RLD اختصاص داده و مابقی به شبکه سراسری فروخته شده است. به‌دلیل این‌که SOC در این بازه زمانی برابر SOC بوده در نتیجه هیچ سهمی از توان EGP برای شارژ ES اختصاص داده نشده است. در الگوریتم EMS-MINLP سهم توان EGP برای مصرف‌کنندگان عبارت‌اند از ۵۱٪ برای فروش به شبکه سراسری، ۳۸٪ برای تغذیه RLD و در نهایت ۱۲٪ برای شارژ ES استفاده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، الگوریتم تنها با توجه به اولویت قیمت پیشنهادی هر یک از این مصرف‌کنندگان عمل نکرده است بلکه همچنین ملاحظه‌های فنی و قیود در نظر گرفته‌شده از قبیل حداکثر توان شارژ ES، حداکثر توان مبادله بین شبکه سراسری و ریزش‌بکه و غیره را نیز مدنظر قرار داده است. در بازه زمانی ۱۸:۰۰-۰۰:۰۰، سهم توان تولیدی در الگوریتم EMS-MICA توسط منابع SR، REW، منابع ذخیره انرژی و شبکه سراسری برای تأمین توان مورد نیاز به‌ترتیب ۲۳٪، ۴۳٪، ۱ و ۲۳٪ شده است. مشارکت این منابع در تأمین توان مورد نیاز در الگوریتم EMS-MINLP به‌ترتیب عبارت‌اند از ۶۳٪، ۲۴٪، ۱۲ و ۱٪ شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، الگوریتم EMS-

است. در این بازه زمانی مقدار λ_t^{MCP} بزرگ‌تر از λ_t^{MCP} بوده و MT در الگوریتم EMS-MINLP مشابه حالت قبلی با توان P^{MT} وارد سرویس شده و توان EGP باعث شارژ ES با توان P^{ES+} شده و بقیه توان EGP به شبکه سراسری فروخته شده است. درحالی‌که الگوریتم EMS-MICA توان مورد نیاز خود را از شبکه سراسری خریداری نموده است و علاوه بر تأمین بار غیر قابل قطع به مقدار خیلی ناچیزی نیز بار RLD را تغذیه نموده است. در بازه زمانی ۱۸:۰۰-۰۰:۰۰ نیز در ۳۱٪ مواقع P_t^{TCP} بزرگ‌تر از P_t^{TCP} شده است. از آنجایی‌که در این بازه زمانی، مقدار MCP در هر دو الگوریتم، حداکثر مقدار خود را دارا است؛ لذا الگوریتم EMS-MINLP علی‌رغم این موضوع، مصرف‌کننده بیشتری را در این بازه زمانی تغذیه نموده است. این موضوع حاکی از آن است که هزینه تأمین تغذیه مصرف‌کنندگان به‌شدت نسبت به الگوریتم EMS-MICA افزایش یافته است. مقدار P_t^{TCP} در طول عملکرد روزانه سیستم عمدتاً با مقدارش در الگوریتم EMS-MICA تقریباً مشابه است. ولی در زمان وقوع سناریوهای ۲ و ۳ مقدار P_t^{TCP} کمتر شده و بار RLD در بازه زمانی ۰۶:۰۰-۱۲:۰۰ که مقدار MCP به‌مراتب کمتر است، تغذیه شده است. اگرچه عملکرد ESM-PSO در کاهش تقاضای بار در طول بازه زمانی ۱۸:۰۰-۲۴:۰۰ شایسته است، ولی با توجه به این‌که بار RLD در این الگوریتم عمدتاً در بازه زمانی ۱۲:۰۰-۱۸:۰۰ که دارای MCP بالایی است، تغذیه شده است، در نتیجه مقدار هزینه برق مصرفی افزایش یافته است.

