Journal of Systems Smartening and Data Processing
Vol. 2 - No. 2 - Summer 2024

Optimal Planning and Energy Management of Distributed Generation Sources and Battery Storage in Smart Microgrids for Operating Costs Reduction by Cuckoo Search Algorithm

Esmail Khalilzadeh[1], *Assistant Professor*, Ahmad Ghalibafan[2], *M.Sc,* Aida Keshavarz[3], *M.Sc*

[1] Department of Electrical and Computer Engineering, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir

[2] Department of Electrical and Computer Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran
a.ghalibafan63@gmail.com

[3] Department of Medical Sciences, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
aidakeshavarz@iau.ac.ir

Received: 25 May 2024 **Revised:** 06 August 2024 **Accepted:** 08 August 2024

Abstract:

The optimal management distributed generation resources and storage devices in power microgrids is done with various goals such as reducing operating costs, reducing environmental pollution, improving the quality of network power, and also improving reliability indicators. In order to achieve each of the mentioned goals, The operator of the power system must know precisely all the components of the network, such as loads and sources of power generation, as well as the topology of the network. Various innovative and ultra-innovative methods have been proposed to provide energy management program, and in recent years, the use of intelligent algorithms has been used more than other methods. High accuracy and no need to estimate the exact initial point have made smart algorithms suitable for solving the problem of microgrid energy management. In this research, the cuckoo search algorithm is used for the energy management of renewable photovoltaic and wind resources along with non-renewable resources of fuel cell and microturbine along with battery storage in a standard microgrid. The performance of the proposed method was evaluated for different load conditions and solar radiation intensity in different scenarios. The simulation results were carried out in four different operating conditions with the aim of reducing the cost and were compared with the results of genetic algorithms, particle swarm optimization, bee, modified bat, and lightning search. The proposed algorithm of this research That is, the cuckoo search algorithm has performed better in all operating conditions in reducing the objective function.

Keywords: Battery storage, Cost reduction, Cuckoo search algorithm, Energy management, Smart microgrid

Corresponding Author: Dr. Esmail Khalilzadeh
Corresponding Author Address: Department of Electrical and Computer Engineering- Daneshgah Blvd -Islamic Azad University- Arsanjan Branch, Iran

برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه انرژی منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز باتری در ریزشبکه هوشمند با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری توسط الگوریتم جستجوی فاخته

اسماعیل خلیل زاده[۱]، استادیار، احمد قالیبافان[۲]، کارشناسی ارشد، آیدا کشاورز[۳]، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران
esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
a.ghalibafan63@gmail.com
۳- دانشکده علوم پزشکی - واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران
aidakeshavarz@iau.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵ **تاریخ بازنگری مقاله:** ۱۴۰۳/۰۵/۱۶ **تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

چکیده: مدیریت بهینه منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها در ریزشبکه‌های قدرت با اهداف مختلفی همچون کاهش هزینه بهره‌برداری، کاهش آلودگی محیط زیست، بهبود کیفیت توان شبکه و همچنین اصلاح شاخص‌های قابلیت اطمینان انجام می-پذیرد. برای آنکه هر یک از اهداف اشاره شده حاصل گردد، باید بهره‌بردار سیستم قدرت به صورت دقیقی تمامی اجزای شبکه همچون بارها و منابع تولید توان و همچنین توپولوژی شبکه را بشناسد. روش‌های گوناگون ابتکاری و فرا ابتکاری برای ارائه برنامه مدیریت انرژی پیشنهاد شده است که در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. دقت بالا و عدم نیاز به تخمین نقطه اولیه دقیق، سبب شده است که الگوریتم‌های هوشمند برای حل مسئله مدیریت انرژی ریزشبکه مناسب باشند. در این مقاله، از الگوریتم جستجوی فاخته (CSA) برای مدیریت انرژی منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی به همراه منابع تجدیدناپذیر پیل سوختی و میکروتوربین در کنار ذخیره‌ساز باتری در یک ریزشبکه استاندارد استفاده شده است. عملکرد روش پیشنهادی به ازای شرایط مختلف بار و شدت تابش خورشید در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در چهار شرایط بهره‌برداری مختلف و با هدف کاهش هزینه انجام پذیرفت و با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSA)، زنبور عسل (BA)، اصلاح شده خفاش (MBA) و جستجوی صاعقه (LSA) مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد که الگوریتم جستجوی فاخته عملکرد مناسبی در تمامی شرایط بهره‌برداری در کاهش تابع هدف داشته است.

کلمات کلیدی: الگوریتم جستجوی فاخته، ذخیره‌ساز باتری، ریزشبکه هوشمند، کاهش هزینه، مدیریت انرژی

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل خلیل زاده
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ارسنجان- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارسنجان- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های ناشی از کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی و از سویی مشکلات زیست محیطی ناشی از احتراق این سوخت‌ها، بشر را به فکر جایگزینی سوخت‌های فسیلی برای تولید برق انداخته است. بدین روی، استفاده از منابع تولید پراکنده‌ی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر[1]، زمینه‌ی تحقیق و پژوهش بسیاری از محققین صنعت برق شد [۱]. در سیستم‌های انرژی جدید مبتنی بر این تحقیقات، به دلیل نزدیک‌تر شدن منابع انرژی به مصرف‌کننده، تلفات توان کاهش قابل‌توجهی یافته است. از سوی دیگر، استفاده از منابع تولید پراکنده‌ی[2] (DG) انرژی الکتریکی، سبب افزایش شاخص-های قابلیت اطمینان[3] شبکه قدرت و کاهش ضررهای مالی ناشی از قطع ناگهانی برق می‌شود. برای افزایش کارکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید پراکنده و همچنین پاسخ به نیاز قابلیت اطمینان بالا و کیفیت توان مناسب مشترکین، مفهومی تحت عنوان ریزشبکه[4] ارائه شد [۲]. در [۳]، به مدیریت انرژی[5] بر مبنای کنترل هوشمند اشاره دارد. این روش جهت افزایش راندمان انرژی در ریزشبکه بکار رفته و خودروهای برقی[6] (EV) دارای باتری برای ذخیره توان جهت جبران‌سازی کمبودهای منابع انرژی پراکنده[7] (DER) استفاده شده است. در این روش تولید منابع انرژی پراکنده برنامه‌ریزی شده و خودروهای برقی به عنوان ذخیره جهت حفظ تعادل برنامه‌ریزی در زمان‌های تغییر توان منابع انرژی پراکنده در نظر گرفته شده است. در بررسی یک ریزشبکه می‌توان دیدگاه‌های فنی، اقتصادی و همچنین تاثیرات مثبت آن بر روی محیط زیست را در نظر گرفت. بهره‌بردار ریزشبکه، وظیفه بهره‌برداری ایمن از شبکه برق را بر عهده دارد و بایستی الگویی را به منظور برنامه‌ریزی ارائه کند که منافع تمامی اجزای ریزشبکه در آن در نظر گرفته شده و برنامه‌ریزی صحیح و دقیقی برای بهره‌برداری از تمامی منابع تولید پراکنده در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز ارائه نماید تا هزینه‌های بهره‌برداری حداقل شود. راه‌حل‌های متعددی برای حل مسئله-ی مدیریت بهره‌برداری از ریزشبکه ارائه شده است که بیشتر روش‌های بحث شده در تحقیقات انجام شده در دهه اخیر حداقل در یکی از گروه‌های روش‌های بهینه‌سازی سنتی و یا روش‌های بهینه‌سازی هوشمند قرار گرفته است [۴]. برای دستیابی به این هدف بایستی بهره‌بردار منابع تولید توان، شناخت کامل نسبت به تمامی اجزای سیستم همچون بارها و منابع تولید توان داشته باشد. در سال‌های اخیر، روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ی جدید که مبتنی بر هوش مصنوعی می‌باشد، برای مدیریت بهینه ریزشبکه استفاده شده است. در [۵]، الگوریتم ازدحام سالپ[8] برای مدیریت بهینه انرژی منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه با منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی ارائه شده است. در این مرجع علاوه بر مدیریت انرژی منابع، مدیریت بار و تبادلات انرژی با شبکه اصلی را آنالیز نموده تا هزینه بهره‌برداری و آلودگی را حداقل کند. در [۶]، استراتژی مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک[9] (GA) در یک ریزشبکه پیشنهاد شده که حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه را بررسی کرده است. در این مرجع زمان محاسبه و تامین بهینه تابع هدف برای الگوریتم ژنتیک و چند الگوریتم بهینه‌سازی دیگر مقایسه شده است و نتایج نشان داده که الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است. در مرجع [۷]، تابع هدفی بر پایه هزینه‌های تولید، هزینه آلودگی و هزینه بهره‌برداری کمینه شده است. در این ریزشبکه، استراتژی بر اساس تامین بار توسط منابع داخلی بوده و باتری هم در آن مدل شده است. همچنین در این مرجع با در نظر گرفتن تابعی احتمالی برای منابع خورشیدی و بادی، مدیریت انرژی ریزشبکه انجام گرفته است. برای انجام بهینه‌سازی نیز از الگوریتم جستجوی فاخته[10] (CSA) استفاده شده است. در [۸]، توابع هدفی بر پایه هزینه‌های تولید، هزینه آلودگی و هزینه بهره‌برداری کمینه شده است. در این ریزشبکه، استراتژی بر اساس تامین بار توسط منابع داخلی بوده و ذخیره‌سازهای انرژی

[1] Renewable energy
[2] Distributed generation
[3] Reliability
[4] Microgrid
[5] Energy management
[6] Electrical vehicle
[7] Distributed energy resources
[8] Salp swarm algorithm
[9] Genetic algorithm
[10] Cuckoo search algorithm

الکتریکی هم در آن مدل شده است. همچنین در این مرجع با در نظر گرفتن تابعی احتمالی برای تولیدات خورشیدی و بادی، مدیریت انرژی ریزشبکه انجام گرفته است.

