دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

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

احمد قالیبافان[1]، دکتر اسماعیل خلیل زاده[2]

[1] دانشگاه آزاد، بندرعباس agh8663@gmail.com

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 می‌پذیرد. 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 پایان‌نامه، از الگوریتم جستجوی فاخته 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، ازدحام ذرات، زنبور عسل، زنبور عسل اصلاح شده و جستجوی صاعقه مورد مقایسه قرار گرفت الگوریتم جستجوی فاخته عملکرد مناسب‌تری در تمامی شرایط بهره‌برداری در کاهش تابع هدف داشته است.

واژگان کلیدی: مدیریت انرژی، ریزشبکه، کاهش هزینه، الگوریتم جستجوی فاخته

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های ناشی از کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی و از سویی مشکلات زیست- محیطی حصال 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، 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 قابل توجهی یافته است. از سوی دیگر، استفاده از منابع تولید پراکنده‌ی انرژی الکتریکی سبب افزایش شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه قدرت و کاهش ضررهای مالی ناشی از قطع ناگهانی برق می‌گردد. . 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 ارائه شد [۲]. 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 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 مسئله‌ی 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 [۳-۴]. برای دستیابی به این هدف بایستی، بهره بردار منابع تولید توان، شناخت کامل نسبت به تمامی اجزای سیستم همچون بارها و منابع تولید توان داشته باشد. در سال های اخیر، روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ی جدید که مبنی بر هوش مصنوعی می‌باشد، برای مدیریت بهینه ریزشبکه استفاده شده است. در [5]. الگوریتم ازدحام سالپ برای مدیریت بهینه مدیریت توان منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه با منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی ارائه شده است. در این مقاله 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 [6]، استراتژی مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک 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 الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است. در مرجع [7]، 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 مقاله 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 استفاده شده است. در [8]، 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 الکتریکی هم در آن مدل شده است. همچنین در این مقاله 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 ساعات روز، ماه و حتی فصول تغییر می‌کند. لذا این امر، تأثیر بسیاری بر شبکه 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 [9]. با استفاده از سیستم‌های ترکیبی و به دلیل مکمل بودن مشخصه‌های انرژی منابع مختلف با یکدیگر، می‌توان این مشکل را حل نمود [10]. بهینه‌سازی در این مطالعه جهت تغذیه اقتصادی منابع DER

و کاهش هزینه تولید برق و کاهش هزینه MG در بازه یک ساعته برنامه‌ریزی روز بعد و زمان استفاده انجام شده است. در این تحقیق سلول خورشیدی و توربین بادی به عنوان منابع غیر قابل توزیع با توجه به شرایط آب و هوایی توانی را که بتوانند تولید می‌کنند و باتری، پیل سوختی و میکروتوربین به عنوان منابع قابل توزیع برنامه‌ریزی شده‌اند. برنامه DR با استفاده از شبکه عصبی 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 می باشد. 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 [11]. یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها بحث برنامه ریزی کوتاه مدت و کنترل این شبکه‌ها می‌باشد. 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 را با مفهومی همچون ریز شبکه چندگانه تعریف می‌شود [12]. در این مقاله 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 [13]، با در نظر گرفتن هر ریز شبکه 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 [14]، علاوه بر بیشینه‌سازی درآمد منابع تولید از فروش انرژی و مطالعات اقتصادی، بهینه سازی با اهداف کاهش آلودگی و در راستای اهداف زیست محیطی در ریز شبکه اجرا شده است. در [15]، 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 DER و تولید/مصرف استفاده شده‌اند. انتخاب تعدادی از حالت‌ها با توجه به زمان محاسبات و بهبود تابع هدف صورت گرفته و در نهایت راه حل بهینه بدست آمده است. در [16]، به مرور انواع روش‌های مدلسازی و مدیریت انرژی در ریزشبکه پرداخته شده است. در این مقاله تحقیقات انجام شده در زمینه این نوع از ریزشبکه‌ها مورد بازبینی قرار گرفته است. در [17]، برای داشتن یک ریزشبکه با قابلیت اطمینان بالا از یک مدل پیش‌بینانه استفاده کرده است. از دیگر اهداف این مقاله کاهش هزینه تولید توان در یک ریزشبکه می‌باشد. در [18]، با در نظر گرفتن هر ریز شبکه 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 [18]، با الگوریتم جستجوی ممنوعه 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 تولید فضای جستجوی تولید DER و تولید/مصرف EV استفاده شده‌اند. انتخاب تعدادی از حالت‌ها با توجه به زمان محاسبات و بهبود تابع هدف صورت گرفته و در نهایت راه حل بهینه بدست آمده است. در [19]، 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 تعیین نموده است. متد شبکه عصبی ساختگی میزان تولید DER 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 این تحقیق، مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده 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 باتوجه به میزان بار، توان تولیدی منابع و ذخیره‌ساز و همچنین توان مبادله با شبکه کنترل می‌گردد. 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 گردد. تابع هدف پیشنهادی، ترکیبی از هزینه‌های تولید توان منابع تولید پراکنده، هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری، هزینه تبادل انرژی با شبکه بالادست و همچنین جریمه انرژی تامین نشده می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی اصلاح شده جستجوی فاخته، دارای دقت و سرعت همگرایی بالایی می‌باشد 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.