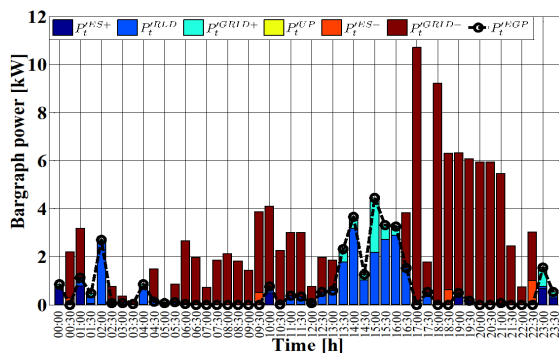


شکل ۱۰: توان کل مصرف‌شده در طول عملکرد روزانه سیستم

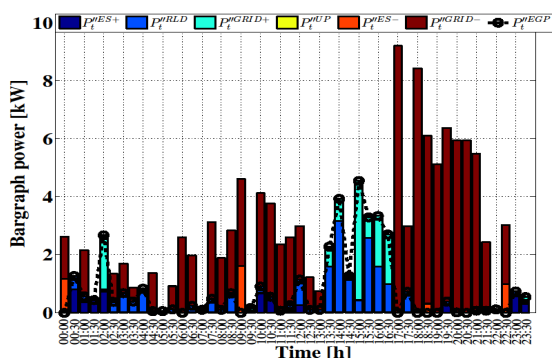
نمودار میله‌ای مربوط به توان ES، RLD، جریمه توان تأمین‌نشده، شبکه سراسری و EGP برای هر دو الگوریتم در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود، الگوریتم EMS-MINLP در بازه زمانی ۰۶:۰۰-۰۰:۰۰ عمده توان EGP را صرف تغذیه RLD نموده است. همچنین، شبکه نیز سهم زیادی از توان EGP را به خود اختصاص داده است. دلیل آن این است که الگوریتم همواره MT را با توان P^{MT} در سرویس قرار داده و EGP را صرف تغذیه RLD نموده است. در این میان، ۱۰٪ و ۱۹٪ از توان EGP به‌ترتیب



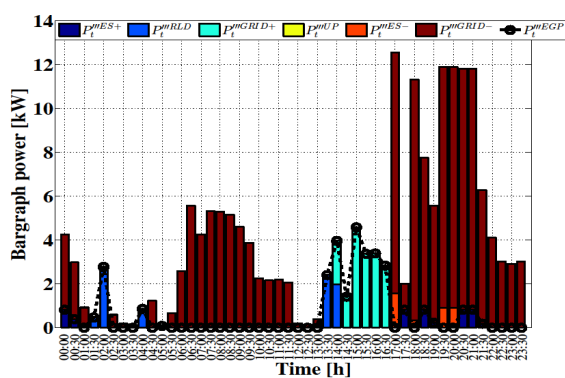
شکل ۱۱-الف: EMS-MINLP



شکل ۱۱-ب: EMS-MICA



شکل ۱۱-ج: EMS-MABC

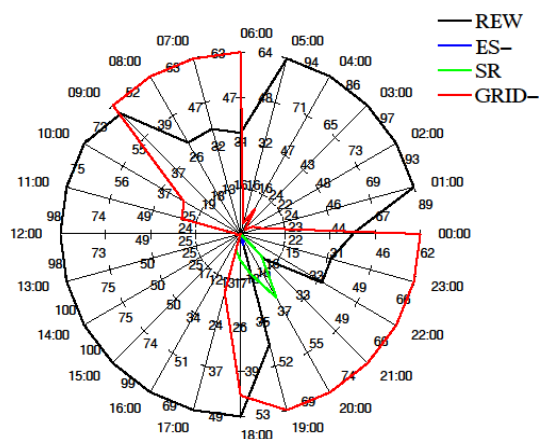


شکل ۱۱-د: EMS-PSO

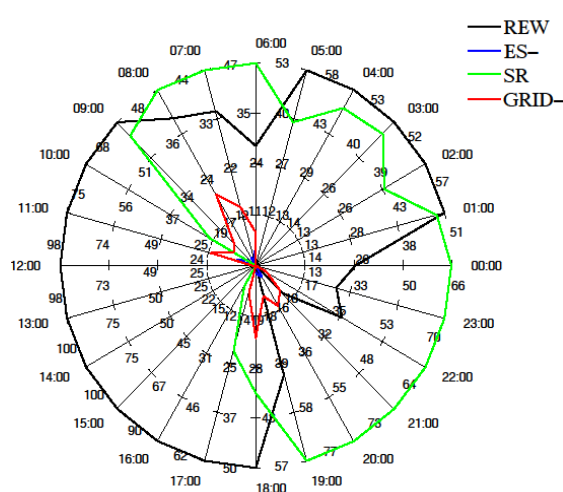
شکل ۱۱: نمودار میله‌ای توان ES، توان خریداری‌شده/فروخته‌شده از/به شبکه سراسری، جریمه توان تأمین‌نشده، RLD و EGP الگوریتم‌ها