به دلیل ماهیت و مشخصات ذاتی منابع تجدیدپذیر، انرژی تولیدی توسط آنها به طور دائم در دسترس نبوده و با تغییر ساعت-های روز، ماه و حتی فصول تغییر می‌کند. لذا این امر، تأثیر بسیاری بر ریزشبکه در شرایط عملکرد متصل به شبکه اصلی داشته و از سویی دیگر سبب نیاز به ذخیره انرژی جهت پاسخ‌گویی به بار در شرایط عملکرد مستقل از شبکه اصلی می‌شود [۹]. با استفاده از سیستم‌های ترکیبی و به دلیل مکمل بودن مشخصه‌های انرژی منابع مختلف با یکدیگر، می‌توان این مشکل را حل نمود [۱۰]. بهینه‌سازی در این مطالعه جهت تغذیه اقتصادی منابع انرژی پراکنده و کاهش هزینه تولید برق در بازه یک ساعته برنامه‌ریزی روز بعد و زمان استفاده انجام شده است. در این مرجع سلول خورشیدی[1] و توربین بادی[2] (WT) به عنوان منابع غیر قابل توزیع با توجه به شرایط آب و هوایی توانی را که بتوانند تولید می‌کنند و باتری، پیل سوختی[3] (FC) و میکروتوربین[4] (MT) به عنوان منابع قابل توزیع برنامه‌ریزی شده‌اند. برنامه پاسخگویی بار[5] (DR) با استفاده از شبکه عصبی[6] کمی شده است و اطلاعات مورد نیاز بارهای پاسخگو را در دوره‌های زمانی ارائه می‌دهد. تابع هدف این مرجع کاهش هزینه است و هزینه شامل هزینه سوخت، نگهداری، بهره‌برداری و هزینه‌های شروع به کار منابع و همچنین هزینه باتری هستند. مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها با اهداف مختلفی همچون کاهش هزینه، کاهش آلایندگی، بهبود کیفیت توان شبکه، بهبود قابلیت اطمینان، شرکت در برنامه پاسخگویی بار و غیره انجام شده است [۱۱]. یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها بحث برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و کنترل این شبکه‌ها است. شبکه‌های توزیع با وجود منابعی چون ریزشبکه‌های ولتاژ پایین، منابع تولید پراکنده با اندازه بزرگتر و مجموعه‌ای از بارهای قابل قطع و غیر قابل قطع با مفهومی همچون ریزشبکه چندگانه تعریف می‌شوند [۱۲]. در این مرجع مدیریت انرژی با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و جایگزینی آن مدل شده است. در سیستم مدیریت انرژی هوشمند مشارکت پیشنهادات تولید، پیشنهادات ذخیره و سود معاملات انرژی بررسی شده و هزینه بهره‌برداری ریزشبکه حداقل شده و قیود منابع تولید پراکنده نیز ارضا شده است. در [۱۳]، با در نظر گرفتن هر ریزشبکه به عنوان یک عامل در ریزشبکه چندگانه جدا از شبکه، برنامه‌ای ۲۴ ساعته، ابتدا با هدف کمینه کردن هزینه تولید با احتساب هزینه روشن و خاموش کردن واحدها و با لحاظ کردن تامین بار داخلی اجرا شده است. سپس مقادیر مناسب برای پیشنهاد در بازار ریزشبکه چندگانه استخراج شده است. در [۱۴]، علاوه بر بیشینه‌سازی درآمد منابع تولید از فروش انرژی و مطالعات اقتصادی، بهینه‌سازی با اهداف کاهش آلودگی و در راستای اهداف زیست محیطی در ریزشبکه اجرا شده است. در [۱۵]، تابع هدفی بر پایه هزینه‌های تولید، هزینه آلودگی و هزینه بهره‌برداری و تعمیرات، کمینه شده است. در این ریزشبکه، استراتژی بر اساس تامین بار توسط منابع داخلی است و باتری هم در آن مدل شده است. در این مرجع با استفاده از یکسری شاخص‌های احتمالی و شاخص‌های موفقیت مدیریت انرژی در تابع عملکرد، هزینه سیستم ریزشبکه را کاهش داده است. در مدل بهینه‌سازی متغیرهای چند حالته برای تولید فضای جستجوی تولید، منابع انرژی پراکنده و تولید/مصرف استفاده شده‌اند. انتخاب تعدادی از حالت‌ها با توجه به زمان محاسبات و بهبود تابع هدف صورت گرفته و در نهایت راه‌حل بهینه بدست آمده است. در [۱۶]، به مرور انواع روش‌های مدل‌سازی و مدیریت انرژی در ریزشبکه پرداخته شده است. در این مرجع تحقیقات انجام شده در زمینه این نوع از ریزشبکه‌ها مورد بازبینی قرار گرفته است. در [۱۷]، برای داشتن یک ریزشبکه با قابلیت اطمینان بالا از یک مدل پیش‌بینانه استفاده کرده است. از دیگر اهداف این مرجع، کاهش هزینه تولید توان در یک ریزشبکه است. در [۱۸]، با در نظر گرفتن هر ریزشبکه به عنوان یک عامل در ریزشبکه چندگانه جدا از شبکه، برنامه‌ای ۲۴ ساعته، ابتدا با هدف کمینه کردن هزینه تولید با احتساب هزینه روشن و خاموش کردن واحدها و با لحاظ کردن تامین بار داخلی اجرا شده است. سپس مقادیر مناسب برای پیشنهاد در بازار ریزشبکه چندگانه

[1] Photovoltaic
[2] Wind Turbine
[3] Fuel cell
[4] Micro Turbine
[5] Demand response
[6] Neural network

استخراج شده است. در این مرجع، با الگوریتم جستجوی ممنوعه[1] و با استفاده از یک سری شاخص‌های احتمالی و شاخص‌های موفقیت مدیریت انرژی در تابع عملکرد، هزینه سیستم ریزشبکه را کاهش داده است. در مدل بهینه‌سازی متغیرهای چند حالته برای ایجاد فضای جستجوی تولید، منابع انرژی تجدیدپذیر و تولید/مصرف استفاده شده‌اند. انتخاب تعدادی از حالت‌ها با توجه به زمان محاسبات و بهبود تابع هدف صورت گرفته و در نهایت راه‌حل بهینه بدست آمده است. در [۱۹]، یک الگوریتم چند منظوره جهت سیستم مدیریت انرژی برای حداقل کردن هزینه بهره‌برداری و آلودگی ارائه داده که میزان شارژ و دشارژ باتری خودروها را با منطق فازی[2] تعیین نموده است. الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی میزان تولید منابع انرژی پراکنده و مقدار بار را تخمین زده و از شبکه عصبی برای برنامه‌ریزی سیستم استفاده کرده است. نتایج، نشان دهنده کارایی این روش است اما نیاز به خبره جهت تعیین توابع عضویت دارد.

در [۲۰] برخی از اهداف به‌کارگرفته شده برای بهینه‌سازی ساختار شبکه ارائه شده است. شرکت‌های برق، انرژی را از طریق فیدرها تامین می‌کنند که منجر به افزایش تلفات شبکه توزیع برق و کاهش ولتاژ شین می‌شود. با توجه به پیکربندی مجدد[3] فیدر، بار را می‌توان از قسمت با بار زیاد به بخش کم بار سیستم توزیع برق منتقل کرد. در مواقع اضطراری مانند وقوع خطا، می‌توان از پیکربندی مجدد فیدر برای بازیابی بار جدا از کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ استفاده کرد. در سال‌های اخیر، با توجه به ارتباط نزدیک آنها با هزینه‌های پیاده‌سازی و زمینه توسعه منابع برق، علاقه قابل توجهی به اجرای ترکیبی راه‌حل‌های تخصیص تولید پراکنده و پیکربندی مجدد شبکه وجود داشته است. مروری جامع از مقالات اخیر در مورد پیکربندی مجدد شبکه در [۲۱] ارائه شده است. [۲۲]، برای کاهش هزینه انرژی تحویلی، هزینه تلفات انرژی و انحراف ولتاژ، یک پیکربندی مجدد شبکه چند هدفه پویا همراه با مکان‌یابی و اندازه‌گیری DGهای قابل برنامه‌ریزی و غیرقابل برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد. در مرجع [۲۳]، اثر پیکربندی مجدد در دو محیط با اندازه هارمونیک متوسط و بزرگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر این اثر تزریق هارمونیک تولیدی توسط منابع تولید پراکنده DGها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در اینجا یک روش انعطاف‌پذیر جدید برای حل مسائل چندهدفه، به ویژه در مسئله بازآرایی شبکه توزیع معرفی شده است. هدف اصلی [۲۴]، ارائه راه‌حل‌های نوآورانه برای حل بهینه پیکربندی مجدد شبکه، نصب DG و مسائل مربوط به نصب خازن در شبکه‌های توزیع برق برای کاهش تلفات برق، بهبود پروفیل‌های ولتاژ و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سیستم است. برای پرداختن به این روش‌های کمینه‌سازی تلفات، روش‌های اکتشافی قابل‌توجهی در دسترس هستند. انتخاب یک الگوریتم مناسب از بین تمام رویکردهای ارائه شده برای پشتیبانی از همه شرایط به دلیل اهداف مختلف، بسیار دشوار است. در حالی که الگوریتم‌های موجود طیف گسترده‌ای از تکنیک‌ها را ارائه می‌دهند، برخی از آنها در رسیدن به نقطه بهینه جهانی شکست می‌خورند. در این کار، روش الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ اصلاح‌شده[4] (MWOA) برای کشف بهترین راه‌حل برای مشکلات پیکربندی مجدد، نصب DG و نصب خازن استفاده شده است.

مرجع [۲۵] نشان می‌دهد که زمان‌بندی بهینه منابع انرژی در این سیستم به دلیل عدم قطعیت[5] در پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر متناوب، قیمت‌گذاری برق و تقاضای بار دشوار است. در این مرجع به منظور بهبود بهره‌برداری اقتصادی ریزشبکه، یک استراتژی جدید مدیریت انرژی روز آینده برای تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی پیشنهاد شده است. در اینجا از یک برنامه پاسخگویی تقاضا مبتنی بر تشویق استفاده شده است.

عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر با استفاده از روش تقریب هونگ[6] پیش‌بینی شده است. رویکرد پیشنهادی از یک الگوریتم ژنتیک فرااِبتکاری برای حل مسئله محدب محدود[7] در تعیین جابجایی بار بهینه استفاده می‌کند. برای ارزیابی استراتژی پیشنهادی دو مطالعه موردی در وضعیت‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

[1] Tabu search
[2] Fuzzy logic
[3] Reconfiguration
[4] Modified whale optimization algorithm
[5] Uncertainty
[6] Hong's approximation method
[7] Bounded convex problem

هدف [۲۶]، برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا است. این مطالعه تلاش می‌کند تا یک سیستم مدیریت انرژی چندهدفه برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه‌ها در مدت زمان کوتاه ارائه دهد. به طوری‌که در دسترس بودن منابع انرژی تجدیدپذیر طبیعی مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی را در بر گیرد. تمام بخش‌های بازار، از جمله خانوارها، شرکت‌ها و صنایع، می‌توانند در فعالیت‌های پاسخگویی به تقاضا شرکت کنند. برای کمک به مدیریت ریزشبکه مرکزی در بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه و همچنین رسیدگی به عدم قطعیت‌های تولید انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف‌کنندگان ممکن است نرخ تقاضای وقفه‌پذیر یا قابل کاهش خود را اعلام کنند یا از بین نرخ‌های موجود انتخاب کنند. در اینجا مصرف کنندگان می‌توانند از پرداخت‌های انگیزشی که شکل بسته‌های قیمتی و حجم پاسخ به تقاضا از پیش تعیین‌شده است، استفاده کنند. شبکه تحت مطالعه شامل چندین منبع انرژی از جمله توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی و بارهای قابل قطع است. برای حل مسئله پیشنهادی غیرخطی و پیچیده موردنظر از یک الگوریتم جستجو به نام الگوریتم بهینه‌سازی تغذیه پرتوی مانتا[۱] (MRFO) استفاده شده است. هدف اصلی مرجع [۲۷] به دست آوردن یک زمان‌بندی بهینه برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها در بازارهای انرژی است. رویکرد پیشنهادی در یک چارچوب زمانی شامل کلاس‌های آفلاین و آنلاین با استفاده از ساختار بهینه‌سازی دو سطحی مدل‌سازی شده است. مرحله اول، برنامه‌ریزی روز آینده سیستم چند ریزشبکه‌ای با استفاده از تئوری بازی[۲] است. مرحله دوم بر مدیریت نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر و تقاضای برق در مقیاس زمانی کوتاه‌تر و تشکیل بازار زمان‌حقیقی این ریزشبکه‌ها متمرکز است.