۲. برنامه ریزی و بهره برداری از ریزشبکه ها

بهره‌بردار برای برنامه‌ریزی و بهره برداری از ریزشبکه ها، در کوتاه مدت و بلند مدت باید قیودی را در نظر بگیرد. قیود مربوط به بهره برداری کوتاه مدت عبارت می باشد از [20]:

- 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 و غیر متمرکز. که هر کدام از این ساختارهای کنترلی خود شامل سه سطح ترتیبی می‌باشند [21]:

۱) بهره بردار سیستم توزیع (DNO) که می تواند همراه با (MO) بهره بردار بازار باشد.
۲) کنترل کننده مرکزی میکروگرید (MGCC) که بهره بردار ریزشبکه نیز می باشد.
۳) کنترل‌کننده‌های محلی (LC) که مربوط به هر یک از واحدهای تولید پراکنده و یا بارها هستند.

بهره بردار شرکت توزیع در بالاترین سطح کنترلی قراردارد که ناظر بر ناحیه ای می باشد که در آن بیش از یک ریزشبکه وجود دارد. همچنین، یک (یا بیشتر)بهره بردار بازار برای هر ناحیه خاص، وظایف مربوط به بازار را بر عهده دارد. بهره بردار شرکت توزیع و بهره بردار بازار متعلق به ریزشبکه نیستند، بلکه به شبکه اصلی وابسته هستند. کنترل کننده مرکزی ریزشبکه یا همان بهره بردار ریزشبکه رابط اصلی بین ریزشبکه بهره بردار شرکت توزیع و بهره بردار بازار می باشد. کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه وظایف مختلفی از حداکثر کردن اندازه ریزشبکه تا هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی را بر عهده دارد. کنترل کننده های محلی که پایین ترین سطح کنترل را شامل می شوند کنترل واحدهای تولید پراکنده

و بارهای قابل کنترل را در ریزشبکه بر عهده دارند. بسته به ساختار کنترلی، هر یک از کنترل کننده های محلی ممکن سطح معینی از هوشمندی را دارا باشد.

وجود یک ارتباط دو سویه بین کنترل کننده های محلی و کنترل کننده مرکزی ریزشبکه ضروری می باشد. این ارتباط می‌تواند توسط خطوط تلفن، خطوط انتقال قدرت و یا بی سیم صورت پذیرد. کنترل کننده مرکزی ریزشبکه بدنبال بهینه کردن توان تبادلی با شبکه اصلی و نیز حداکثر کردن تولیدات بر اساس قیمت بازار و قیود امنیت می باشد. برنامه ریزی توسط کنترل کننده مرکزی ریزشبکه در بازه های زمانی از پیش تعیین شده، بعنوان مثال هر ۱۵ دقیقه برای ساعت یا ساعات بعدی صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن سیستمی مبتنی بر بازار بهره بردار ریزشبکه با دریافت اطلاعات زیر باشد. [22]:

- قیمت بازار
- قیمت پیشنهادی و تعیین اولویت تغذیه توسط کنترل کننده های محلی بارها
- قیمت پیشنهادی و میزان تولید توسط کنترل کننده های منابع تولید پراکنده
- قیود امنیتی شبکه
- داده های پیش بینی منابع تجدید پذیر

۳. تابع هدف و محدودیت ها

بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از سیستم‌های قدرت با لحاظ کردن محدودیت‌های تولید و بهره‌برداری، مهمترین هدف بهره‌برداران می‌باشد. هزینه‌های عملیاتی که ریزشبکه مورد مطالعه با آن روبرو می باشد عبارتند از: هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی، هزینه تبادل توان و... می‌باشد. برای این هدف می‌توان از رابطه ریاضی زیر استفاده کرد.

$$Cost = \sum_{t=1}^{t=24} (\sum_{n=1}^{S_g} (A) + \sum_{m=1}^{S_r} (B)$$

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

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

که در آن $P^{gn}(T)$ و $B^{gn}(T)$ مقادیر پیشنهاد شده برای منابع تولید پراکنده و وسایل ذخیره کننده انرژی در ساعت T می‌باشند. $P^{sm}(T)$ و $B^{sm}(T)$ نشان دهنده هزینه‌های شروع و پایان برای nامین منبع تولید پراکنده و mامین مولد ذخیره انرژی می‌باشند. $P^{grid}(T)$ انرژی خریداری شده از شبکه یا فروخته شده به شبکه در زمان T می‌باشد. $B^{grid}(T)$ نشان دهنده انرژی مورد استفاده در زمان T می باشد. X متغیرهای برداری می باشد و شامل نیروی فعال واحدها و حالات مرتبط به آن‌ها می‌باشد که به شکل زیر بیان می‌شود:

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

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

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

که در رابطه فوق T نشان دهنده تعداد کل ساعات می باشد و $P^{grid}(T)$ و $P^{sm}(T)$ اندازه توان خروجی از iامین مولد و jامین ذخیره کننده انرژی در زمان t می‌باشند.