MICA در بازه زمانی ۱۸:۰۰-۰۰:۰۰، با توجه به بالا بودن مقدار متوسط MCP در این بازه، با در نظر گرفتن قیمت پیشنهادی پایین‌تر π^{GRID} نسبت به π^{MT} تصمیم گرفته است تا این که سهم بیشتری نسبت به الگوریتم EMS-MINLP از توان مورد نیاز خود را از شبکه سراسری خریداری نماید. همان‌طوری که از شکل ۱۱-ج مشاهده می‌شود، مقدار توان تغذیه‌شده RLD در طول عملکرد روزانه سیستم در الگوریتم EMS-MABC در حدود ۵۵٪ کمتر از الگوریتم EMS-MINLP شده است و این الگوریتم بیشتر سعی در بهبود وضعیت شارژ ES در طول روز نموده است. مقدار توان فروخته‌شده به شبکه سراسری در الگوریتم EMS-MABC نیز در حدود ۴۶٪ نسبت به الگوریتم EMS-MINLP کاهش پیدا نموده است. دلیل آن این است که در این الگوریتم، مقدار توان تولیدی توسط MT در حدود ۴۷٪ کمتر از مقدار آن در الگوریتم بهینه‌سازی EMS-MINLP شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۱-د مشاهده می‌شود، توان EGP در الگوریتم EMS-PSO کاهش زیادی در حدود ۴۲٪ نسبت به الگوریتم EMS-MINLP نموده است. در این میان، در حدود ۷۴٪ از این توان در بازه زمانی ۱۲:۰۰-۱۸:۰۰ که مقدار متوسط λ_t^{MCP} برابر ۰/۴۸ €/kWh است، تولید شده که در حدود ۷۷٪ از این مقدار صرف فروش به شبکه اصلی شده است. در این الگوریتم توان خریداری‌شده از شبکه در حدود ۲۴٪ توان تولیدی توسط MT در حدود ۱۳٪ و توان دشارژ ES در حدود ۵۷٪ نسبت به الگوریتم EMS-MINLP کاهش یافته و در نهایت به میزان ۸/۵٪ نیز بار مصرفی کم شده است.

در شکل ۱۲ سهم هر واحد تولید به‌منظور تأمین توان مورد نیاز بار برای تمامی الگوریتم‌های پیشنهادی نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود، بعد از نصف شب، بخشی از تقاضای بار توسط REW و بخشی دیگر توسط SR تأمین شده است. در هنگام شروع روز، به‌محض افزایش تقاضای بار، با توجه به این که توان تولیدی توسط REW کاهش پیدا نموده است، بنابراین بخشی از توان مورد نیاز نیز از شبکه سراسری تأمین شده است. از ساعت ۰۹:۰۰ با توجه به این که منبع خورشیدی نیز وارد سرویس شده است، بنابراین توان تولیدی به‌وسیله REW افزایش فراوانی پیدا نموده و بخش ناچیزی از توان مورد نیاز توسط SR تأمین شده است. خرید برق از شبکه سراسری تنها در طول بازه‌های زمانی ۰۶:۰۰-۱۰:۰۰ و نیز ۱۸:۰۰-۲۱:۰۰ توسط الگوریتم EMS-MINLP صورت پذیرفته است. در هنگام غروب که توان تولید توسط REW کاهش زیادی نموده است، بنابراین الگوریتم تقاضای بار خود را از طریق SR برآورده نموده است. در الگوریتم EMS-MICA سعی شده است تا حداکثر توان تولیدی به‌وسیله REW استفاده شود. بنابراین در بازه زمانی بعد از نصف شب تا صبح، سهم REW در تأمین تقاضای بار در این الگوریتم به‌مراتب خیلی بیشتر از الگوریتم دیگر است. در این بازه زمانی SR هیچ نقشی در تولید ندارد. تفاوت دیگر بین دو الگوریتم در میزان استفاده از SR و شبکه سراسری برای تأمین توان مورد نیاز بار است.