در این مقاله، مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده شامل منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی به همراه منابع تجدیدناپذیر پیل سوختی و میکروتوربین در کنار ذخیره‌ساز باتری در یک ریزشبکه استاندارد با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری توسط الگوریتم پیشنهادی اصلاح شده جستجوی فاخته انجام خواهد شد. در ریزشبکه هوشمند مورد مطالعه، از توربین بادی، پانل خورشیدی، میکروتوربین و پیل سوختی به عنوان منابع تولید پراکنده و همچنین از باتری به عنوان ذخیره‌ساز استفاده خواهد شد. بین ریزشبکه و واحد پردازش ارتباط مخابراتی وجود دارد و به صورت هوشمند در هر لحظه با توجه به میزان بار، توان تولیدی منابع و ذخیره‌ساز و همچنین توان مبادله با شبکه کنترل می‌شود. بایستی الگوریتم بهینه‌سازی در بازه زمانی شبیه‌سازی، مقادیر توان هر یک از منابع تولید پراکنده را با توجه به محدودیت‌های موجود، به گونه‌ای تعیین کند که هزینه‌ها حداقل شود. تابع هدف پیشنهادی، ترکیبی از هزینه‌های تولید توان منابع تولید پراکنده، هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری[۳]، هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادست و همچنین جریمه انرژی تامین نشده[۴] است. الگوریتم پیشنهادی اصلاح شده جستجوی فاخته، دارای دقت و سرعت همگرایی بالایی است که در نقاط بهینه محلی به دام نخواهد افتاد. در نتیجه این الگوریتم می‌تواند ابزاری مناسب به منظور حل مسئله بهینه‌سازی انرژی منابع در ریزشبکه مورد مطالعه باشد. همچنین دلیل دیگر انتخاب الگوریتم جستجوی فاخته این است که این الگوریتم در بسیاری از مسائل غیرخطی[۵] و غیرمحدب[۶] پیچیده استفاده شده و از توانایی بالایی در حل مسائل با متغیرهای پیوسته یا گسسته برخوردار است. از طرفی جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مساله بهینه‌سازی با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات[۷] (PSO)، الگوریتم زنبور عسل[۸] (BA)، الگوریتم اصلاح شده خفاش[۹] (MBA) و الگوریتم جستجوی صاعقه[۱۰] (LSA) شبیه‌سازی شده است و نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای این الگوریتم است. عملکرد روش پیشنهادی به ازای شرایط مختلف بار و شدت تابش خورشید در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در چهار شرایط بهره‌برداری مختلف و با هدف کاهش هزینه انجام پذیرفت و با نتایج الگوریتم‌های GA، PSO، BA، MBA و LSA مورد مقایسه قرار گرفت تا کارایی روش پیشنهادی مقاله مورد ارزیابی قرار گیرد.

[1] Manta ray foraging optimization
[2] Game theory
[3] Battery Storage
[4] Energy not supplied
[5] Nonlinear
[6] Nonconvex
[7] Particle swarm optimization
[8] Bee algorithm
[9] Modified bat algorithm
[10] Lightning search algorithm

بنابراین می‌توان از نقاط برجسته مقاله به موارد زیر اشاره کرد:

- در نظر گرفتن چهار تابع هدف به صورت هم‌زمان.
- کاهش هم‌زمان هزینه‌های تولید توان منابع تولید پراکنده، هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری، هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادست و همچنین جریمه انرژی تامین نشده.
- شبیه‌سازی با الگوریتم‌های GA، PSO، BA، MBA و LSA جهت بررسی کارآیی الگوریتم پیشنهادی مساله.

با توجه به اهدافی که این مقاله دنبال می‌کند ساختار آن به صورت زیر خواهد بود:

در بخش دوم، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها و همچنین نحوه مدیریت انرژی در ریزشبکه، ارائه شده است. در بخش سوم، مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی به همراه توابع هدف مسئله و محدودیت‌های آن در ریزشبکه آورده شده است. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی آمده است. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری تحقیق اختصاص یافته است.

۲- برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها

بهره‌بردار برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها، در کوتاه‌مدت[1] و بلندمدت[2] باید قیودی را در نظر بگیرد. قیود مربوط به بهره‌برداری کوتاه‌مدت عبارت هستند از [۲۸]:

- قطع کردن بار در صورت لزوم
- تنظیم ولتاژ و فرکانس در حالت گذرا
- پاسخ دینامیکی قابل قبول
- کیفیت توان برای بارهای حساس

ساختار کنترلی در ریزشبکه به دو دسته عمده تقسیم می شود: متمرکز[3] و غیر متمرکز[4] که هر کدام از این ساختارهای کنترلی خود شامل سه سطح ترتیبی می‌باشند [۲۹]:

۱) بهره‌بردار سیستم توزیع[5] (DNO) که می تواند همراه با بهره‌بردار بازار[6] (MO) باشد.
۲) کنترل کننده مرکزی ریزشبکه[7] (MGCC) که بهره‌بردار ریزشبکه نیز می باشد.
۳) کنترل‌کننده‌های محلی[8] (LC) که مربوط به هر یک از واحدهای تولید پراکنده و یا بارها هستند.

بهره‌بردار شرکت توزیع در بالاترین سطح کنترلی قرار دارد که ناظر بر ناحیه‌ای است که در آن بیش از یک ریزشبکه وجود دارد. همچنین، یک (یا بیشتر) بهره‌بردار بازار برای هر ناحیه خاص، وظایف مربوط به بازار را بر عهده دارد. بهره‌بردار شرکت توزیع و بهره‌بردار بازار متعلق به ریزشبکه نیستند، بلکه به شبکه اصلی وابسته هستند. کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه یا همان بهره‌بردار ریزشبکه رابط اصلی بین ریزشبکه بهره‌بردار شرکت توزیع و بهره‌بردار بازار است. کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه وظایف مختلفی از حداکثر کردن اندازه ریزشبکه تا هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی را بر عهده دارد. کنترل‌کننده‌های محلی که پایین‌ترین سطح کنترل را شامل می‌شوند کنترل واحدهای تولید پراکنده و بارهای قابل کنترل را در ریزشبکه بر عهده دارند. بسته به ساختار کنترلی، هر یک از کنترل‌کننده های محلی ممکن است سطح معینی از هوشمندی را دارا باشد.

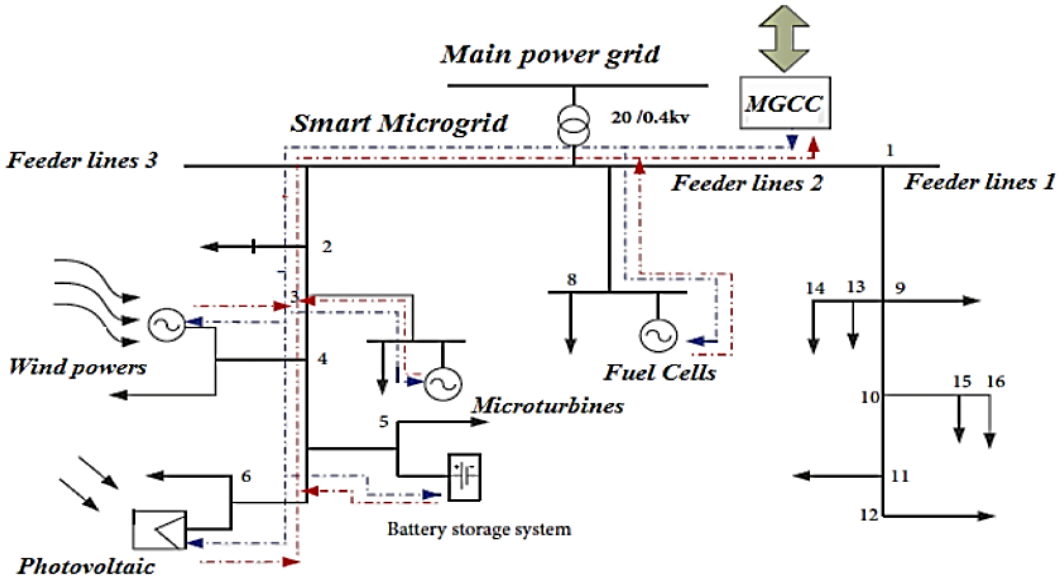
وجود یک ارتباط دو سویه بین کنترل‌کننده‌های محلی و کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه ضروری است. این ارتباط می‌تواند توسط خطوط تلفن، خطوط انتقال قدرت و یا بی‌سیم صورت پذیرد. کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه به دنبال بهینه کردن توان تبادلی با شبکه اصلی و نیز حداکثر کردن تولیدات بر اساس قیمت بازار و قیود امنیت است. برنامه‌ریزی توسط کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده، بعنوان مثال هر ۱۵ دقیقه برای ساعت یا ساعات بعدی صورت می

[1] Short term
[2] Long term
[3] Centralized
[4] Decentralized
[5] Distribution Network Operator
[6] Market Operator
[7] Micro Grid center
[8] Local Controller

گیرد. با در نظر گرفتن سیستمی مبتنی بر بازار، بهره‌بردار ریزشبکه باید با دریافت اطلاعاتی مانند قیمت بازار، قیمت پیشنهادی و تعیین اولویت تغذیه توسط کنترل‌کننده‌های محلی بارها، قیمت پیشنهادی و میزان تولید توسط کنترل‌کننده-های منابع تولید پراکنده، قیود امنیتی شبکه و داده‌های پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر همراه باشد [۳۰].

۳- مدل پیشنهادی، تابع هدف و محدودیت‌های مساله

در این بخش، ریزشبکه استاندارد فشار ضعیف نمونه که برای انجام مطالعات مورد استفاده قرار گرفته به صورت مختصر معرفی شده است. در شکل (۱) دیاگرام تک خطی ریزشبکه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است [۳۱]. در این ریزشبکه، از پانل فتوولتائیک، توربین بادی، میکروتوربین و پیل‌سوختی به عنوان منابع تولید انرژی الکتریکی و از باتری به منظور ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی استفاده شده است. ریزشبکه توسط یک ترانسفورمر توزیع $\frac{0.4\,KV}{20\,KV}$ به شبکه سراسری برق متصل است تا بتواند به صورت پیوسته با شبکه سراسری برق تبادل انرژی الکتریکی کند. بارهای ریزشبکه در سه فیدر تقسیم شده‌اند که مقادیر آنها متغیر با زمان است.