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

که در این رابطه U_q وضعیت واحد را در ساعات t نشان می‌دهد.

۴. محدودیت‌های مسئله

برای بهره‌برداری از ریز شبکه بایستی الزاماتی را مد نظر قرار داد که این محدودیت‌ها به شرح زیر می‌باشند [23]:

محدودیت اول: تعادل توان تولیدی و مصرفی

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

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

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

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

در روابط فوق P^{lk} اندازه بار Kام و N_k، تعداد بار می‌باشد.

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 را ندهیم. قیود ظرفیت تولید توان به فرم زیر می‌باشند:

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

که در روابط فوق حد پایین و بالای توان تولیدی مولدها و ذخیره کننده‌های توان آورده شده می باشد.

محدودیت سوم: محدودیت‌های بهره برداری از باتری

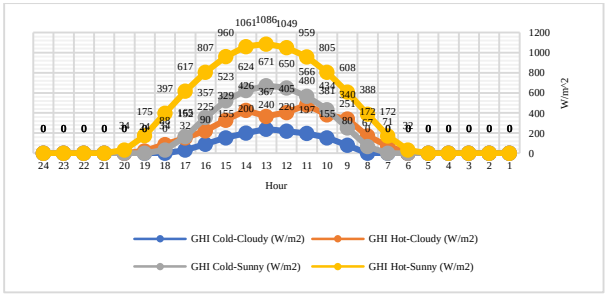
برای شارژ و دشارژ باتری در هر فاصله زمانی محدودیت‌هایی وجود دارد. این محدودیت‌هارا می‌توان به فرم زیر بیان کرد:

$$V_t^{ess}=V_{t-1}^{ess}+\mu^{charge}P^{charge}\Delta t-\frac{1}{\mu^{discharge}}P^{discharge}\Delta t$$
$$V_{\min}^{ess}\le V_t^{ess}\le V_{\max}^{ess}$$
$$P_t^{charge}\le P_{\max}^{charge}$$
$$P_t^{discharge}\le P_{\max}^{discharge}$$

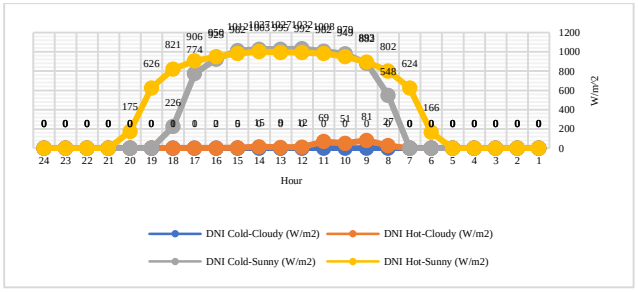
که در آن V_t^{ess} و V_{t-1}^{ess} مقادیر ذخیره انرژی در باتری در دو ساعت پیاپی می‌باشد. P^{charge} و $P^{discharge}$ مقادیر مجاز شارژ و دشارژ باتری طی دوره مشخصی از زمان هستند. همچنین μ نیز راندمان شارژ و دشارژ می‌باشد. در روابط فوق V_{max}^{ess} و V_{min}^{ess} به ترتیب حداکثر و حداقل محدوده مجاز مربوط 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 می‌باشند.

۵. سناریو شبیه سازی

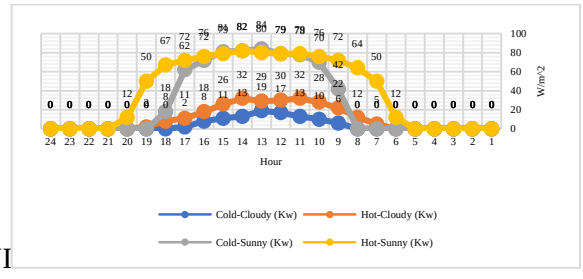
مطالعات برای چهار شرایط تابشی مختلف گرم آفتابی، سرد آفتابی، گرم ابری و سرد ابری تکرار شده است. در شکل (۱) تا (۳)، به ترتیب مقادیر شدت تابش در شرایط تابش هریزون جهانی (GHI). تابش مستقیم عادی (DNI) و فصل مختلف (diff) نشان داده شد.



