

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۶

بهینه‌سازی چندهدفه بار مشترکین و منابع انرژی محلی جهت افزایش سودآوری و کاهش آلاینده‌گی ریزشکه هوشمند

مسعود علیلو^۱، بهروز طوسی^{۲*}، حسین شایقی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

masoud.alilou@yahoo.com

^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

b.tousi@urmia.ac.ir

^۳ استاد، مرکز تحقیقات مدیریت انرژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

hshayeghi@gmail.com

چکیده: در این مطالعه، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای بهره‌برداری بهینه از منابع تجدیدپذیر و باتری در یک ریزشکه در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. توربین بادی و پنل فتوولتائیک منابع تجدیدپذیر ریزشکه هستند. از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار زمان استفاده و قیمت‌گذاری اوج بحرانی نیز برای بهبود الگوی مصرف مشترکین ریزشکه استفاده شده است. حداکثرسازی سود بهره‌بردار ریزشکه از فروش برق و حداقل‌سازی میزان تولید گازهای آلاینده از منابع انرژی به‌عنوان توابع هدف مسئله مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده‌اند. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه برای بهینه‌سازی نامغلوب شاخص‌های ریزشکه و ایجاد صفحه بهینه پارتو استفاده می‌شود. پس از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، از روش فازی برای انتخاب بهترین ذره که معادل با بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از ریزشکه است، استفاده می‌شود. در نهایت، کارایی روش پیشنهادی در یک ریزشکه نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان‌دهنده این موضوع هستند که روش پیشنهادی با اصطلاح الگوی مصرف و بهینه‌سازی بهینه واحدهای تجدیدپذیر و باتری، کارایی ریزشکه را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی نه تنها باعث افزایش سودآوری شرکت بهره‌بردار ریزشکه می‌شود، بلکه میزان آلاینده‌گی زیست‌محیطی ریزشکه نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، برنامه پاسخ‌گویی بار، بهینه‌سازی چندهدفه، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی، مسائل زیست‌محیطی.

۱. مقدمه

در سال‌های گذشته، مفهوم ریزشبه به‌عنوان یک روش کاربردی برای مدیریت بهتر شبکه برق معرفی شده است. ریزشبه‌ها با ایجاد ارتباط دوطرفه بین تأمین‌کنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم برق را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، منابع انرژی موجود در ریزشبه وابستگی آن را به انرژی الکتریکی شبکه بالادست کاهش می‌دهند [۱]. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های ریزشبه امکان اعمال مناسب برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در این نوع شبکه‌هاست. برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا به کارهایی اطلاق می‌شوند که در بخش مصرف یا همان سیستم توزیع شبکه برق اعمال می‌گردند و با مدیریت بهینه مصرف و همچنین تولید محلی در آن، باعث افزایش رضایت مشترکین و بهبود بهره‌وری کل سیستم الکتریکی می‌شوند [۲].

منابع انرژی محلی ریزشبه تأثیر بسزایی در کارایی آن دارند. منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر همچون توربین بادی و پنل فتوولتائیک به دلیل دارا بودن تکنولوژی سبز از جذابیت بیشتری در ریزشبه‌ها نسبت به واحدهای تجدیدپذیر برخوردارند. منابع تجدیدپذیر تقریباً در همه‌جا در دسترس بوده، دارای هزینه تولید انرژی پایین‌تری هستند و مهم‌تر از همه، انرژی الکتریکی را بدون تولید هرگونه آلودگی محیط‌زیستی تولید می‌کنند [۳]. اگرچه تمایل به استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به دلیل مزایایی که دارند، روزانه در حال افزایش است، یکی از مهم‌ترین معایب آن‌ها مسئله عدم اطمینان در تولید انرژی الکتریکی آن‌هاست. استفاده از باتری یا سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی یکی از روش‌های عملی برای رفع این مشکل است. استفاده از باتری در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر، وابستگی ریزشبه به شبکه بالادست و همچنین تولید گازهای آلاینده را کاهش می‌دهد. در واقع، توان تولیدشده مازاد واحدهای تجدیدپذیر در زمان‌هایی که بار مصرفی مشترکین کم است، می‌تواند در باتری ذخیره شود. سپس در زمان‌هایی که منابع تجدیدپذیر پاسخ‌گوی نیاز ریزشبه نیستند، می‌توان از انرژی ذخیره‌شده در باتری استفاده کرد [۴-۵]. البته، برای تطبیق بهتر الگوی تولید و مصرف ریزشبه، می‌توان از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استفاده کرد. اگرچه برنامه پاسخ‌گویی بار یک مفهوم جدید برای مصرف‌کنندگان مسکونی است، واحدهای صنعتی و تجاری همیشه جزئیات مصرف انرژی الکتریکی خود را به دلیل مسائل اقتصادی مدیریت می‌کنند. در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، با اعمال قیمت‌های متغیر برق یا برخی پاداش‌ها انگیزه مصرف‌کنندگان برای کنترل تقاضای الکتریکی‌شان افزایش می‌یابد [۶-۷].