شکل ۱۲-د: EMS-PSO

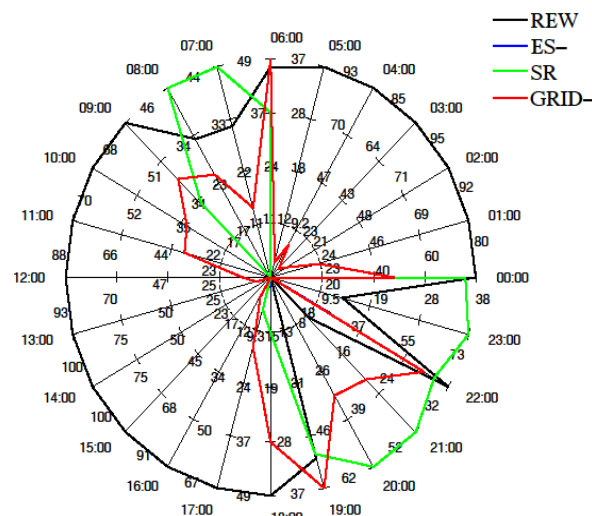


شکل ۱۲-الف: EMS-MINLP

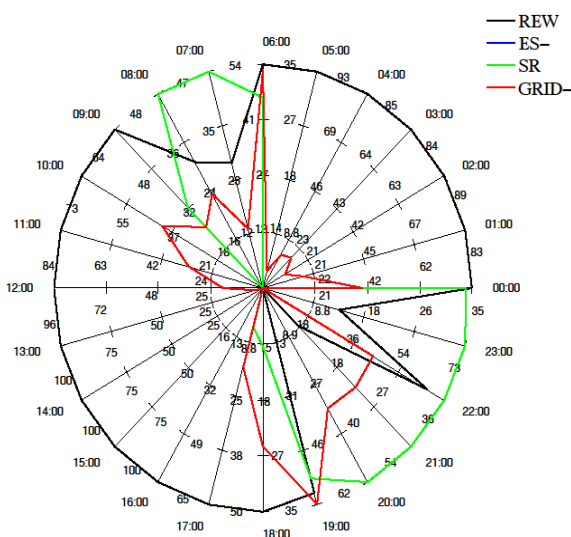
شکل ۱۲: مشارکت روزانه منابع تولید برای تغذیه تقاضای مصرف‌کنندگان
الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده

همان‌طوری که از شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود، میزان توان تأمین‌شده از طریق SR در طول بازه زمانی ۰۰:۰۰-۱۹:۰۰ به‌مراتب کمتر شده است و در عوض سهم شبکه سراسری که دارای قیمت پیشنهادی π_{GRID-} پایین‌تری است، افزایش چشمگیری پیدا نموده است. در نتیجه، مصرف‌کننده MCP به‌مراتب پایین‌تری برای خرید الکتریسته، پرداخت می‌نماید. با مقایسه شکل‌های ۱۲-ب و ۱۲-ج می‌توان دریافت که سهم توان تولیدی توسط REW در الگوریتم EMS-MICA در بیشتر بازه‌های زمانی بهتر از الگوریتم EMS-MABC شده است. سهم SR تقریباً در هر دو الگوریتم مشابه است؛ ولی مقدار توان خریداری‌شده از شبکه سراسری که دارای پایین‌تری آفر قیمت است، در الگوریتم EMS-MICA بیشتر بوده و به‌ویژه در بازه زمانی ۰۰:۰۰-۰۶:۰۰ که صرف تغذیه بارهای RLD و ES شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۲-د مشاهده می‌شود، مقدار سهم REW در توان تولیدی در الگوریتم EMS-PSO نسبت به الگوریتم EMS-MICA به‌مراتب کاهش پیدا نموده است. در این الگوریتم پس از خارج شدن PV توان خریداری‌شده از شبکه سراسری جایگزین شده است.

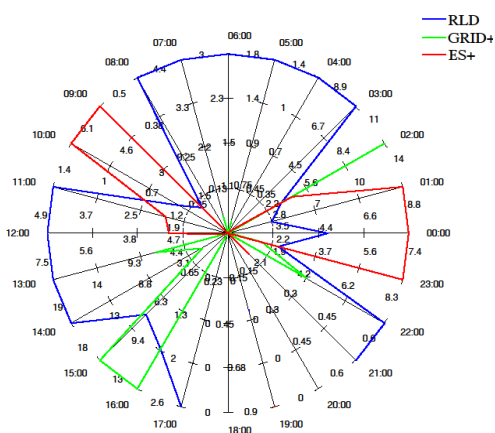
در شکل ۱۳ درصد استفاده از توان مازاد تولیدشده برای تغذیه شبکه سراسری و ES نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، بار RLD در الگوریتم EMS-MINLP عمدتاً در بازه زمانی ۰۰:۰۰-۰۶:۰۰ و بخشی ناچیزی نیز در بازه زمانی ۱۲:۰۰-۱۸:۰۰ تغذیه شده است. این در حالی است که در الگوریتم EMS-MICA این موضوع دقیقاً عکس حالت قبل است. از آنجایی که ES در این الگوریتم به‌مراتب در بازه‌های زمانی کمتری نسبت به الگوریتم EMS-MINLP در حالت شارژ عمل نموده است، بنابراین به همین میزان سهم کمتری از توان تولیدشده برای شارژ ES نسبت به الگوریتم EMS-MINLP به خود اختصاص داده است. همان‌طوری که از شکل ۱۳-د مشاهده می‌شود، توان EGP در الگوریتم EMS-MABC در ساعات اولیه روز و در هنگام ظهر عمدتاً صرف تغذیه