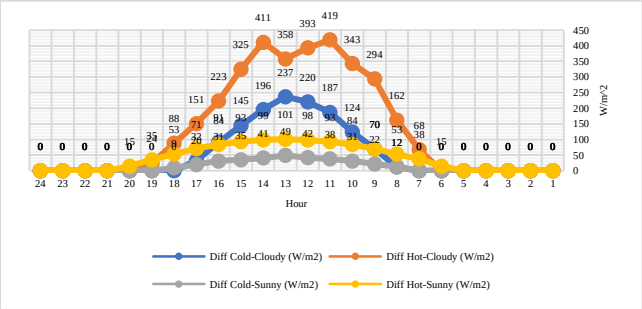
شکل (۱): شدت تابش خورشید در شرایط GHI



شکل (۲): شدت تابش خورشید در شرایط DNI

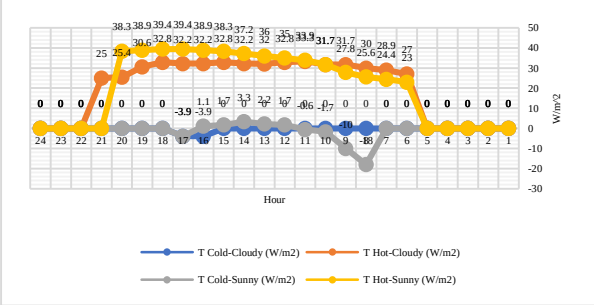


شکل (۳): میزان بار شبکه



شکل (۴): شدت تابش خورشید در شرایط Diff

در ادامه در شکل (۴)، دمای محیط در شرایط مختلف نشان داده شده است.



شکل (۵): دمای محیط در شرایط مختلف

در ادامه، میزان توان الکتریکی درخواستی در ریزشبکه برای ۲۴ ساعت برای چهار وضعیت مختلف، در شکل (۵) به نمایش درآمده است.

هر یک از منابع تولید توان و یا ذخیره توان الکتریکی در ریزشبکه دارای محدودیتی‌های توانی می‌باشند که در جدول (۱) آورده شده است.

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	۰/۹۶	۱/۶۵	۰	۰	۰	-

اندازی ($) هزینه تولید توان ($/KWh)	۰/۴۷۵	۰/۲۹۴	۲/۵۸۴	۱/۰۷۳	۰/۳۸	-

در جدول (۲)، حداقل مقدار منفی باتری به معنای ذخیره سازی انرژی است و همچنین مقدار منفی برای شبکه به معنای فروش برق به شبکه سراسری توسط ریزشبکه می‌باشد.

۶. نتایج

بخش اول: (نتایج بهینه‌سازی برای 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 ۵۰ دفعه اجرا شده که نتایج در جدول (۲)، ثبت شده است.

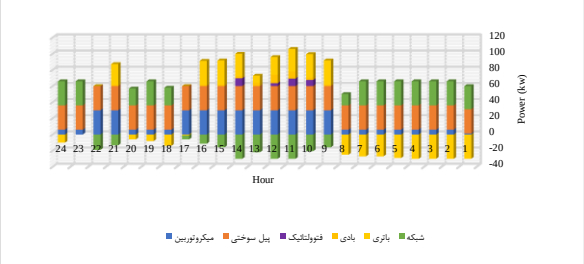
جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی در بخش اول

	زمان شبیه‌سازی (s)	انحراف معیار (€)	میانگین (€)	بدترین پاسخ (€)	بهترین پاسخ (€)
GA	۱۲۵/۵۷	۱۹/۸۵	۳۸۰/۹٤	۳۹۷/۳٤	۳٦۷/٦۹
PSO	۱۲۳/٤۸	۱۸/۰۲	۳۷۹/۵۱	۳۹٦/۰۱	۳٦٦/۰۷
BA	۱۲۲/۷٦	۱٦/۹۷	۳۷۸/۷۸	۳۹٤/۵۹	۳٦٤/٤۲
MBA	۱۲۲/۷٦	۱٦/۹۷	۳۷۸/۷۸	۳۹۳/۵۵	۳٦٤/٤۲
LSA	۱۲۰/۱۱	۱۷/۰۱	۳۷۸/۹۱	۳۹٤/۳٦	۳٦٤/٤۲
CSA	۱۲۵/۱۲	۱٦/۱۱	۳۷٤/٦۹	۳۹۱/۱۷	۳٦۳/۲۱

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 CSA به ترتیب برابر با ۳۶۳/۲۱ و ۳۹۱/۱۷ دلار محاسبه شده است در حالیکه این مقادیر برای الگوریتم GA برابر با ۳۶۷/۶۹ و ۳۸۰/۳۴ دلار حاصل شده است. انحراف معیار برای الگوریتم CSA کمتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی بدست آمده است. در مورد انحراف معیار نیز می‌توان گفت که الگوریتمی که دارای انحراف معیار