در سال‌های گذشته، مطالعات متعددی در حوزه مدیریت انرژی ریزشبه‌های هوشمند انجام گرفته شده است که در حالت کلی می‌توان آن‌ها را به سه دسته مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده، مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، مدیریت بار ریزشبه با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تقسیم کرد که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره شده است.

الف. مطالعات حوزه مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده: در برخی از مقالات، برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌ها به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است. در این نوع از مطالعات برای پاسخ‌گویی به منحنی تقاضای شبکه از واحدهای تولید انرژی موجود در ریزشبه به‌همراه شبکه بالادست به‌نحوی استفاده می‌شود که وابستگی ریزشبه به شبکه بالادست به حداقل برسد. برای مثال، در مرجع [۸]، ظرفیت‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده در حضور الگوهای مصرفی مختلف انجام شده است. به‌عبارت دیگر، در این پژوهش با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و سیستم مدیریت بهینه انرژی منزل، ظرفیت بهینه پنل‌های خورشیدی محاسبه شده است. برای بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی منازل ریزشبه از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده شده است. در پژوهشی دیگر، بهینه‌سازی ظرفیت منابع تولید پراکنده در یک ریزشبه در دو حالت مستقل و متصل به شبکه برای حداقل‌سازی هزینه سالانه تلفات انرژی و هزینه تولید انرژی انجام شده است [۹]. منابع تولید پراکنده مورد مطالعه قرار گرفته‌شده به دو نوع کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر تقسیم می‌شوند که تکنولوژی بیوماس به‌عنوان منبع قابل کنترل و توربین بادی و فتوولتائیک به‌عنوان منابع غیرقابل کنترل در نظر گرفته شده‌اند. از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی برای حل مسئله استفاده شده است. در مطالعه‌ای مشابه، یک طراحی ریزشبه جریان متناوب/جریان مستقیم برای بهبود استفاده از منابع تولید پراکنده و کاهش وابستگی ریزشبه به شبکه بالادست پیشنهاد شده است [۱۰]. در این مطالعه، ریزشبه در هر دو حالت اتصال به شبکه و مستقل از آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. پژوهشگران در مرجع [۱۱]، بهره‌برداری بهینه از منابع تولید پراکنده برای افزایش بهره‌وری ریزشبه در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را مطالعه کرده‌اند. مدل احتمالی سرعت باد، تابش خورشید و بار شبکه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی احتمالی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. برای بهینه‌سازی توابع هدف شامل حداقل‌سازی تلفات زیست‌محیطی و هزینه بهره‌برداری، از الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات استفاده شده است. در مرجع [۱۲]، مدیریت نوع و انرژی انواع منابع تولید پراکنده در یک ریزشبه مورد مطالعه قرار گرفته شده است. ریزشبه همچنین

بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری از باتری‌ها در یک ریزشبه در حضور پنل‌های فتولتائیک در مرجع [۱۷] مورد مطالعه قرار گرفته شده است. برنامه شارژ و دشارژ باتری‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌نحوی بهینه‌سازی می‌شوند که هزینه‌های قبض پرداختی مشترکین حداقل شود. بار شبکه به دو صورت قطعی و احتمالی در نظر گرفته شده‌اند که با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مدیریت می‌شوند. در مطالعه‌ای دیگر، مدیریت سمت مصرف در منازل ریزشبه در حضور باتری‌ها انجام شده است [۱۸]. کاهش هزینه‌های مشترکین و کاهش اضافه‌بار شبکه به‌عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه، برای کنترل اتوماتیک باتری‌ها، شرایط در دسترس بودن پنل‌های خورشیدی و هزینه برق خریداری شده از شبکه مدنظر قرار گرفته شده است. در مطالعه‌ای مشابه، به دست آوردن برنامه بهره‌برداری بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی منازل ریزشبه برای حداقل‌سازی هزینه‌های قبض مشترکین انجام شده است [۱۹]. در مرجع [۲۰] نیز پژوهشگران از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای یافتن بهترین ترکیب باتری و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن براساس هزینه، منطقه اشغال شده و میزان آلودگی محلی استفاده کرده‌اند. حداقل‌سازی هزینه کل سیستم توزیع و حداکثرسازی پایداری شبکه به‌عنوان توابع هدف مدیریت سیستم‌های ذخیره‌ساز ریزشبه مدنظر قرار گرفته شده‌اند.

ج. مطالعات حوزه مدیریت بار ریزشبه با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار: مطالعه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و به‌عبارتی مدیریت بار ریزشبه‌ها و تأثیر الگوی تقاضای بار بر روی بهره‌وری ریزشبه توسط برخی پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در مرجع [۲۱]، یک مطالعه اجمالی در مورد مدیریت سمت تقاضا و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انجام شده است. به‌عبارت دیگر، در این مطالعه انواع روش‌های پاسخ‌گویی بار برای افزایش مشارکت مشترکین در مدیریت مصرف مورد مطالعه قرار گرفته و راهکارهای تطبیق مصرف با تولید در سیستم‌های توزیع ارائه شده است. شکوری و کاظمی در مرجع [۲۲]، اصلاح الگوی مصرف مشترکین مسکونی با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برای کاهش بار پیک و هزینه قبض مشترکین را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در روش پیشنهادی فرض شده است که هرکدام از مشترکین مسکونی می‌توانند به‌صورت مستقل برنامه پاسخ‌گویی بار خود را تنظیم کنند. برای حل روش پیشنهادی از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده شده است. پژوهشگران در مرجع [۲۳] نیز مدیریت سمت مصرف در یک ریزشبه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هدف اصلی در این مقاله، کاهش پیک بار مشترکین مسکونی است؛ برای اجرای این امر، از استراتژی دینامیکی قیمت که تابعی از کل

دارای سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی نیز می‌باشد. از یک تابع چندهدفه که شامل هزینه‌های کل شبکه بوده و دربرگیرنده هزینه‌های سرمایه‌گذاری، اتصال، بهره‌برداری، نگهداری، تلفات، پاداش‌ها و جریم و همچنین قرارداد بین صاحب ریزشبه و شرکت محلی است، برای مدیریت انرژی انواع منابع ریزشبه استفاده شده است. پژوهشگران در مرجع [۱۳]، روشی نوین برای مدیریت انرژی منابع تولید پراکنده یک ریزشبه در حضور زیرساخت‌های انرژی دیگر و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، منابع تجدیدپذیر و قیمت برق ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، ریزشبه‌ها به‌نحوی در نظر گرفته شده‌اند که قابلیت تبادل انرژی بین ریزشبه‌ها و همچنین بین ریزشبه و شبکه بالادست وجود دارد. در مطالعه‌ای دیگر، یک استراتژی بهینه‌سازی ترکیبی برای پیدا کردن بهترین نوع ترکیب و همچنین ظرفیت بهینه انواع منابع تولید پراکنده در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در یک ریزشبه ارائه شده است [۱۴]. مسائل قابلیت اطمینانی و تأمین انرژی کل مشترکین به‌عنوان اهداف اصلی در بهینه‌سازی منابع ریزشبه مدنظر قرار گرفته شده‌اند. از ترکیب برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط و الگوریتم هوشمند ژنتیک برای حل مسئله استفاده شده است. در مطالعه‌ای مشابه، قابلیت اطمینان ریزشبه با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی تولیدی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مورد ارزیابی قرار گرفته شده است [۱۵]. برای مدل‌سازی عدم قطعیت منابع از تابع چگالی احتمال استفاده شده است. برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه در هنگام وقوع خطا از بازآرایی شبکه نیز استفاده شده است؛ البته در شرایطی که امکان بازآرایی شبکه وجود ندارد، با کاهش یا قطع کردن بار برخی شین‌ها قیود پایداری شبکه رعایت شده است.