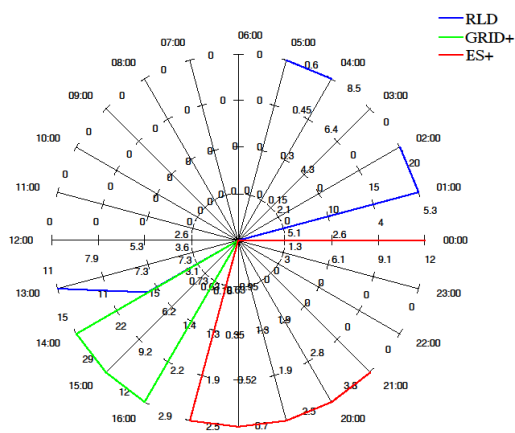
شکل ۱۲-ب: EMS-MICA



شکل ۱۲-ج: EMS-MABC



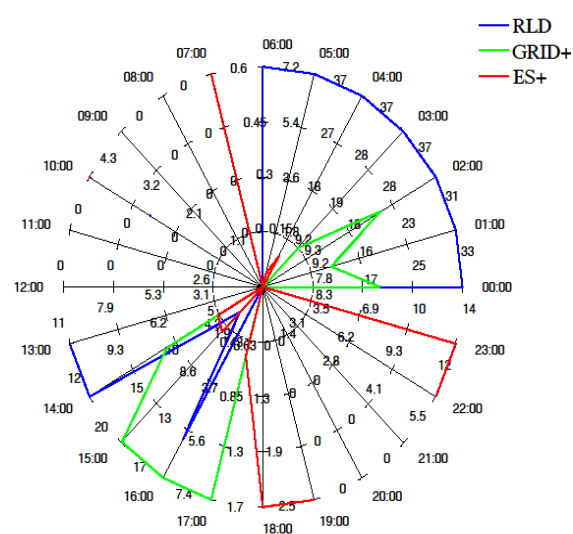
شکل ۱۳-ج: EMS-MABC



شکل ۱۳-د: EMS-PSO

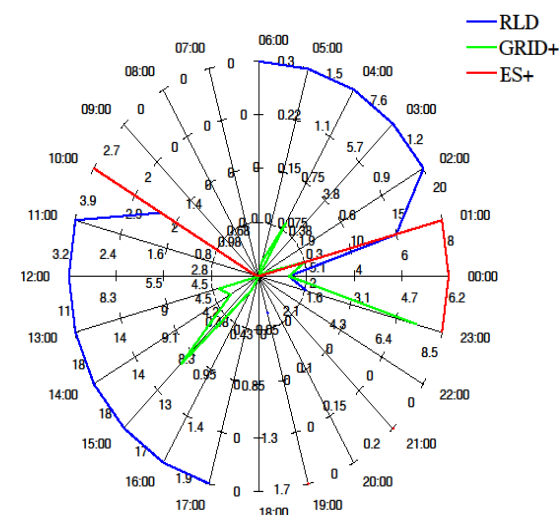
شکل ۱۳: مشارکت روزانه منابع مصرف‌کننده در الگوریتم‌های پیشنهادشده

RLD شده است و ES غالباً پس از به سرویس وارد شدن PV و نیز در هنگام نیمه‌شب (در زمان پایین بودن تقاضا) شارژ شده است. فروش به شبکه نیز در طول بازه زمانی ۱۲:۰۰ - ۱۸:۰۰ صورت پذیرفته است. با توجه به پایین بودن آفر فروش به شبکه سراسری نسبت به تغذیه RLD و شارژ ES و نیز بالا بودن λ_t^{MCP} نسبت به بازهای زمانی قبل، درآمد کمتری نصیب تولیدکننده شده است. همان‌طوری که از شکل ۱۳-د مشاهده می‌شود، سهم RLD بسیار پایین بوده و با توجه به بالاتر بودن آفر قیمت ES نسبت به RLD و فروش به شبکه، الگوریتم EMS-PSO سعی در اختصاص توان EGP برای شارژ ES نموده است.