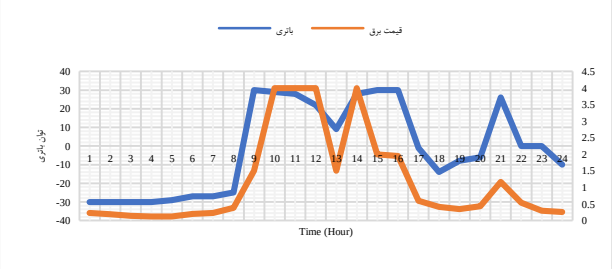
کمتر باشد، دارای عملکرد مناسب‌تر و دقیق‌تری می‌باشد و پاسخ بهینه را به صورت تصادفی بدست نیاورده است که در نتایج بدست آمده مقدار انحراف معیار برای الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته برابر با ۱۶/۱۱ بدست آمده که کمتر از سایر الگوریتم‌ها است.

پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته، مقادیر توان هر یک از المان‌ها تولید پراکنده بدست آمده است. در صورتیکه توان تولیدات پراکنده مطابق با شکل (۶) تعیین شود، مقدار هزینه‌های تامین انرژی در ریزشبکه برای این سناریو حداقل خواهد شد.



شکل (۶): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده در بخش اول

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 (۷) به نمایش در آمده است.



شکل (۷): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف در بخش اول

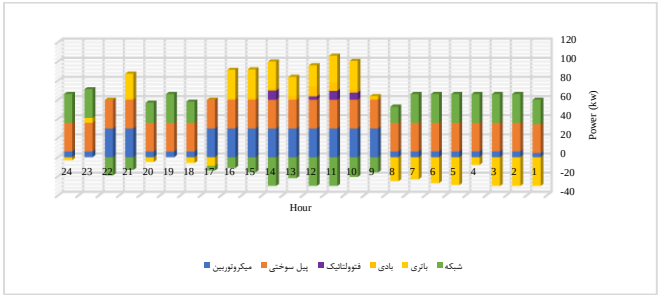
بخش دوم: (نتایج بهینه‌سازی برای یک روز سرد آفتابی)

در قسمت دوم از شبیه‌سازی‌های انجام شده، کاهش هزینه بهره‌برداری از منابع 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 ۵۰ بار اجرا شده و نتایج حاصله در جدول (۳)، یادداشت شده است.

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی در بخش دوم شبیه‌سازی

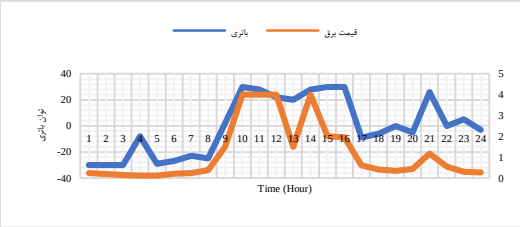
	بهترین پاسخ (€)	بدترین پاسخ (€)	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه-سازی (s)
GA	۲۹۷/۸۳	۳۷۸/۷۸	۳۲۹/۸	۳۷/۷۹	۲۲۱/٦٥
PSO	۲۹٦/۲۱	۳۷۷/٤٥	۳۲۸/۳۷	۳٥/۹۷	۲۱۸/٦٤
BA	۲۹٥/۷٦	۳۷٥/۷٤	۳۲۷/٤٦	۳٤/۳۷	۲۱۷/۱۲
MBA	۲۹۳/٦٥	۳۷٤/۹۹	۳۲٦/۲۱	۳۳/۹۱	۲۱٥/۳٦
LSA	۲۹۳/۹۸	۳۷٥/٤۹	۳۲۷/۱۱	۳٤/٥۸	۲۱۹/٥۱
CSA	۲۹۲/۸٦	۳۷۳/۷۲	۳۲٥/٦۱	۳۳/۲۳	۲۱٤/۱۷

نسبت به سناریو اول، هزینه‌ها کاهش قابل ملاحضه‌ای یافته است که دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش مصرف جستجو کرد. بهترین پاسخ برای الگوریتم پیشنهادی CSA برابر با ۲۹۲/۸۶ یورو محاسبه شده است در حالیکه بهترین پاسخ در اجراهای چندین باره الگوریتک ژنتیک ۲۹۷/۸۳ یورو محاسبه شده است. تقریباً ۵ یورو هزینه‌های ریزشبکه در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم CSA کمتر از زمانی بدست آمده است که از الگوریتم GA برای انجام بهینه‌سازی در ریزشبکه استفاده شد. انحراف معیار بالاتر در این بخش به معنای پراکندگی بیشتر نتایج بهینه‌سازی در سناریو دوم می‌باشد. 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 جستجوی فاخته، در شکل (۸) به صورت نمودارهای میله‌ای، به نمایش درآمده است.