ب. مطالعات حوزه مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی: گروهی دیگر از مقالات نیز مطالعاتی هستند که مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در یک ریزشبه را به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته‌اند. در این مطالعات که هدف اصلی‌شان رسیدن به بهینه‌ترین برنامه شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی است، پارامترهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مدنظر قرار می‌گیرند. برای مثال، در مرجع [۱۶]، یک مدل برنامه‌ریزی دوطرفه برای بهینه‌سازی مکان و اندازه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاهش محدودیت‌های توربین بادی ارائه شده است. تابع هدف در نظر گرفته‌شده، سود حاصل از بهره‌برداری از باتری در مزرعه بادی یا محل مصرف است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد زمانی که از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در محل مصرف استفاده می‌شود، نسبت به بهره‌برداری در مزرعه بادی سود بیشتری به دست آورده می‌شود.

بخش‌های مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده‌اند که ابتدا در بخش‌های ۲ و ۳ به ترتیب منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی توضیح داده شده‌اند. در بخش ۴ به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. روش پیشنهادی برای مدیریت منابع انرژی شامل توابع هدف، محدودیت‌ها و الگوریتم هوشمند در بخش ۵ توضیح داده شده است. در بخش ۶ نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری ارائه شده و نتیجه‌گیری نهایی نیز در بخش ۷ آورده شده است.

۲. منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

تولید انرژی الکتریکی در یک ریزشکه تأثیر زیادی در عملکرد آن دارد. در هنگام استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز سیستم، مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشکه به‌میزان قابل توجهی بهبود می‌یابند زیرا انرژی تولیدشده آن‌ها سازگار با محیط‌زیست بوده و بهره‌بردار ریزشکه نیز نیاز کمتری به خرید انرژی از شبکه بالادست دارد. در ادامه به جزئیات واحدهای تجدیدپذیر در نظر گرفته‌شده، پرداخته شده است.

۲.۱. پنل خورشیدی

پنل‌های فتوولتائیک یکی از واحدهای پرکاربرد تجدیدپذیر برای تأمین انرژی الکتریکی به‌ویژه در مناطق مسکونی هستند زیرا در اندازه‌های مختلف موجود هستند و می‌توانند در مناطق و شرایط مختلف مورد بهره‌برداری قرار گیرند. این تکنولوژی به‌طور مستقیم نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان الکتریکی تولیدشده آن به‌میزان تابش خورشید، مساحت و کارایی پنل فتوولتائیک بستگی دارد. باید به این نکته اشاره کرد که توان خروجی آن به‌دلیل رفتار متغیر تابش خورشیدی در زمان‌های مختلف ناپایدار است. برای محاسبه توان الکتریکی تولیدشده توسط پنل فتوولتائیک می‌توان از معادله (۱) استفاده کرد [۱۱].

$$Power_{PV} = A_{PV} \beta \mu \quad (1)$$

در این رابطه، A_{PV} و β به ترتیب مساحت پنل فتوولتائیک و بازده آن را نشان می‌دهند. پارامتر μ میزان تابش خورشید است که در زمان‌های مختلف همچون ساعات روز و ماه‌ها متغیر است.