شکل ۱۳-الف: EMS-MINLP

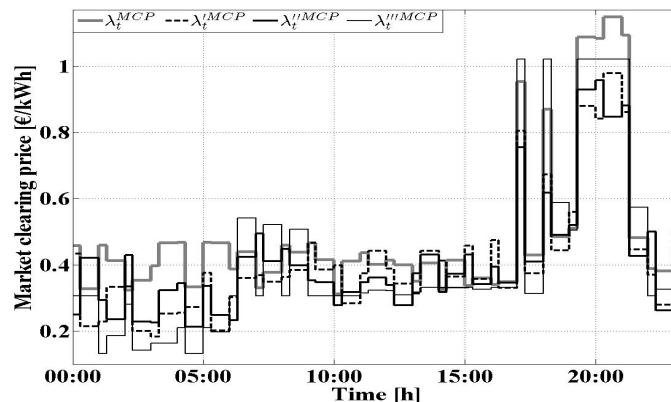
شکل ۱۴ مقدار MCP برای هر دو الگوریتم در هر بازه زمانی را نشان می‌دهد. در طول عملکرد روزانه سیستم در ۷۱٪ مواقع مقدار λ_t^{MCP} بزرگ‌تر از λ_t^{MCP} شده است. اختلاف فاحشی بین این دو کمیت در بازه‌های زمانی ۲ و ۳ وجود نداشته و عمدتاً اختلاف در بازه‌های زمانی ۱ و ۴ نمایان شده است. حداقل و حداکثر مقدار λ_t^{MCP} به‌ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۱/۰۹ بوده که در ساعت ۱۰:۳۰ (حداقل مقدار) همچنین ۲۰:۰۰ و ۲۱:۰۰ (حداکثر مقدار) حاصل شده است. در زمان حصول حداقل MCP در الگوریتم EMS-MINLP، هیچ EGP تولید نشده و بخشی از توان از شبکه خریداری شده است. حداکثر مقدار λ_t^{MCP} در ساعت ۰۳:۰۰ به دست آمده که در آن کل توان مصرفی تنها توسط توربین بادی تأمین شده است. ولی حداکثر مقدار λ_t^{MCP} در زمان وقوع سناریوی ۳ (۲۰:۳۰) به دست آمده و الگوریتم EMS-MICA سعی نموده است با توجه به اولویت مندرج در جدول ۳، MT را بتوان کمتری وارد سرویس نماید و در عوض توان بیشتری را از شبکه سراسری خریداری نماید. در بازه زمانی ۰۰:۰۰ - ۰۶:۰۰ مقدار P_t^{TCP} بزرگ‌تر از P_t^{MCP} است. با توجه به این‌که در این بازه زمانی



شکل ۱۳-ب: EMS-MICA

در این راستا، الگوریتم EMS-MABC در حدود ۱/۵٪ بار کمتری نسبت به الگوریتم EMS-MINLP تغذیه نموده است. مقدار λ_t^{MCP} در حدود ۷۱٪ از بازه‌های زمانی کوچک‌تر از مقدار λ_t^{MCP} است. تحت این شرایط، در حدود ۱۶/۷٪ از مواقع نیز مقدار P_t^{TCP} بزرگ‌تر از مقدار P_t^{TCP} به دست آمده است. این بدین معنی است که مصرف‌کننده بیشتری با MCP پایین‌تری تغذیه شده است.

مقدار λ_t^{MCP} در ۸۵٪ مواقع بزرگ‌تر از مقدار λ_t^{MCP} است، لذا الگوریتم EMS-MINLP بار بیشتری با هزینه بالاتری تغذیه نموده است. در طول بازه زمانی ۱۸:۰۰ - ۲۴:۰۰ که مقدار MCP در تمامی الگوریتم‌ها ماکزیمم مقدار خود را در طول روز دارا است، لذا بهتر است که مصرف‌کنندگان کمتری توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی تغذیه شوند.