شکل (۱): ریز شبکه استاندارد مورد مطالعه

۳-۱- تابع هدف مساله

بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از سیستم‌های قدرت با لحاظ کردن محدودیت‌های تولید و بهره‌برداری، مهمترین هدف بهره-برداران است. هزینه‌های بهره‌برداری که ریزشبکه مورد مطالعه با آن روبرو است عبارتند از: هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی و هزینه تبادل توان. برای این اهداف می‌توان از روابط (۱) تا (۳) استفاده نمود.

$$Cost = \sum_{t=1}^{t=24} (\sum_{n=1}^{s_g} (A) + \sum_{m=1}^{s_r} (B) \quad (۱)$$

$$\sum_{n=1}^{s_g} (A) = [kn(T)P^{gn}(T)B^{gn}(T) + S^{gm}[Kn(T) - Kn(T-1)] + P^{grid}(T)B^{grid}(T)] \quad (۲)$$

$$\sum_{m=1}^{s_r} (B) = [Km(T)P^{sm}(T)B^{sm}(T) + S^{sm}[Km(T) - Km(T-1) + P^{grid}(T)B^{grid}(T)] \quad (۳)$$

که در آن $P^{gn}(T)$ و $B^{gn}(T)$ مقادیر پیشنهاد شده برای منابع تولید پراکنده و وسایل ذخیره‌کننده انرژی در ساعت T هستند. $P^{sm}(T)$ و $B^{sm}(T)$ نشان‌دهنده هزینه‌های شروع و پایان برای n امین منبع تولید پراکنده و m امین مولد ذخیره انرژی هستند. $P^{grid}(T)$ انرژی خریداری شده از شبکه یا فروخته شده به شبکه در زمان T می‌باشد. $B^{grid}(T)$ نشان‌دهنده انرژی مورد استفاده

در زمان T است. X متغیرهای برداری است و شامل نیروی فعال واحدها و حالات مرتبط به آن‌ها است که به شکل رابطه (۴) بیان می‌شود:

(۴)

$$Y=[P^G,U^G]$$
$$P^G=[P^g,P^s]$$
$$k=s_g+s_r+1$$

که در آن n تعداد متغیرهای حالت، S_g، S_r تعداد کل واحدهای تولیدی و واحدهای ذخیره انرژی هستند. P^g توان برداری است که شامل توان‌های اکتیو در تمام U^G و DG_s است، که دلالت بر روشن یا خاموش بودن واحدها در هر ساعت از شبانه‌روز دارد. می‌توان این متغیرها را به صورت رابطه (۵) تعریف کرد.

$$P^g=[P^{g1},P^{g2},...,S_r]$$
$$P^{g1}=[P^{gn}(1),P^{gn}(2),...,P^{gn}(t),...,P^{gn}(T)] \quad (۵)$$
$$P^s=[P^{s1},P^{s2},...,S_g]$$
$$P^{sm}=[P^{gsm}(1),P^{sm}(2),...,P^{sm}(T)]$$

که در رابطه (۵)، T نشان‌دهنده تعداد کل ساعات است و $P^{grid}(T)$ و $P^{sm}(T)$ اندازه توان خروجی از i امین مولد و j امین ذخیره کننده انرژی در زمان t هستند.

$$U^G=[U^1,U^2,...,U^n]$$
$$U_q=[U_q(1),U_q(2),...,U_q(T)] \quad (۶)$$

همچنین در رابطه (۶)، U_q وضعیت واحد را در ساعت‌های t نشان می‌دهد.

۳-۲- محدودیت‌های مساله

برای بهره‌برداری از ریز شبکه بایستی الزاماتی را مدنظر قرار داد که این محدودیت‌ها به شرح زیر هستند [۳۱]:

محدودیت اول: تعادل توان تولیدی و مصرفی

در یک ریزشبکه بایستی توان تولیدی ریزشبکه و میزان توان دریافتی از شبکه سراسری پاسخگوی توان موردنیاز تقاضا باشد. بدین منظور خواهیم داشت:

$$\sum_{x=1}^{N_k}P^{lk}(t)=\{\sum_{n=1}^{s_g}(A)+\sum_{m=1}^{s_r}(B)\} \quad (۷)$$

$$\sum_{n=1}^{s_g}(A)=\sum_{n=1}^{s_g}P^{grid}(t) \quad (۸)$$

$$\sum_{m=1}^{s_r}(B)=\sum_{n=1}^{s_r}P^{sm}(t)+P^{grid}(t) \quad (۹)$$

در رابطه‌های فوق P^{lk} اندازه بار K ام و N_k، تعداد بار است.

محدودیت دوم: ظرفیت تولیدی واحدهای تولید پراکنده و منابع ذخیره‌ساز

در بهره‌برداری از ریزشبکه بایستی حدود تولید توان هر یک از تولیدات پراکنده را در نظر گرفت و بایستی با اعمال این قیود، اجازه فعالیت تولید پراکنده در بازه‌های غیر مجاز داده نشود. قیود ظرفیت تولید توان از رابطه (۱۰) بدست می‌آیند:

$$P_{\min}^{gn}(t) \le P^{gn}(T) \le P_{\max}^{gn}(t)$$
$$P_{\min}^{sm}(t) \le P^{sm}(T) \le P_{\max}^{sm}(t) \quad (۱۰)$$
$$P_{\min}^{grid}(t) \le P^{grid}(T) \le P_{\max}^{grid}(t)$$

که در رابطه (۱۰) حد پایین و بالای توان تولیدی مولدها و ذخیره‌کننده‌های توان آورده شده است.

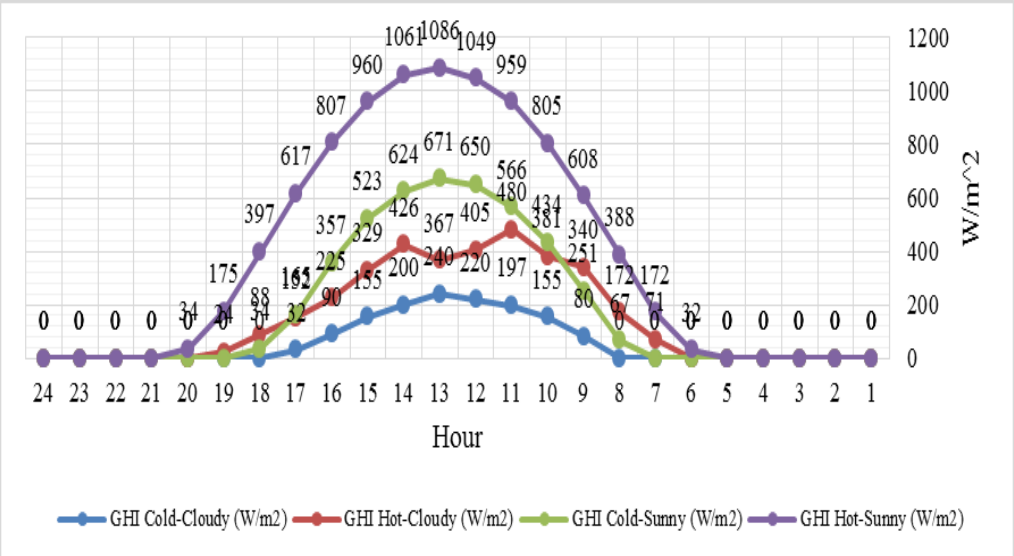
محدودیت سوم: محدودیت‌های بهره‌برداری از باتری

برای شارژ و دشارژ باتری در هر فاصله زمانی محدودیت‌هایی وجود دارد. این محدودیت‌ها را می‌توان با رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) بیان کرد:

$$V_t^{ess} = V_{t-1}^{ess} + \mu^{charge} P^{charge} \Delta t - \frac{1}{\mu^{discharge}} P^{discharge} \Delta t \quad (۱۱)$$

$$V_{\min}^{ess} \le V_t^{ess} \le V_{\max}^{ess}$$
$$P_t^{charge} \le P_{\max}^{charge} \quad (۱۲)$$
$$P_t^{discharge} \le P_{\max}^{discharge}$$

که در روابط بالا، V_t^{ess} و V_{t-1}^{ess} مقادیر ذخیره انرژی در باتری در دو ساعت پیاپی هستند. P^{charge} و $P^{discharge}$ به ترتیب مقادیر مجاز شارژ و دشارژ باتری طی دوره مشخصی از زمان هستند. همچنین μ نیز راندمان شارژ و دشارژ است. در این روابط، V_{max}^{ess} و V_{min}^{ess} به ترتیب حداکثر و حداقل محدوده مجاز مربوط به مقادیر ذخیره انرژی در باتری و P_{max}^{charge} و P_{min}^{charge} حدود حداکثری و حداقلی شارژ و دشارژ باتری در بازه زمانی t-1 تا t هستند.



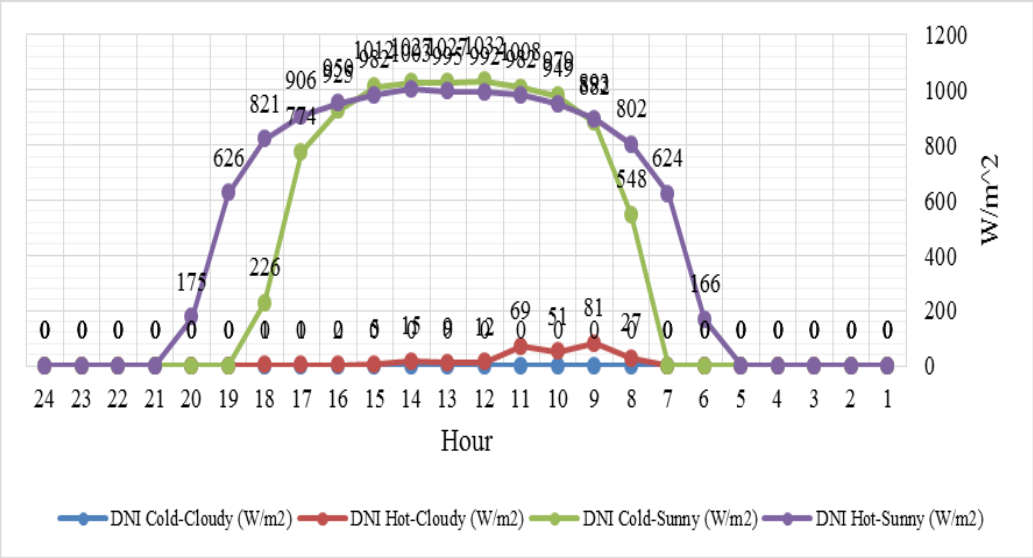
شکل (۲): شدت تابش خورشید در شرایط تابش هریزون جهانی (GHI)

۴- نتایج شبیه‌سازی

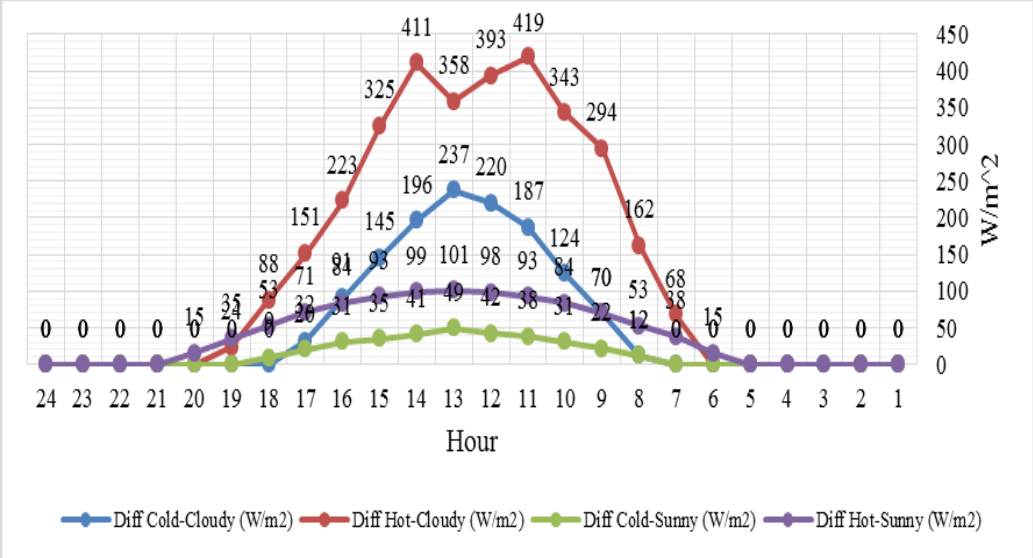
در این مقاله مدیریت بهینه انرژی منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه نمونه در شرایط عدم قطعیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین روی از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته برای انجام بهینه‌سازی استفاده شده است. هدف از بهره‌برداری بهینه از منابع قابل برنامه‌ریزی و غیر قابل برنامه‌ریزی در ریزشبکه، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شامل کاهش هم‌زمان هزینه‌های تولید توان منابع تولید پراکنده، هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری، هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادست و همچنین جریمه

انرژی تامین نشده است. علاوه بر الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته (CSA)، از الگوریتم جستجوی صاعقه (LSA)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم زنبور عسل (BA) و همچنین الگوریتم اصلاح شده خفاش (MBA) برای بهینه‌سازی استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمامی این الگوریتم‌ها در مرجع [۳۱] مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی جهت حل مسئله بهینه‌سازی به نحوی است که در آن تعداد اعضای جمعیت اولیه ۲۰۰، حداکثر تعداد تکرار الگوریتم ۱۰۰، نرخ ترکیب و جهش به ترتیب ۰/۷ و ۰/۳ لحاظ شده است.