۲.۲. توربین بادی

در بیشتر کشورهای پیشگام در زمینه انرژی‌های پاک، توربین بادی یکی از تکنولوژی‌های تجدیدپذیر پرکاربرد برای تولید برق است. توربین بادی انرژی الکتریکی را از انرژی باد تولید می‌کند. سرعت باد، مساحت گردش پره‌های توربین، چگالی هوا و شکل، اندازه و ضریب توان

مصرف مشترکین بوده، استفاده شده است. برای به دست آوردن بهترین برنامه برای مدیریت مصرف مشترکین از روش نظریه‌بازی غیر تعاونی استفاده شده که هدف رسیدن به نقطه تعادل نش است. در مقاله‌ای دیگر، یک روش دومرحله‌ای برای مدیریت بار ریزشکه پیشنهاد شده است [۲۴]. در مرحله اول، هر مشترک با توجه به برنامه پاسخ‌گویی بار و قیمت بازار برق، برنامه استفاده از تجهیزات منزل و هزینه برق پرداختی را بهینه‌سازی کرده و آن‌ها را به اپراتور سیستم ارسال می‌کند. در مرحله دوم، یک بهینه‌سازی چندهدفه با توجه به اطلاعات حاصل از مرحله اول، برای بهبود شاخص‌های فنی انجام می‌گیرد. در نتیجه این دو مرحله، بهینه‌ترین برنامه برای بهره‌برداری از بار مشترکین حاصل می‌شود.

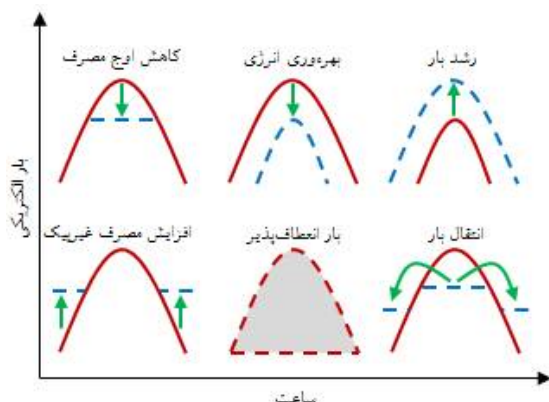
با توجه به تحقیقات قبلی می‌توان مشاهده کرد که بهینه‌سازی چندهدفه مدیریت دو سمت تولید و مصرف یک ریزشکه هوشمند در حضور فناوری‌های تجدیدپذیر موضوعی است که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین دلیل، برنامه‌ریزی چندهدفه منابع انرژی محلی یک ریزشکه با حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله نوآوری‌های روش پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مدیریت چندهدفه هر دو بخش تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی الکتریکی در یک ریزشکه؛
 - استفاده از یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه و روش تصمیم‌گیری فازی برای بهینه‌سازی توابع هدف اقتصادی-زیست‌محیطی به‌منظور یافتن بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از ریزشکه؛
- بنابراین در این مطالعه یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای بهره‌برداری بهینه توربین بادی، پنل فتوولتائیک و باتری در یک ریزشکه در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته‌شده برای بهبود الگوی مصرف مشترکین عبارت‌اند از: برنامه زمان استفاده و قیمت‌گذاری اوج بحرانی. حداکثرسازی سود بهره‌بردار ریزشکه از فروش الکتریسیته و حداقل‌سازی گازهای آلاینده منتشر از تمام منابع انرژی به‌عنوان توابع هدف مسئله مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده‌اند. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه برای بهینه‌سازی شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشکه استفاده می‌شود. پس از به دست آوردن صفحه پارتو یا به عبارتی ذرات بهینه نامغلوب، از روش فازی برای انتخاب بهترین نتیجه که معادل با بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از ریزشکه است، استفاده می‌شود.

حداکثر میزان قابل دشارژ ذخیره‌ساز در یک بازه زمانی نیز توسط R_B^{Dis} بیان شده است. پارامترهای η_B^{Ch} و η_B^{Dis} نیز به ترتیب بازده شارژ و دشارژ باتری را نشان می‌دهند.