شکل (۸): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده در بخش دوم

همانند سناریو 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 حاصله در سناریو دوم، نمودار قیمت انرژی الکتریکی مبادله شده با شبکه سراسری در هر ساعت و همچنین میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف در بخش دوم

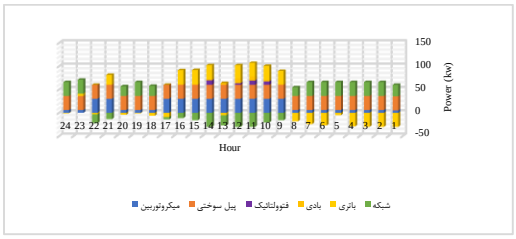
بخش سوم: (نتایج بهینه‌سازی برای یک روز گرم ابری)

در ادامه روند شبیه‌سازی‌ها، در بخش سوم کاهش هزینه بهره‌برداری از منابع در ریزشبکه برای یک روز گرم ابری مورد مطالعه قرار گرفته است. همانند دو سناریو قبل، از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل، اصلاح شده زنبور عسل، جستجوی صاعقه و همچنین الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته برای انجام بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج ۵۰ دفعه اجرای الگوریتم در جدول (۴)، آورده شده است.

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی در بخش سوم

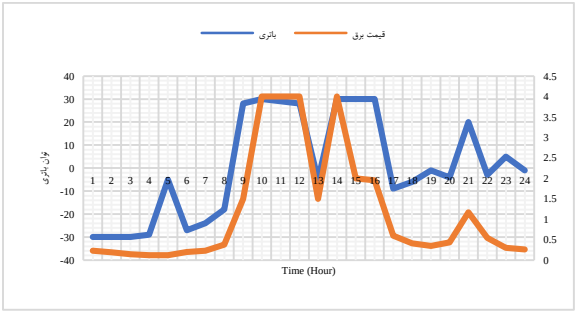
	بهترین پاسخ (€)	(€)بدترین پاسخ	میانگین (€)	انحراف معیار (€)	زمان شبیه‌سازی (s)
GA	۲۷۳/۱۸	۳۰۶/۹٤	۲۹۳/۵۸	۱۸/۸۷	۹۷/٤۲
PSO	۲۷۱/۵٦	۳۰۵/٤٤	۲۹۲/۱٦	۱۷/۰۵	۹۲/۳٦
BA	۲۷۰/٦۱	۳۰٤/۹۷	۲۹۱/۷۳	۱۵/۵۳	۸۷/۲۱
MBA	۲٦۹/٦۱	۳۰۲/۹۸	۲۹۰/۰۰	۱٤/۹۸	۸۵/۳٦
LSA	۲۷۰/۱۱	۳۰۳/۲۸	۲۹۱/۲۱	۱۵/۰٦	۸٦/۲۱
CSA	۲٦۷/۷۷	۳۰۰/۳۸	۲۸۹/٦۱	۱٤/۲۱	۸۵/۲۳

بهترین پاسخ، بدترین پاسخ، میانگین پاسخ‌ها و انحراف معیار در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی جستجوی فاخته (CSA)، به ترتیب برابر با ۲۶۷/۷۷ یورو، ۳۰۰/۳۸ یورو، ۲۸۹/۶۱ یورو و ۱۴/۲۱ بدست آمده است که کمتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد که نشان از برتری الگوریتم CSA نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد. در ادامه در شکل (۴-۱۰)، مقادیر توان تولیدی هرک از منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز به همراه توان مبادله با شبکه سراسری، در هر ساعت به صورت نمودار میله‌ای به نمایش در آمده است.



شکل (۱۰): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده در بخش سوم

همانطور که در شکل فوق نشان داده شده است، تولن میادله شده با شبکه سراسری در ساعت‌های گرانی، منفی می‌باشد که این موضوع به معنای فروش برق به شبکه و افزایش سودآوری برای مالکان ریزشبکه می‌باشد. 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 انجام شده است و دشارژ باتری در ساعت‌های گرانی انجام شده است. در شکل (11)، این مورد نشان داده شده است.



شکل (۱۱): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف در بخش سوم

بخش چهارم: (نتایج بهینه‌سازی برای یک روز سرد ابری)

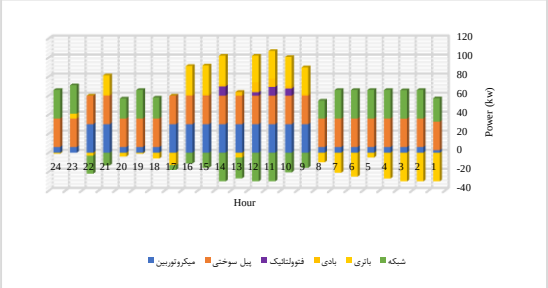
در نهایت در بخش چهارم شبیه‌سازی‌های انجام شده، کاهش هزینه بهره‌برداری در ریزشبکه مورد مطالعه برای یک روز سرد ابری انجام شده است. همانند سه بخش قبلی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تعداد ۵۰ دفعه اجرا شده و نتایج آن‌ها در جدول (۵)، خلاصه شده است.