در این بخش، مطالعات برای چهار شرایط تابشی مختلف گرم آفتابی، سرد آفتابی، گرم ابری و سرد ابری تکرار شده است. در شکل‌های (۲) تا (۴)، به ترتیب مقادیر شدت تابش در شرایط تابش هریزون جهانی[1] (GHI)، تابش مستقیم عادی[2] (DNI) و فصل‌های مختلف[3] (DS) نشان داده شده است.



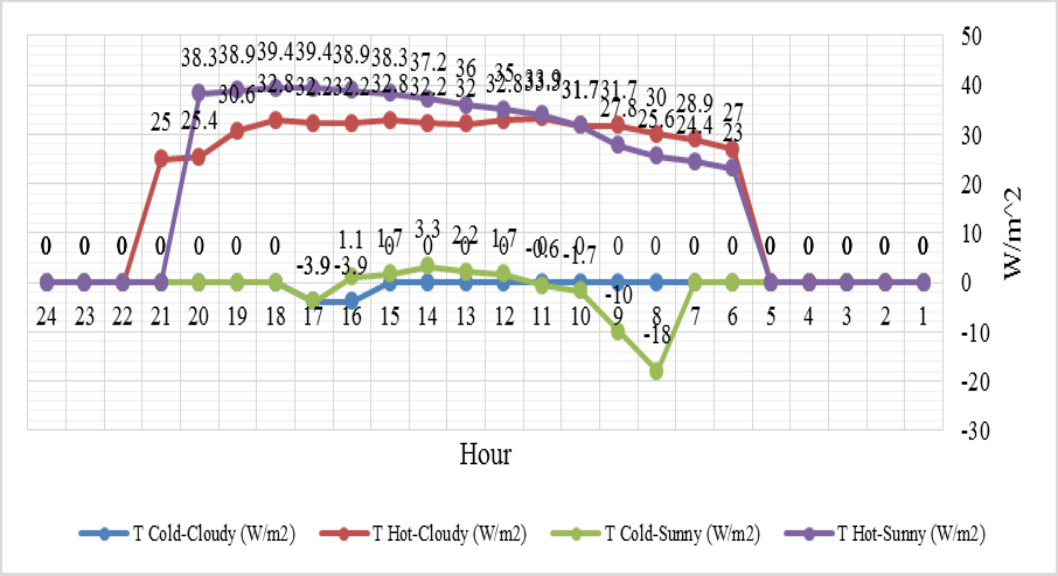
شکل (۳): شدت تابش خورشید در شرایط تابش مستقیم عادی (DNI)



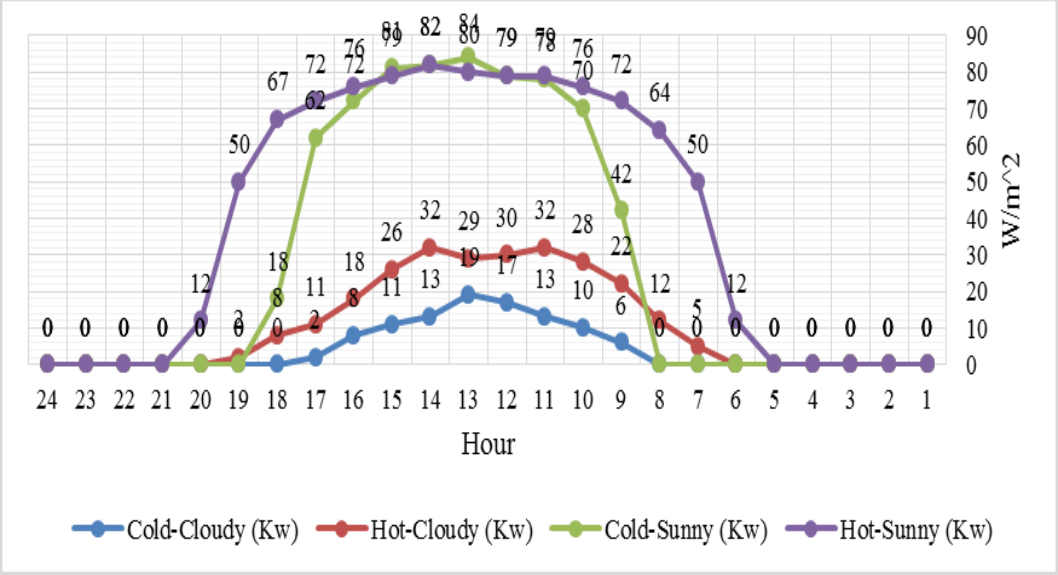
شکل (۴): شدت تابش خورشید در شرایط فصل های مختلف (DS)

[1] Global HZ Irradiance
[2] Direct Normal Irradiation
[3] Different Seasons

در شکل‌های (۵) و (۶) دمای محیط و میزان توان الکتریکی درخواستی ریزشبکه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز در چهار شرایط تابشی مختلف مطرح شده، به نمایش درآمده است.



شکل (۵): دمای محیط در چهار شرایط تابشی مختلف



شکل (۶): میزان بار شبکه در چهار شرایط تابشی مختلف

جدول (۱): محدودیت‌های توانی و هزینه منابع تولید پراکنده

	میکرو توربین	پیل سوختی	فتوولتائیک	بادی	باتری	شبکه
حداقل توان	۶	۳	۰	۰	-۳۰	-۳۰
حدکثر توان	۳۰	۳۰	۲۵	۱۵	۳۰	۳۰
هزینه راه اندازی ($)	۰/۹۶	۱/۶۵	۰	۰	۰	–
هزینه تولید توان ($/ KWh)	۰/۴۷۵	۰/۲۹۴	۲/۵۸۴	۱/۰۷۳	۰/۳۸	–

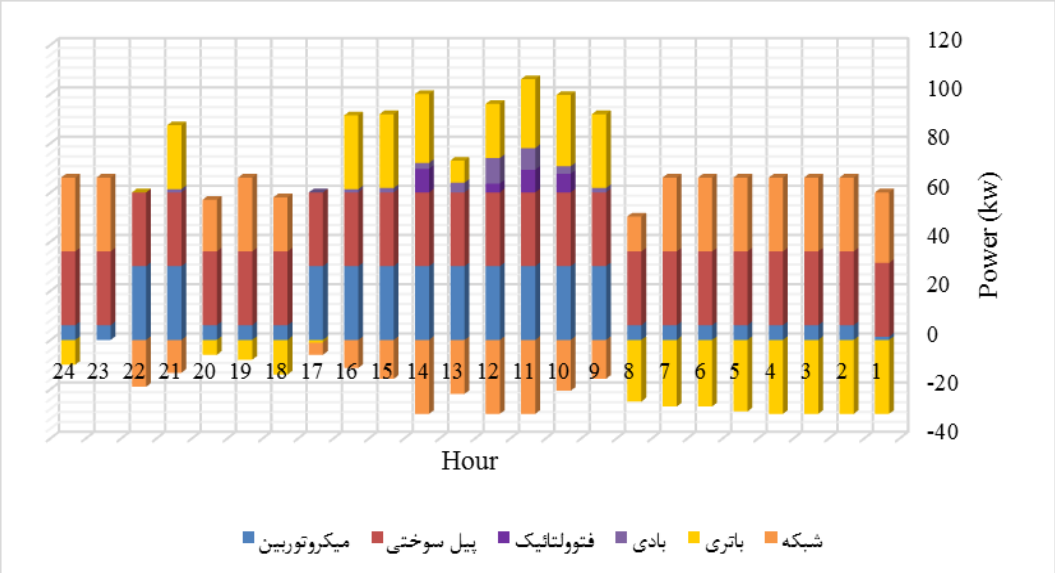
همچنین هر یک از منابع تولید توان و یا ذخیره توان الکتریکی در ریزشبکه دارای محدودیت‌های توانی هستند که در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول، حداقل مقدار منفی باتری به معنای ذخیره‌سازی انرژی و مقدار منفی برای شبکه به معنای فروش برق به شبکه سراسری توسط ریزشبکه است.

۴-۱- نتایج بهینه‌سازی یک روز گرم آفتابی

در بخش اول، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری برای یک روز گرم آفتابی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور الگوریتم‌های بهینه‌سازی به گونه‌ای عمل خواهند کرد که هزینه تولید توان در ریزشبکه برای آن روز حداقل شود. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تعداد دفعات ۱۰۰ تکرار اجرا شد که این نتایج در جدول (۲)، ثبت شده است.

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی یک روز گرم آفتابی

	بهترین پاسخ (€)	بدترین پاسخ (€)	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه‌سازی (s)
GA	۳۶۷/۶۹	۳۹۷/۳۴	۳۸۰/۹۴	۱۹/۸۵	۱۲۵/۵۷
PSO	۳۶۶/۰۷	۳۹۶/۰۱	۳۷۹/۵۱	۱۸/۰۲	۱۲۳/۴۸
BA	۳۶۴/۴۲	۳۹۴/۵۹	۳۷۸/۷۸	۱۶/۹۷	۱۲۲/۷۶
MBA	۳۶۴/۴۲	۳۹۳/۵۵	۳۷۸/۷۸	۱۶/۹۷	۱۲۲/۷۶
LSA	۳۶۴/۴۲	۳۹۴/۳۶	۳۷۸/۹۱	۱۷/۰۱	۱۲۰/۱۱
CSA	۳۶۳/۲۱	۳۹۱/۱۷	۳۷۴/۶۹	۱۶/۱۱	۱۲۵/۱۲



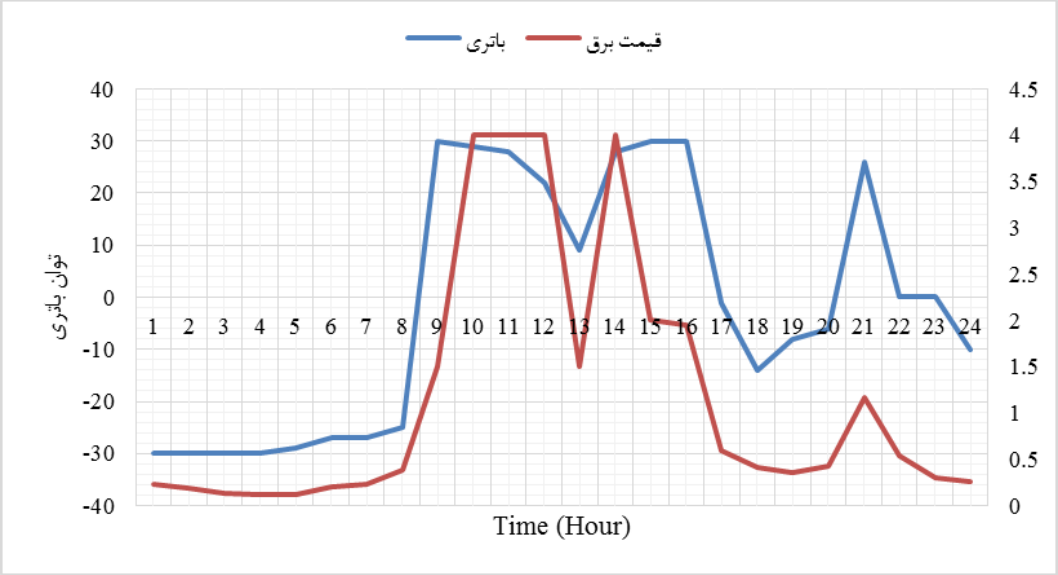
شکل (۷): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده یک روز گرم آفتابی

همانطور که در نتایج مشخص است، تمامی الگوریتم‌ها پاسخ‌هایی تقریباً مشابه داشتند و اختلاف ناچیزی با هم دارند. اما هزینه‌های ناچیز می‌تواند در طولانی مدت، مقدار قابل ملاحضه‌ای پیدا کند. کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف برای الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته به ترتیب برابر با ۳۶۳/۲۱ و ۳۹۱/۱۷ یورو محاسبه شده است در حالی‌که این مقادیر برای الگوریتم ژنتیک برابر با ۳۶۷/۶۹ و ۳۸۰/۳۴ یورو حاصل شده است. انحراف معیار برای الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته کمتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی بدست آمده است. در مورد انحراف معیار نیز می‌توان گفت الگوریتمی که دارای انحراف معیار

کمتر باشد، دارای عملکرد مناسب و دقیق‌تری است و پاسخ بهینه را به صورت تصادفی بدست نیاورده است که در نتایج بدست آمده مقدار انحراف معیار برای الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته برابر با ۱۶/۱۱ بدست آمده که کمتر از سایر الگوریتم‌ها است.

پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته، مقادیر توان هر یک از منابع تولید پراکنده بدست آمده است. در صورتی‌که توان تولیدات پراکنده مطابق با شکل (۷) تعیین شود، مقدار هزینه‌های تامین انرژی در ریزشبکه برای این بخش حداقل خواهد شد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، در ساعات گرانی برق، تامین انرژی الکتریکی بر عهده تولیدات پراکنده بوده است و در ساعات ارزانی انرژی الکتریکی، توان مورد نیاز بار، بیشتر توسط شبکه تامین شده است. در ادامه منحنی تغییرات قیمت برق مبادله شده با شبکه و همچنین میزان شارژ و دشارژ باتری در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته در شکل (۸) به نمایش در آمده است.



شکل (۸): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف یک روز گرم آفتابی

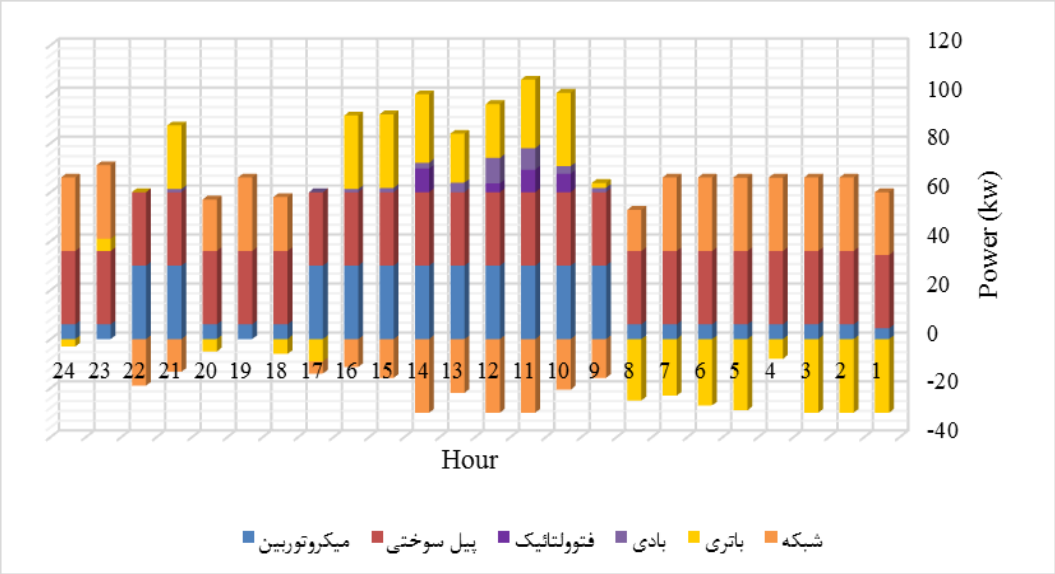
۲-۴- نتایج بهینه‌سازی یک روز سرد آفتابی

در قسمت دوم از شبیه‌سازی‌های انجام شده، کاهش هزینه بهره‌برداری از منابع موجود در ریزشبکه برای یک روز سرد تابستانی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همانند بخش اول از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط جدید با هدف کاهش هزینه‌ها استفاده شد. الگوریتم‌ها به تعداد دفعات ۱۰۰ تکرار اجرا شد و نتایج حاصل در جدول (۳) آورده شده است.

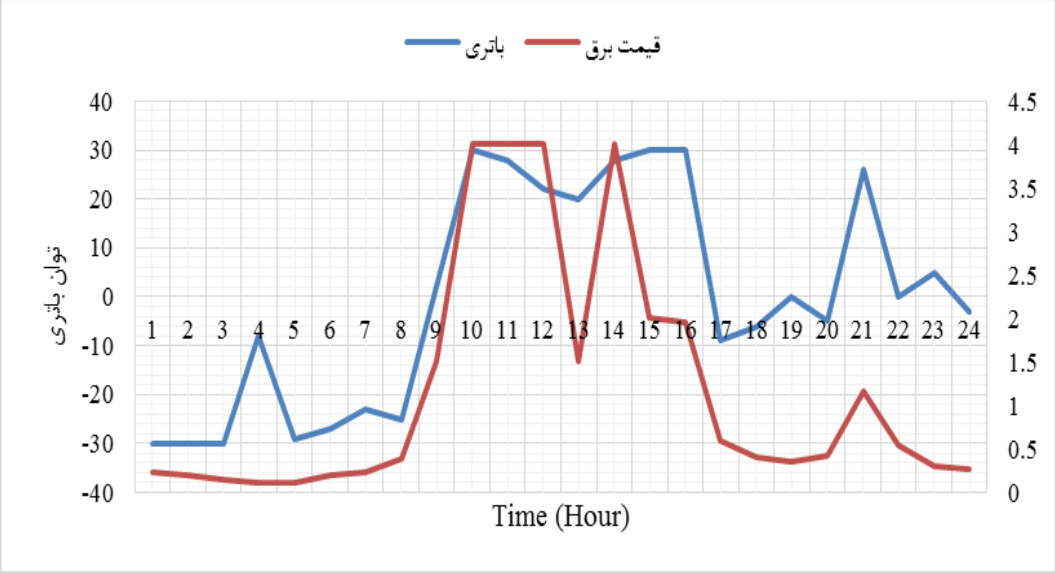
جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی یک روز سرد آفتابی

	بهترین پاسخ (€)	بدترین پاسخ (€)	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه‌سازی (s)
GA	۲۹۷/۸۳	۳۷۸/۷۸	۳۲۹/۸	۳۷/۷۹	۲۲۱/۶۵
PSO	۲۹۶/۲۱	۳۷۷/۴۵	۳۲۸/۳۷	۳۵/۹۷	۲۱۸/۶۴
BA	۲۹۵/۷۶	۳۷۵/۷۴	۳۲۷/۴۶	۳۴/۳۷	۲۱۷/۱۲
MBA	۲۹۳/۶۵	۳۷۴/۹۹	۳۲۶/۲۱	۳۳/۹۱	۲۱۵/۳۶
LSA	۲۹۳/۹۸	۳۷۵/۴۹	۳۲۷/۱۱	۳۴/۵۸	۲۱۹/۵۱
CSA	۲۹۲/۸۶	۳۷۳/۷۲	۳۲۵/۶۱	۳۳/۲۳	۲۱۴/۱۷

نسبت به بخش اول، هزینه‌ها کاهش قابل ملاحضه‌ای یافته است که دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش مصرف، جستجو کرد. بهترین پاسخ برای الگوریتم پیشنهادی برابر با ۲۹۲/۸۶ یورو محاسبه شده است در حالی‌که بهترین پاسخ در اجراهای چندین باره الگوریتم ژنتیک ۲۹۷/۸۳ یورو محاسبه شده است. تقریباً ۵ یورو هزینه‌های ریزشبکه در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته کمتر از زمانی بدست آمده است که از الگوریتم ژنتیک برای انجام بهینه‌سازی در ریزشبکه استفاده شود. انحراف معیار بالاتر در این بخش به معنای پراکندگی بیشتر نتایج بهینه‌سازی در این بخش است. مقادیر توان تولیدی هر یک از منابع تولیدات پراکنده و همچنین میزان انرژی الکتریکی مبادله شده با شبکه سراسری، پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته، در شکل (۹) به صورت نمودارهای میله‌ای به نمایش درآمده است.



شکل (۹): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده یک روز سرد آفتابی



شکل (۱۰): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف یک روز سرد آفتابی

همانند بخش اول، تامین انرژی در ساعات گرانی قیمت برق، بیشتر به منابع تولیدات پراکنده ارزان قیمت‌تر سپرده شد و در ساعت‌های ارزانی برق، شبکه سراسری، بخش قابل توجهی از بار ریزشبکه را تامین کرده است.

در ادامه نتایج حاصل از این بخش، نمودار قیمت انرژی الکتریکی مبادله شده با شبکه سراسری در هر ساعت از شبانه‌روز و همچنین میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

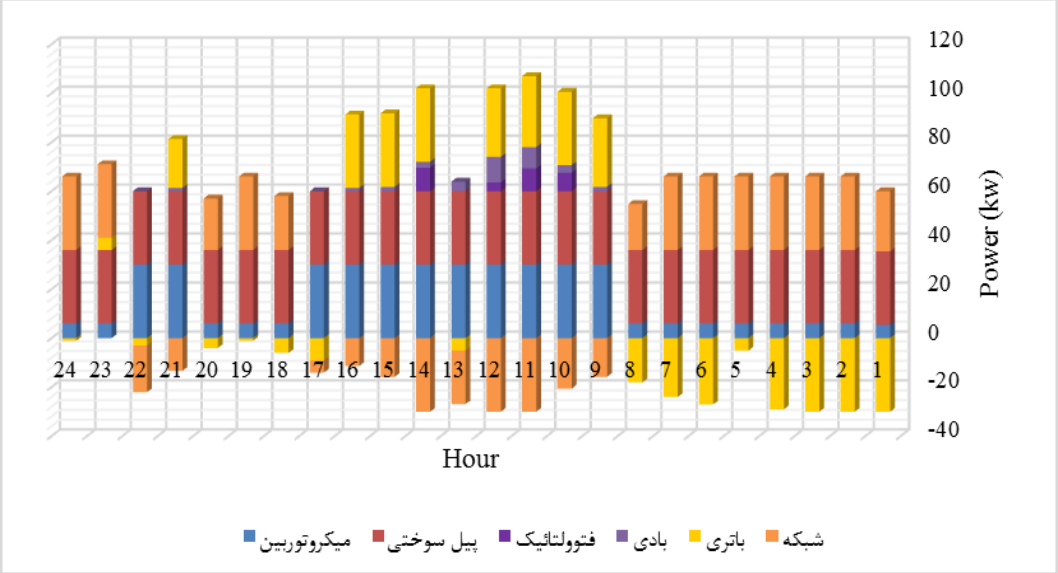
۳-۴- نتایج بهینه‌سازی یک روز گرم ابری

در ادامه روند شبیه‌سازی‌ها، در این بخش، کاهش هزینه بهره‌برداری از منابع موجود در ریزشبکه برای یک روز گرم ابری مورد مطالعه قرار گرفته است. همانند دو بخش قبل، از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل، اصلاح شده خفاش، جستجوی صاعقه و همچنین الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته برای انجام بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج ۱۰۰ تکرار اجرای الگوریتم در جدول (۴)، آورده شده است.