۴. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

امروزه افزایش نقش مشتریان در مدیریت شبکه برق یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم است، زیرا گاهی اوقات تغییرات ناگهانی مصرف و همچنین تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان مصرف در طول شبانه‌روز مشکلاتی را برای تأمین‌کننده انرژی الکتریکی شبکه ایجاد می‌کند. در این روش، مصرف‌کنندگان براساس سیگنال‌های دریافت‌شده از سوی بهره‌بردار سیستم، میزان مصرف خود را کنترل می‌کنند. این سیگنال‌ها می‌توانند مبتنی بر قیمت یا مبتنی بر پاداش باشند. در حالت کلی، به این روش، برنامه پاسخ‌گویی بار گفته می‌شود. عمده مزایای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۷].



شکل (۱): مزایای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

در این مطالعه، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت یا زمان در نظر گرفته شده‌اند. معادله (۸) مدل ریاضی این نوع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را نشان می‌دهد. در این معادله، $D_0(i)$ و $D(i)$ به ترتیب تقاضای مصرف انرژی الکتریکی ریزشبه قبل و بعد از اعمال برنامه پاسخ‌گویی بار هستند. پارامترهای $Pr_0(i)$ و $Pr(i)$ نیز قیمت‌های بازار برق قبل و بعد از اعمال پاسخ‌گویی بار می‌باشند، درحالی‌که، $E(i,i)$ و $E(i,j)$ نیز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر کشسانی خودی و متقابل هستند.

$$D(i) = D_0(i) \times \left[1 + E(i,i) \frac{Pr(i) - Pr_0(i)}{Pr_0(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} E(i,j) \frac{Pr(j) - Pr_0(j)}{Pr_0(j)} \right] \quad (8)$$

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار زمان استفاده^۱ (TOU) و قیمت‌گذاری

توربین بر میزان توان خروجی توربین بادی تأثیر می‌گذارند. البته توان تولیدشده توربین بادی نیز با توجه به رفتار ناپایدار سرعت باد متغیر است. رابطه (۲) برای محاسبه توان خروجی توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].

$$Power_{WT} = \frac{1}{2} \rho A_{wt} V_{wind}^3 C_p \quad (2)$$

در معادله (۲)، A_{wt} مساحت منطقه جاروب‌شده توسط پره‌های توربین بوده و C_p ضریب بهره‌وری آن را نشان می‌دهد. پارامترهای ρ و V_{wind} نیز به ترتیب نشان‌دهنده سرعت باد و میزان چگالی هوا هستند.

۳. سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری)

همان‌طور که در بخش ۲ نیز ذکر شد، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر رفتار ناپایداری دارند؛ سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی یکی از روش‌های عملی برای کاهش اثر ناپایداری برق تولیدشده توسط فناوری‌های تجدیدپذیر هستند. باتری‌ها این قابلیت را دارند که انرژی الکتریکی اضافی تولیدشده ریزشبه را برای توزیع به شبکه در زمان‌هایی که تقاضای الکتریکی بیشتر از تولید است، ذخیره کنند. بنابراین پایداری و استقلال ریزشبه به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۲۶].

برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌ساز انرژی تأثیر زیادی در عملکرد آن دارد. به همین دلیل شرایطی وجود دارد که باید در انتخاب برنامه شارژ و دشارژ باتری مورد توجه قرار گیرند. این شرایط در معادلات (۳) تا (۷) قابل مشاهده هستند. معادله (۳) بیان می‌کند که شارژ و دشارژ باتری به‌صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نیست. محدودیت ظرفیت انرژی کل باتری در رابطه (۴) نشان داده شده است. حداکثر مقادیر قابل شارژ و دشارژ باتری به ترتیب در معادلات (۵) و (۶) بیان شده‌اند. معادله (۷) نیز نشان می‌دهد که وضعیت انرژی کل در هر بازه زمانی متشکل از انرژی باقی‌مانده از بازه زمانی قبلی، توان تبادل‌شده با ریزشبه و بازده است.

$$X_t^{B,Ch} + X_t^{B,Dis} \leq 1 \quad (3)$$

$$SOE_B^{min} \leq SOE_t^B \leq SOE_B^{max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_t^{B,Ch} \leq R_B^{Ch} \quad (5)$$

$$0 \leq P_t^{B,Dis} \leq R_B^{Dis} \quad (6)$$

$$SOC_t^B = SOC_{t-1}^B + (P_t^{B,Ch} \times \eta_B^{Ch}) - (P_t^{B,Dis} \times \eta_B^{Dis}) \quad (7)$$