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی در بخش چهارم

	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

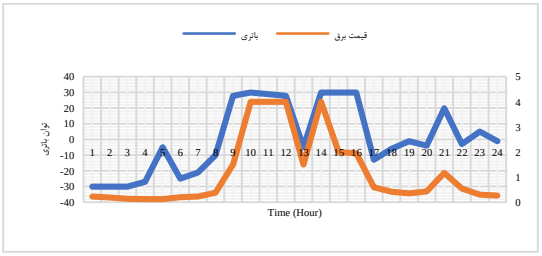
CSA	۲٦٦/۱٤	۳٤۰/۸۳	۲۸۱/۹۰	۱۷/٦۷	۸٤/۱۲

پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی فاخته، بهترین پاسخ در ۵۰ اجرای آن برابر با ۲۶۶/۱۴ یورو محاسبه شد در حالیکه بدترین پاسخ این الگوریتم حدود ۳۴۰/۸۳ یورو محاسبه شد. در حالیکه بهترین پاسخ در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبور عسل، زنبور عسل بهبود یافته و الگوریتم جستجوی صاعقه به ترتیب برابر با ۲۷۱/۵۱ یورو، ۲۶۹/۸۸ یورو، ۲۶۸/۱۷ یورو، ۲۶۷/۳۲ یورو 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، در صورت اجرای بهینه‌سازی توسط الگوریتم CSA به صورت نمودار میله‌ای در شکل (۱۲)، به نمایش درآمده است.



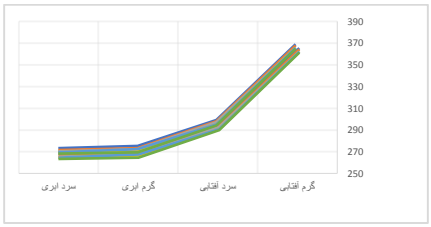
شکل (۱۲): سهم هر یک از منابع تولید پراکنده در بخش چهارم

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 (۱۳) به نمایش در آمده است.



شکل (۱۳): قیمت برق و توان باتری در ساعت‌های مختلف در بخش چهارم

در ادامه در شکل (۱۴)، بهترین پاسخ‌های بدست آمده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط مختلف بهره‌برداری به نمایش درآمده است.



شکل (۱۴): بهترین پاسخ الگوریتم‌ها در شرایط مختلف

بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه منابع تجدید ناپذیر 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 آنجایی که مهمترین هدف استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، کاهش هزینه‌های جاری شبکه است، در نتیجه لازم است تا بررسی های اقتصادی دقیقی برای شبکه‌های توزیع مورد نظر صورت گیرد و مقدار انرژی الکتریکی تولید شده با توجه به سایر پارامترهای شبکه نظیر بارهای مصرفی، هزینه احداث و بهره برداری این نیروگاه‌ها و مقایسه آن با هزینه سوخت مصرفی نیروگاه‌ها و شبکه‌های برق سراسری موجود مد نظر قرار گیرد. از سوی دیگر روند رو به رشد خصوصی‌سازی، رقابتی شدن بازار برق و تبدیل سرمایه‌گذاران بزرگ به سرمایه گذاران 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 بهره برداری توجه کنند.

هدف از انجام این پایان‌نامه مدیریت بهره‌برداری بهینه از یک ریز شبکه 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 ریز شبکه در آن لحاظ شود. به عبارتی 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 (CSA) 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، زنبور عسل 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.

۱. نتیجه گیری

بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه منابع تجدید ناپذیر 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 آنجایی که مهمترین هدف استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، کاهش هزینه‌های جاری شبکه است، در نتیجه لازم است تا

بررسی های اقتصادی دقیقی برای شبکه‌های توزیع مورد نظر صورت گیرد و مقدار انرژی الکتریکی تولید شده با توجه به سایر پارامترهای شبکه نظیر بارهای مصرفی، هزینه احداث و بهره برداری این نیروگاه‌ها و مقایسه آن با هزینه سوخت مصرفی نیروگاه‌ها و شبکه‌های برق سراسری موجود مد نظر قرار گیرد. از سوی دیگر روند رو به رشد خصوصی‌سازی، رقابتی شدن بازار برق و تبدیل سرمایه‌گذاران بزرگ به سرمایه گذاران 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 بهره برداری توجه کنند.

هدف از انجام این مقاله مدیریت بهره‌برداری بهینه از یک ریز شبکه 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 ریز شبکه در آن لحاظ شود. به عبارتی 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 (CSA) 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، زنبور عسل 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.