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی یک روز گرم ابری

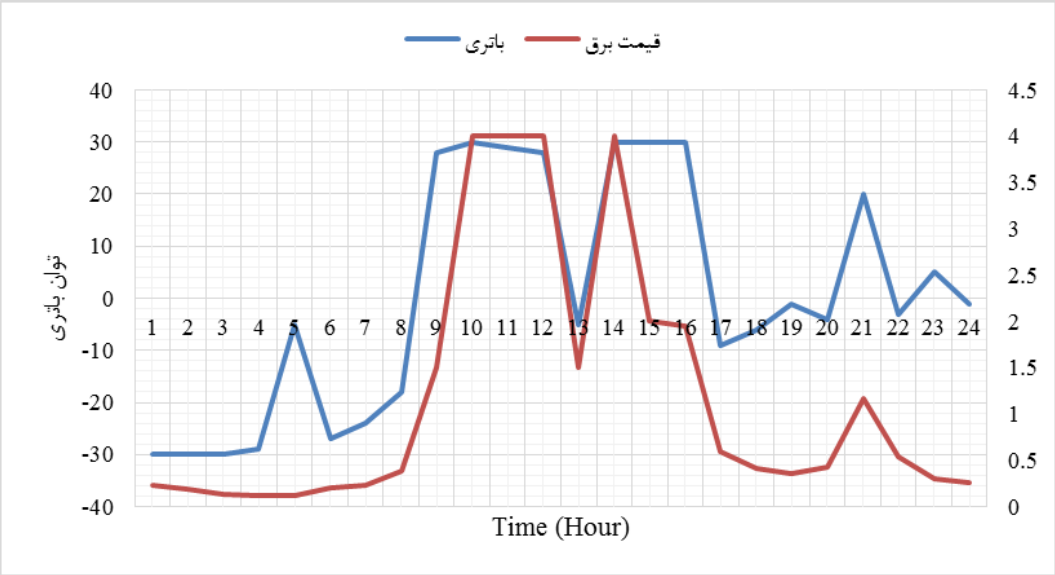
	بهترین پاسخ (€)	بدترین پاسخ (€)	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه‌سازی (s)
GA	۲۷۳/۱۸	۳۰۶/۹۴	۲۹۳/۵۸	۱۸/۸۷	۹۷/۴۲
PSO	۲۷۱/۵۶	۳۰۵/۴۴	۲۹۲/۱۶	۱۷/۰۵	۹۲/۳۶
BA	۲۷۰/۶۱	۳۰۴/۹۷	۲۹۱/۷۳	۱۵/۵۳	۸۷/۲۱
MBA	۲۶۹/۶۱	۳۰۲/۹۸	۲۹۰/۰۰	۱۴/۹۸	۸۵/۳۶
LSA	۲۷۰/۱۱	۳۰۳/۲۸	۲۹۱/۲۱	۱۵/۰۶	۸۶/۲۱
CSA	۲۶۷/۷۷	۳۰۰/۳۸	۲۸۹/۶۱	۱۴/۲۱	۸۵/۲۳

بهترین پاسخ، بدترین پاسخ، میانگین پاسخ‌ها و انحراف معیار در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته، به ترتیب برابر با ۲۶۷/۷۷، ۳۰۰/۳۸، ۲۸۹/۶۱ و ۱۴/۲۱ یورو بدست آمده است که کمتر از سایر الگوریتم‌های بهینه-سازی است که نشان از برتری این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد. در ادامه در شکل (۱۱)، مقادیر توان تولیدی هریک از منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز به همراه توان مبادله شده با شبکه سراسری، در هر ساعت از شبانه‌روز به صورت نمودار میله‌ای به نمایش در آمده است.



شکل (۱۱): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده یک روز گرم ابری

همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، توان مبادله شده با شبکه سراسری در ساعت‌های گرانی، منفی است که این موضوع به معنای فروش برق به شبکه و افزایش سودآوری برای مالکان ریزشبکه است. به صورت بالعکس در ساعت‌های ارزانی برق (برای مثال ساعت‌های ابتدایی روز)، بخش عمده نیاز الکتریکی ریزشبکه، از طریق شبکه سراسری تامین شده است. شارژ باتری‌ها نیز عمدتاً در ساعت‌های ارزانی و دشارژ باتری در ساعت‌های گرانی انجام شده است که در شکل (۱۲)، این موارد نشان داده شده است.



شکل (۱۲): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف یک روز گرم ابری

۴-۴- نتایج بهینه‌سازی یک روز سرد ابری

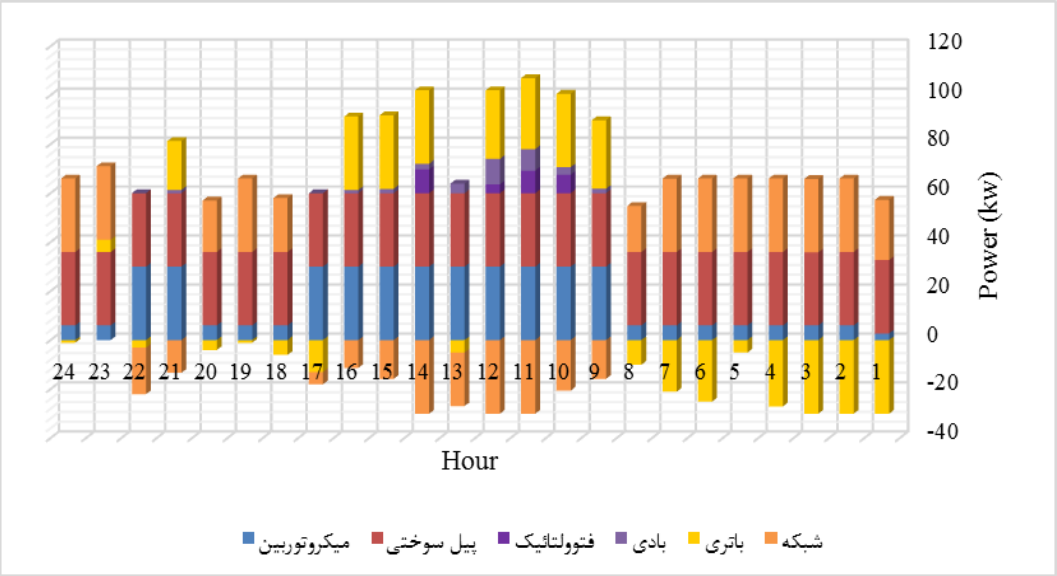
در نهایت در بخش چهارم شبیه‌سازی‌های انجام شده، کاهش هزینه بهره‌برداری در ریزشبکه مورد مطالعه برای یک روز سرد ابری انجام شده است. همانند سه بخش قبلی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تعداد ۱۰۰ تکرار اجرا شده و نتایج آن‌ها در جدول (۵)، آورده شده است.

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی یک روز سرد ابری

	بهترین پاسخ (€)	بدترین پاسخ (€)	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه‌سازی (s)
GA	۲۷۱/۵۱	۳۴۵/۹۴	۲۸۷/۲۲	۲۲/۲۴	۹۳/۵۴
PSO	۲۶۹/۸۸	۳۴۴/۶۲	۲۸۵/۷۹	۲۰/۴۱	۹۰/۴۱
BA	۲۶۸/۱۷	۳۴۳/۷۱	۲۸۵/۷۳	۱۹/۳۵	۸۸/۷۵
MBA	۲۶۷/۳۲	۳۴۲/۱۵	۲۸۳/۶۳	۱۸/۳۵	۸۶/۳۲
LSA	۲۶۷/۱۱	۳۴۲/۱۷	۲۸۴/۴۷	۱۸/۸۹	۹۱/۷۸
CSA	۲۶۶/۱۴	۳۴۰/۸۳	۲۸۱/۹۰	۱۷/۶۷	۸۴/۱۲

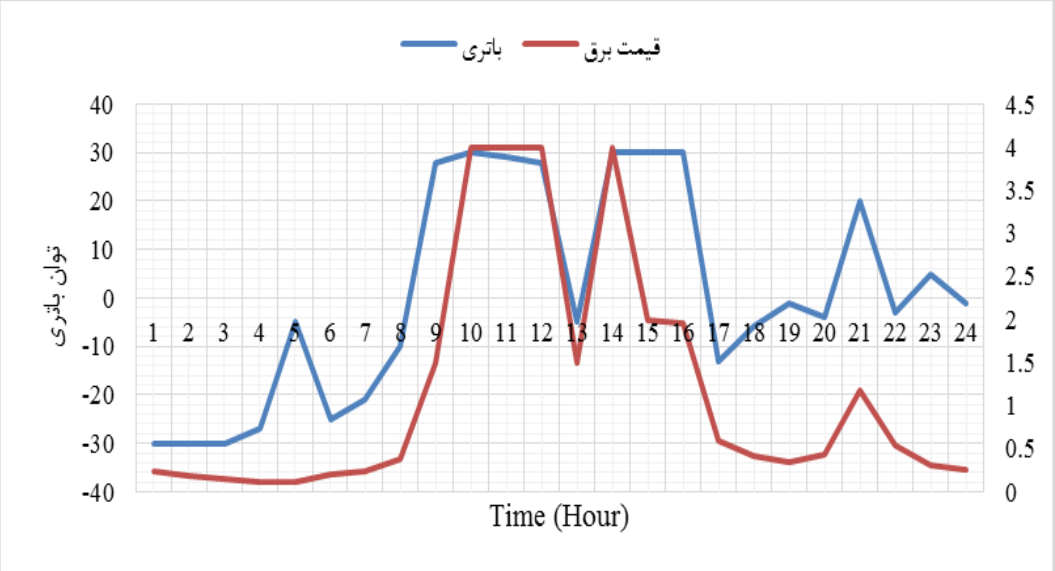
پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته، بهترین پاسخ در ۱۰۰ اجرای آن برابر با ۲۶۶/۱۴ یورو و بدترین پاسخ این الگوریتم حدود ۳۴۰/۸۳ یورو محاسبه شد. در حالی‌که بهترین پاسخ در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل، خفاش بهبود یافته و جستجوی صاعقه به ترتیب برابر با ۲۷۱/۵۱، ۲۶۹/۸۸، ۲۶۸/۱۷، ۲۶۷/۳۲ و ۲۶۷/۱۱ یورو محاسبه شده است. در ادامه، مقادیر توان تولیدی منابع تولید پراکنده، توان ذخیره‌سازی شده توسط

باتری و انرژی مبادله شده با شبکه سراسری برای هر ساعت از شبانه‌روز، در صورت اجرای بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی به صورت نمودار میله‌ای در شکل (۱۳)، به نمایش درآمده است.