شکل ۱۴: MCP در هر بازه زمانی در طول عملکرد روزانه سیستم

جدول ۴: مقایسه کیفیت راه‌حل الگوریتم‌های ارائه‌شده برای سیستم تحت

مطالعه

نام الگوریتم	مینیمم هزینه	متوسط هزینه	انحراف معیار
EMS-MICA	۱۸/۸۹	۱۸/۹۳	۰/۰۲۹۶
EMS-MABC	۲۲/۸۳	۲۳/۲۶	۰/۲۲۶۰
EMS-PSO	۲۵/۱۲	۲۵/۲۴	۰/۰۷۷۳

جدول ۳: مقدار متوسط MCP در هر دوره ۶ ساعته عملکرد سیستم

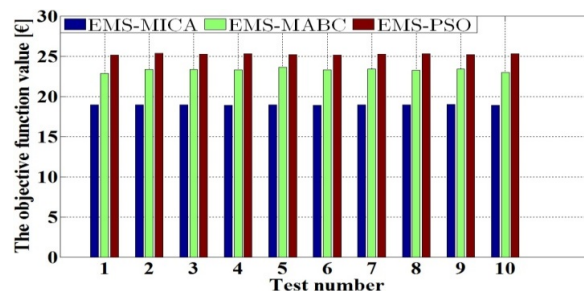
MCP	λ_t^{MCP}	λ_t^{MCP}	λ_t^{MCP}	λ_t^{MCP}
۰۶:۰۰ - ۱۲:۰۰	۰/۴۱	۰/۲۹	۰/۳۰	
۱۲:۰۰ - ۱۸:۰۰	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۳۹	
۱۸:۰۰ - ۲۴:۰۰	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۴۸	
۰۰:۰۰ - ۱۸:۰۰	۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۶۶

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌منظور پیاده‌سازی EMS در ریزشبه متصل به شبکه، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری، بنام الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی پیشنهاد و پیاده‌سازی شده است. جهت سازگار نمودن این الگوریتم با مسئله مورد نظر، در الگوریتم پایه، تغییراتی از قبیل اصلاح تولید جمعیت اولیه انجام شده است. الگوریتم پیشنهادی که بر پایه مکانیزم جستجوی محلی است، با ایجاد جمعیت اولیه‌ای با توجه به متغیرهای مستقل و وابسته و با در نظر گرفتن قیود فنی مطرح‌شده در این مسئله، نسبت به کنترل ریزشبه‌ها اقدام می‌نماید. الگوریتم مبتنی بر جمعیت و بر پایه تکامل سیاسی و اجتماعی جوامع بشری بوده و دارای مزایای متعددی همچون سادگی، دقت و صرفه‌جویی در زمان است.

هدف از ارائه این الگوریتم تولید بهینه واحدهای تولید موجود در ریزشبه، مدیریت سمت تقاضا و تبادل توان با شبکه سراسری است. الگوریتم پیشنهادی با ایجاد جمعیت اولیه‌ای با توجه به متغیرهای مستقل و وابسته و با در نظر گرفتن قیود فنی مطرح‌شده در این مسئله، برای کنترل ریزشبه متصل به شبکه سازگار شده است.

کارایی الگوریتم‌های مورد مطالعه برای ده آزمایش مستقل در شکل ۱۵ نشان داده شده است. به‌منظور نشان دادن کیفیت حل ارائه‌شده توسط الگوریتم EMS-MICA نسبت به الگوریتم‌های دیگر برای سیستم تحت‌مطالعه مقادیر متوسط هزینه، مینیمم هزینه و انحراف استاندارد در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طوری که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، الگوریتم EMS-MICA دارای مینیمم مقدار تابع هزینه در بین الگوریتم ارائه‌شده دارا است. علاوه بر این، انحراف معیار در الگوریتم EMS-MICA به‌مراتب پایین‌تر از الگوریتم‌های دیگر است.



شکل ۱۵: مقایسه مقدار تابع هزینه به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های ارائه‌شده در ده آزمایش