Reference

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

[2] Ali, S., Zheng, Z., Aillerie, M., Sawicki, J.P., Pera, M.C. and Hissel, D., 2021. A review of DC Microgrid energy management systems dedicated to residential applications. *Energies*, *14*(14), p.4308.

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

[4] Zhou, H., Aral, A., Brandić, I. and Erol-Kantarci, M., 2021. Multiagent Bayesian Deep Reinforcement Learning for Microgrid Energy Management Under Communication Failures. *IEEE Internet of Things Journal*, *9*(14), pp.11685-11698.

[5] Elattar, E.E. and ElSayed, S.K., 2020. Probabilistic energy management with emission of renewable micro-grids including storage devices based on efficient salp swarm algorithm. *Renewable Energy*, *153*, pp.23-35.

[6] Leonori, S., Paschero, M., Mascioli, F.M.F. and Rizzi, A., 2020. Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms. *Applied Soft Computing*, *86*, p.105903.

[7] Alsmadi, Y.M., Abdel-hamed, A.M., Ellissy, A.E., El-Wakeel, A.S., Abdelaziz, A.Y., Utkin, V. and Uppal, A.A., 2019. Optimal configuration and energy management scheme of an isolated micro-grid using Cuckoo search optimization algorithm. *Journal of the Franklin Institute*, *356*(8), pp.4191-4214.

[8] Karimi, H. and Jadid, S., 2020. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework. *Energy*, *195*, p.116992.

[9] Jamal, S., Tan, N.M. and Pasupuleti, J., 2021. A Review of Energy Management and Power Management Systems for Microgrid and Nanogrid Applications. *Sustainability*, *13*(18), p.10331.

[10] Bio Gassi, K. and Baysal, M., 2022. Analysis of a linear programming- based decision- making model for microgrid energy management systems with renewable sources. *International Journal of Energy Research*, *46*(6), pp.7495-7518.

[11] Areekkara, S., Kumar, R. and Bansal, R.C., 2021. An intelligent multi agent based approach for autonomous energy management in a Microgrid. *Electric Power Components and Systems*, *49*(1-2), pp.18-31.

[12] He, X., Liang, X. and Wang, H., 2021. Distributed neurodynamic algorithm for multi-objective problem optimization and its applications to isolated micro-grid energy management. *Sustainable Cities and Society*, *70*, p.102866.

[13] Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E., Sima, C.A., Carnì, D.L. and Martirano, L., 2021. Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, *171*, pp.1115-1127.

[14] Restrepo, M., Cañizares, C.A., Simpson-Porco, J.W., Su, P. and Taruc, J., 2021. Optimization-and rule-based energy management systems at the canadian renewable energy laboratory microgrid facility. *Applied Energy*, *290*, p.116760.

[15] Dashtdar, M., Bajaj, M. and Hosseinimoghadam, S.M.S., 2022. Design of optimal energy management system in a residential microgrid based on smart control. *Smart Science*, *10*(1), pp.25-39.

[16] Arkhangelski, J., Abdou-Tankari, M. and Lefebvre, G., 2021. Day-ahead optimal power flow for efficient energy management of urban microgrid. *IEEE transactions on industry applications*, *57*(2), pp.1285-1293.

[17] Hasankhani, A. and Hakimi, S.M., 2021. Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market. *Energy*, *219*, p.119668.

[18] Fang, X., Zhao, Q., Wang, J., Han, Y. and Li, Y., 2021. Multi-agent deep reinforcement learning for distributed energy management and strategy optimization of microgrid market. *Sustainable Cities and Society*, *74*, p.103163.

[19] Ahmed, D., Ebeed, M., Ali, A., Alghamdi, A.S. and Kamel, S., 2021. Multi-objective energy management of a micro-grid considering stochastic nature of load and renewable energy resources. *Electronics*, *10*(4), p.403.

[20] Chen, T., Cao, Y., Qing, X., Zhang, J., Sun, Y. and Amaratunga, G.A., 2022. Multi-energy microgrid robust energy management with a novel decision-making strategy. *Energy*, *239*, p.121840.

[21] Muqeet, H.A., Munir, H.M., Javed, H., Shahzad, M., Jamil, M. and Guerrero, J.M., 2021. An energy management system of campus microgrids: State-of-the-art and future challenges. *Energies*, *14*(20), p.6525.

[22] Pérez-Flores, A.C., Antonio, J.D.M., Olivares-Peregrino, V.H., Jiménez-Grajales, H.R., Claudio-Sánchez, A. and Ramírez, G.V.G., 2021. Microgrid energy management with asynchronous decentralized particle swarm optimization. *IEEE Access*, *9*, pp.69588-69600.

[23] Luo, L., Abdulkareem, S.S., Rezvani, A., Miveh, M.R., Samad, S., Aljojo, N. and Pazhoohesh, M., 2020. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*, *28*, p.101306.