در این روابط، $X_t^{B,Dis}$ و $X_t^{B,Ch}$ یک متغیر باینری (۰ و ۱) هستند که به ترتیب حالت شارژ و دشارژ باتری را نشان می‌دهند. پارامتر SOC_t^B نشان‌دهنده وضعیت انرژی باتری در بازه زمانی t است. حداکثر میزان قابل شارژ باتری در بازه زمانی t با R_B^{Ch} نشان داده شده درحالی‌که

شامل واحدهای تجدیدپذیر و باتری بوده است. از رابطه (۹) برای محاسبه سود روزانه بهره‌بردار ریزشبه استفاده می‌شود.

$$Prof_R = P_{MG} + P_G - C_G - C_{REU} - C_B \quad (9)$$

معادله (۱۰) برای محاسبه درآمد حاصل از فروش انرژی به مصرف‌کنندگان ریزشبه (PMG) استفاده می‌شود. درآمد حاصل از فروش توان تولید اضافی واحدهای تجدیدپذیر به شبکه بالادست (PG) توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در صورتی که توان تولید واحدهای تجدیدپذیر و همچنین انرژی ذخیره‌شده در باتری کمتر از نیاز الکتریکی ریزشبه باشد، بهره‌بردار ریزشبه باید از شبکه بالادست برق بخرد. هزینه انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. اگرچه توربین بادی و پنل فتوولتائیک هیچ هزینه‌ای برای تولید برق ندارند، هزینه‌ای ترکیبی شامل هزینه‌های نصب، نگهداری و بهره‌برداری در روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه توان تولیدشده توسط واحدهای تجدیدپذیر در معادله (۱۳) بیان شده است. معادله (۱۴) نیز برای محاسبه هزینه انرژی ذخیره‌شده در باتری استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ذخیره‌ساز انرژی متعلق به شرکت توزیع ریزشبه بوده، دشارژ آن هزینه اضافی برای ریزشبه ندارد.

$$P_{MG} = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^H P_{ij}^D \times Pr_j^M \quad (10)$$

$$P_G = \sum_{j=1}^H P_j^G \times Pr_j^G \quad (11)$$

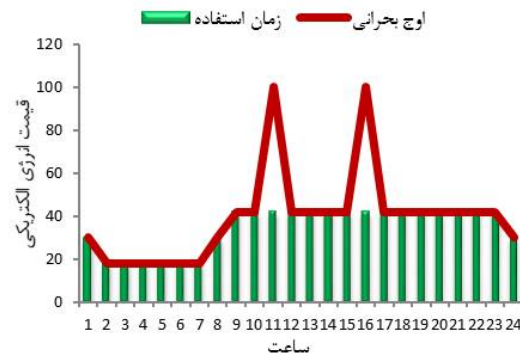
$$C_G = \sum_{j=1}^H P_j^{G-MG} \times Pr_j^{G-MG} \quad (12)$$

$$C_{REU} = \sum_{s=1}^{n_t} \sum_{i=1}^{n_R} \sum_{j=1}^H P_{sij}^{REU} \times Pr_s^{REU} \quad (13)$$

$$C_B = \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^H P_{Bij}^{Ch} \times Pr_j^{G-MG} \quad (14)$$

در این روابط، n_c و n_t به ترتیب تعداد مشترکین و میزان مصرف آن‌ها در هر بازه زمانی را نشان می‌دهند. پارامتر Pr_j^M قیمت بازار برق در بازه زمانی j بوده و H نیز تعداد بازه‌های زمانی در یک شبانه‌روز است. P_j^G و Pr_j^G به ترتیب میزان انرژی فروخته‌شده به شبکه بالادست و قیمت برق قراردادی در بازه زمانی j هستند. P_j^{G-MG} و Pr_j^{G-MG} نیز به ترتیب انرژی الکتریکی خریداری‌شده از شبکه بالادست و قیمت برق خریداری‌شده در فاصله زمانی j را نشان می‌دهند. n_R و P_{Sij}^{REU} تعداد واحدهای تجدیدپذیر استفاده‌شده برای تولید انرژی و ظرفیت تولیدشده آن‌ها در بازه زمانی j را نشان می‌دهند. Pr_s^{REU} نیز قیمت تولید انرژی