- signaled particle swarm optimization,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 466 – 476, 2012.
- [5] M. Mohammadi, S. Hosseini, and G. Gharehpetian, “Optimization of hybrid solar energy sources/wind turbine systems integrated to utility grids as microgrid (MG) under pool/bilateral/hybrid electricity market using PSO,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 112–125, 2012.
- [6] F.A. Mohamed, and H.N. Koivo, “System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 398–407, 2010.
- [7] E. Sortomme, and M.A. El-Sharkawi, “Optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage,” *IEEE/PES Power Syst Conf*, pp. 1-5, 2009.
- [8] Y. Zoka, A. Sugimoto, N. Yorino, K. Kawahara, and J. Kubokawa, “An economic evaluation for an autonomous independent network of distributed energy resources” *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 7, pp. 831-838, 2007.
- [9] S. Ali Pourmousavi, and M. Hashem Nehrir, “Real-time central demand response for primary frequency regulation in microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1988- 96, 2012.
- [10] T. Niknam, F. Golestaneh, and A. Malekpour, “Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind-photovoltaic-fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm,” *Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 427 – 437, 2012.
- [11] T. Niknam, H. Meymand, and H. Mojarad, “An efficient algorithm for multi-objective optimal operation management of distribution network considering fuel cell power plants,” *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 119 – 132, 2011.
- [12] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, and G. Hu, “Smart energy management system for optimal microgrid economic operation,” *IET Renew Power Gener.*, vol. 5, no. 3, pp. 258-267, 2011.
- [13] M. Marzband, *Experimental Validation of Optimal Real-time Energy Management System for Microgrids*, PhD Thesis, Departament d’Enginyeria Elctrica, EU d’Enginyeria Tecnica Industrial de Barcelona, Universitat Politecnica de Catalunya, 2013.
- [14] M. Marzband, M. Ghadimi, M. Sumper, J.L. Domínguez-García, “Experimental validation of a real-time energy—management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode,” *Applied Energy*, vol. 128, pp. 164-78, 2014.
- [15] M. Marzband, F. Azarinejadian, M. Savaghebi, and J.M. Guerrero, “An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with Markov chain,” *IEEE Systems Journal*, under publication, 2015.

به‌منظور ارزیابی عملکرد این الگوریتم، به دست آوردن شرایط بهره‌برداری بهینه و نشان دادن قابلیت پاسخ‌گویی سریع به وقوع هر رویدادی، سناریوهای مختلفی بر اساس عدم تطابق عرضه و تقاضا اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از آن با الگوریتم‌های EMS-MINLP، EMS-MABC و EMS-PSO مقایسه شده است. نهایتاً، این سناریوها بر روی ریزشکه مرکز تحقیقات انرژی کاتولونیا به‌صورت عملی نیز تست شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میزان توان تأمین‌شده از طریق منابع SR کمتر شده و در عوض سهم شبکه سراسری که دارای قیمت پیشنهادی پایین‌تری است، افزایش یافته است، در نتیجه، مصرف‌کننده MCP به‌مراتب پایین‌تری (در حدود ۱۷٪، ۱۰٪ و ۲۲٪ به‌ترتیب نسبت به الگوریتم‌های EMS-MINLP، EMS-MABC و EMS-PSO) برای خرید توان، پرداخت می‌نماید و باعث افزایش سود برای صاحب ریزشکه خواهد شد. همچنین، کارایی الگوریتم پیشنهادشده برای تأمین تقاضای بار، رفتار پایدار تحت شرایط مختلف و بهبود در عملکرد منابع تغذیه موجود نسبت به الگوریتم‌های EMS-MINLP، EMS-MABC و EMS-PSO مشاهده می‌شود. نتایج حاصله نشان‌دهنده این است که الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادشده می‌تواند راه‌حلهایی مطمئن و با قطعیت بالا در یک زمان شبیه‌سازی قابل قبول برای مسائل مربوط به سیستم مدیریت انرژی، فراهم نماید. نتایج حاصله به‌وضوح نشان‌دهنده قابلیت استفاده مؤثر ساختار پیشنهادشده در سیستم‌های مبتنی بر ریزشکه‌های مستقل و متصل به شبکه را بیان می‌نماید.

مراجع

- [1] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-Álvarez, J.L. Domínguez-García, and B. Tomoiagă, “Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets,” *Applied Energy*, vol. 106, pp. 365-76, 2013.
- [2] M. Marzband, A. Sumper, J.L. Domínguez-García, and R. Gumara-Ferret, “Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP,” *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 314-22, 2013.
- [3] E.D. Mehleri, H. Sarimveis, N.C. Markatos, and L.G. Papageorgiou, “Optimal design and operation of distributed energy systems,” *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 331–342, 2013.
- [4] J. Soares, M. Silva, T. Sousa, Z. Vale, and H. Morais, “Distributed energy resource short-term scheduling using

زیرنویس‌ها

⁹ Non-responsive load demand

¹⁰ Multi-period artificial bee colony

¹¹ Particle swarm optimization

¹² Responsive load demand

¹³ Total generated power

¹⁴ Total consumed power

¹⁵ State-of-charge

¹⁶ Local energy market

¹⁷ Microturbine

¹⁸ Spinning reserve

¹⁹ Excess generated power

¹ Energy management system

² Energy storage systems

³ Market clearing price

⁴ Mixed integer linear programming

⁵ Signaled particle swarm optimization

⁶ Renewable resource

⁷ Multi-dimension imperialist competition algorithm

⁸ Non-dispatchable unit