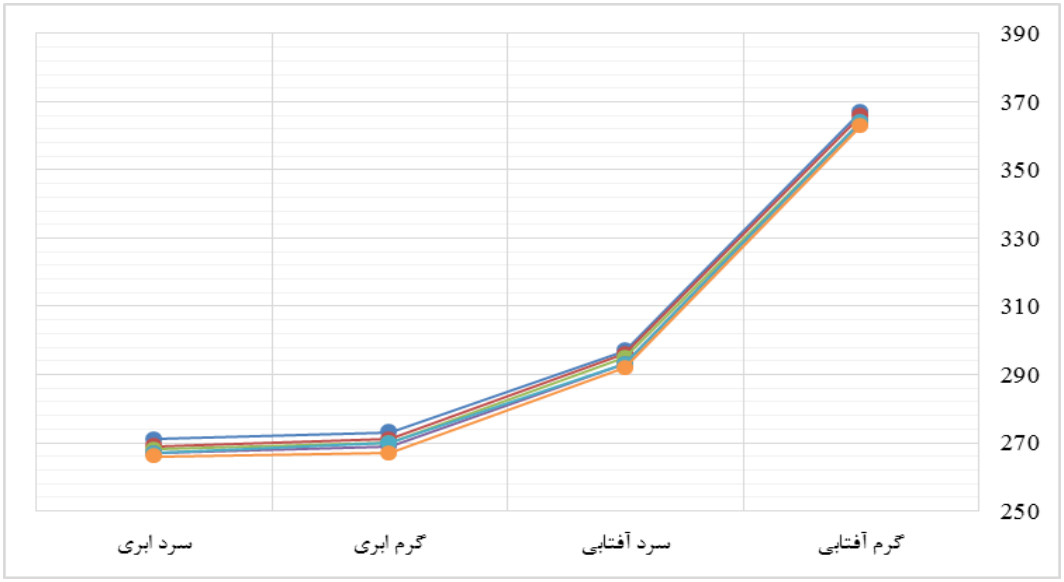
شکل (۱۳): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده یک روز سرد ابری

همان‌طور که انتظار می‌رفت، در ساعت‌های گرانی برق، تامین انرژی الکتریکی بر عهده تولیدات پراکنده بوده است و در ساعت-های ارزانی انرژی الکتریکی، توان موردنیاز بار بیشتر توسط شبکه تامین شده است. همچنین منحنی تغییرات قیمت برق مبادله شده با شبکه و همچنین میزان شارژ و دشارژ باتری در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته در شکل (۱۴) به نمایش در آمده است.



شکل (۱۴): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف یک روز سرد ابری

در انتها نیز در شکل (۱۵)، بهترین پاسخ‌های بدست آمده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط مختلف بهره‌برداری به نمایش درآمده است.



شکل (۱۵): بهترین پاسخ الگوریتم‌ها در چهار شرایط تابشی مختلف

۵- نتیجه‌گیری

بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه منابع تجدیدناپذیر و ذخیره‌ساز در شبکه‌های توزیع انرژی با عنوان منابع تولید پراکنده برای بارهای مصرفی پراکنده و کم در یک منطقه می‌تواند روشی مناسب و کاربردی به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش بهره‌وری انرژی باشد. از آنجایی‌که مهمترین هدف استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، کاهش هزینه‌های جاری شبکه است، در نتیجه لازم است تا بررسی‌های اقتصادی دقیقی برای شبکه‌های توزیع موردنظر صورت گیرد و مقدار انرژی الکتریکی تولید شده با توجه به سایر پارامترهای شبکه نظیر بارهای مصرفی، هزینه احداث و بهره‌برداری این نیروگاه‌ها و مقایسه آن با هزینه سوخت مصرفی نیروگاه‌ها و شبکه‌های برق سراسری موجود مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر روند رو به رشد خصوصی‌سازی، رقابتی شدن بازار برق و تبدیل سرمایه‌گذاران بزرگ به سرمایه‌گذاران کوچک، مدیران صنعت برق را بر این می‌دارد تا بیش از پیش به افزایش توان تولیدی و تجهیزات شبکه با حداکثر بازدهی انرژی و حداقل هزینه بهره‌برداری توجه کنند. هدف از انجام این مقاله مدیریت بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبکه نمونه با در نظر گرفتن ظرفیت‌های موجود در فضای بازار برق بوده است. بهره‌بردار ریزشبکه که در واقع مسئولیت بهره‌برداری ایمن از این شبکه را بر عهده دارد، باید روندی را به منظور برنامه‌ریزی در این شبکه لحاظ کند که منافع تمامی اجزای ریزشبکه در آن لحاظ شود. به عبارت دیگر، اطمینان کافی برای منابع تولید این شبکه‌ها به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری حاصل از تولید انرژی، ایجاد شود. برای انجام این مهم، از الگوریتم جستجوی فاخته استفاده شده است تا با ارائه الگویی مناسب برای تولید توان توسط تولیدات پراکنده، هزینه‌های جاری ریزشبکه در شرایط مختلف محیطی به حداقل مقدار برسد. نتایج شبیه‌سازی در چهار شرایط بهره‌برداری مختلف و با هدف کاهش هزینه انجام پذیرفت و با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل، خفاش اصلاح شده و جستجوی صاعقه مورد مقایسه قرار گرفت که الگوریتم پیشنهادی این پایان‌نامه یعنی الگوریتم جستجوی فاخته عملکرد مناسب‌تری در تمامی شرایط بهره‌برداری در کاهش تابع هدف داشته است.

References

مراجع

[1] R. Rashidi, A. Hatami, and M. Abedini, "Multi-microgrid energy management through tertiary-level control: Structure and case study", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101395, Oct. 2021.

[2] S. Ali, Z. Zheng, M. Aillerie, J.P. Sawicki, M.C. Pera, and D. Hissel, "A review of DC Microgrid energy management systems dedicated to residential applications", *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4308, July. 2021.

[3] P. Xie, Y. Jia, H. Chen, J. Wu, and Z. Cai, "Mixed-stage energy management for decentralized microgrid cluster based on enhanced tube model predictive control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 3780-3792, Sep. 2021.

[4] H. Zhou, A. Aral, I. Brandić, and M. Erol-Kantarci, "Multiagent Bayesian Deep Reinforcement Learning for Microgrid Energy Management Under Communication Failures', *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 14, pp. 11685-11698, July. 2022.
[5] E.E. Elattar, and S.K. ElSayed, "Probabilistic energy management with emission of renewable microgrids including storage devices based on efficient salp swarm algorithm", *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 23-35, June. 2020.
[6] S. Leonori, M. Paschero, F.M.F. Mascioli, and A. Rizzi, "Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms", *Applied Soft Computing*, vol. 86, p. 105903, Jan. 2020.
[7] Y.M. Alsmadi, A.M. Abdel-hamed, A.E. Ellissy, A.S. El-Wakeel, A.Y. Abdelaziz, V. Utkin, and A.A. Uppal, "Optimal configuration and energy management scheme of an isolated micro-grid using Cuckoo search optimization algorithm", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 356, no. 8, pp. 4191-4214, May. 2019.
[8] H. Karimi, and S. Jadid, "Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework", *Energy*, vol. 195, p. 116992, March. 2020.
[9] S. Jamal, , N.M. Tan and J. Pasupuleti, "A Review of Energy Management and Power Management Systems for Microgrid and Nanogrid Applications", *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10331, Sep. 2021.
[10]K. Bio Gassi, and M. Baysal, "Analysis of a linear programming based decision making model for microgrid energy management systems with renewable sources", *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 6, pp. 7495-7518, Jan. 2022.
[11] S. Areekkara, R. Kumar, and R.C. Bansal, "An intelligent multi agent based approach for autonomous energy management in a Microgrid", *Electric Power Components and Systems*, vol. 49, no. 12, pp. 18-31, Jun. 2021.
[12 X. He, X. Liang, and H. Wang, "Distributed neurodynamic algorithm for multi-objective problem optimization and its applications to isolated microgrid energy management", *Sustainable Cities and Society*, vol. 70, p. 102866, July. 2021.
[13] M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C.A. Sima, D.L. Carnì, and L. Martirano, "Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications", *Renewable Energy*, vol. 171, pp. 1115-1127, June. 2021.
[14] M. Restrepo, C.A. Cañizares, J.W. Simpson-Porco, P. Su, and J. Taruc, "Optimization-and rule-based energy management systems at the canadian renewable energy laboratory microgrid facility", *Applied Energy*, vol. 290, p. 116760, May. 2021.
[15] M. Dashtdar, M. Bajaj, and S.M.S. Hosseinimoghadam, "Design of optimal energy management system in a residential microgrid based on smart control", *Smart Science*, vol. 10, no. 1, pp. 25-39, July. 2022.
[16] J. Arkhangelski, M. Abdou-Tankari, and G. Lefebvre, "Day-ahead optimal power flow for efficient energy management of urban microgrid", *IEEE transactions on industry applications*, vol. 57, no. 2, pp. 1285-1293, March-April. 2021.
[17] A. Hasankhani, and S.M. Hakimi, "Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market", *Energy*, vol. 219, p. 119668, March. 2021.
[18] X. Fang, Q. Zhao, J. Wang, Y. Han, and Y. Li, "Multi-agent deep reinforcement learning for distributed energy management and strategy optimization of microgrid market", *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, p. 103163, Nov. 2021.
[19] D. Ahmed, M. Ebeed, A. Ali, A.S. Alghamdi, and S. Kamel, "Multi-objective energy management of a microgrid considering stochastic nature of load and renewable energy resources", *Electronics*, vol. 10, no. 4, p. 403, Feb. 2021.
[20]A. Mishra, M. Tripathy, and P. Ray, "A survey on different techniques for distribution network reconfiguration," *Journal of Engineering Research*, vol. 12, no. 1, pp. 173-181, March. 2024.
[21] M. R. Behbahani, A. Jalilian, A. Bahmanyar, and D. Ernst, "Comprehensive Review on Static and Dynamic Distribution Network Reconfiguration Methodologies," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 874-991, 2024.
[22] G. Abbas, Z. Wu, and A. Ali, "Multi objective multi period optimal site and size of distributed generation along with network reconfiguration," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 2, pp. 223-235, 2024.
[23] M. R. Behbahani, and A. Jalilian, "Reconfiguration of distribution network for improving power quality indexes with flexible lexicography method," *Electric Power Systems Research*, vol. 230, pp. 172-189, May. 2024.
[24] A. S. Chaitra, and H. R. Sudarshana Reddy, "Improving Reliability in Distribution Systems through Optimal Allocation of Distributed Generators," *Network Reconfiguration and Capacitor Placement. SN Computer Science*, vol. 5, no. 5, pp. 1-12, April. 2024.
[25] A. R. Battula, S. Vuddanti, and S. R. Salkuti, "A day ahead demand schedule strategy for optimal operation of microgrid with uncertainty," *Smart Cities*, vol. 6, no. 1, pp. 491-509, Feb. 2023.
[26] M. Al-Dhaifallah, Z. Alaas, A. Rezvani, B. N. Le, and S. Samad, "RETRACTED: Optimal day-ahead economic/emission scheduling of renewable energy resources based microgrid considering demand side management," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, pp. 110258, Oct. 2023.

[27] A. Jani, and S. Jadid, "Two-stage energy scheduling framework for multi-microgrid system in market environment," *Applied Energy*, vol. 336, pp. 683-702, April. 2023.
[28] T. Chen, Y. Cao, X. Qing, J. Zhang, Y. Sun, and G.A. Amaratunga, "Multi-energy microgrid robust energy management with a novel decision-making strategy", *Energy*, vol. 239, p. 121840, Jan. 2022.
[29] H.A. Muqeet, H.M. Munir, H. Javed, M. Shahzad, M. Jamil, and J.M. Guerrero, "An energy management system of campus microgrids: State-of-the-art and future challenges", *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6525, Oct. 2021.
[30] A.C. Pérez-Flores, J.D.M. Antonio, V.H. Olivares-Peregrino, H.R. Jiménez-Grajales, A. Claudio-Sánchez, and G.V.G. Ramírez, "Microgrid energy management with asynchronous decentralized particle swarm optimization", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69588-69600, May. 2021.
[31] L. Luo, S.S. Abdulkareem, A. Rezvani, M.R. Miveh, S. Samad, N. Aljojo, and M. Pazhoohesh, "Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty", *Journal of Energy Storage*, vol. 28, p. 101306, April. 2020.