اوج بحرانی^۱ (CPP) برای بهبود الگوی مصرف در ریزشبه مورد مطالعه قرار خواهند گرفته است. برنامه زمان استفاده برای ایجاد تعادل در بین تقاضا و تولید الکتریسیته و دستیابی به منافع مالی، مصرف‌کنندگان را به استفاده از انرژی الکتریکی بیشتری در مواقع غیراوج تشویق می‌کند. این برنامه نرخ‌های ارزان‌تری را در مواقع مشخصی از ۲۴ ساعت که بار شبکه در کمترین حد خود قرار دارد، ارائه می‌کند و از طرف دیگر در زمان‌هایی که میزان مصرف در بالاترین سطح قرار دارد، نرخ‌های بالاتری را پیشنهاد می‌کند. طبق برنامه پاسخ‌گویی بار قیمت‌گذاری اوج بحرانی نیز قیمت بازار بر اساس الگوی مصرف شبکه تغییر می‌کند. تفاوت این برنامه با برنامه زمان استفاده در این است که در برنامه اوج بحرانی، در ساعاتی که مصرف خیلی زیاد می‌باشد، قیمت بازار برق نیز چندین برابر قیمت متوسط است. قیمت‌های نمونه بازار برق ریزشبه تحت برنامه‌های زمان استفاده و اوج بحرانی در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل (۲): قیمت‌های نمونه بازار در برنامه‌های زمان استفاده و اوج بحرانی

۵. روش پیشنهادی برای مدیریت چندهدفه منابع انرژی

در این مطالعه از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شایر مورچه و روش تصمیم‌گیری فازی برای بهینه‌سازی توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبه با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌ها به منظور انتخاب بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری ریزشبه استفاده شده است. در ادامه، توابع هدف، محدودیت‌ها و الگوریتم هوشمند کاملاً شرح داده شده است.

۵.۱. توابع هدف

سود بهره‌بردار ریزشبه: حداکثر سازی سود بهره‌بردار ریزشبه از فروش انرژی الکتریکی به مشترکین و شبکه بالادست به‌عنوان شاخص اقتصادی برنامه مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده است. بهره‌بردار ریزشبه صاحب منابع انرژی موجود در ریزشبه است که

1. Critical Peak Pricing Program

توسط منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهند.

۵.۳. الگوریتم بهینه‌سازی

در سال‌های گذشته، الگوریتم‌های هوشمند به‌عنوان سریع‌ترین و دقیق‌ترین روش برای حل مسائل غیرخطی مهندسی معرفی شده‌اند. در این مطالعه نیز از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه و روش تصمیم‌گیری فازی برای بهینه‌سازی همزمان توابع هدف و انتخاب بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از منابع انرژی در یک ریزشبکه استفاده شده است. نحوه استفاده از این الگوریتم‌ها برای حل مسئله مدیریت انرژی بدین صورت است که ابتدا از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه برای بهینه‌سازی همزمان و نامغلوب توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبکه بر اساس مقارن‌دهی اولیه ذرات و به‌روزرسانی آن‌ها استفاده می‌شود. در هر مرحله از تکرار الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه تا رسیدن به آخرین تکرار، ذرات به‌صورت نامغلوب با استفاده از روابط مربوط به الگوریتم شیرمورچه به‌روزرسانی می‌شوند [۲۸]. در انتهای اعمال الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه، صفحه بهینه پارتو به دست می‌آید. سپس، روش تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب بهترین ذره از میان ذرات موجود در صفحه بهینه پارتو که معادل با بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از ریزشبکه هوشمند است، استفاده می‌شود [۲۹]. در شکل (۳) نحوه انتخاب بهترین ذره توسط روش تصمیم‌گیری فازی از میان ذرات موجود در صفحه بهینه پارتو حاصل شده از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه نشان داده شده است.



شکل (۳): انتخاب بهترین ذره از صفحه بهینه پارتو (حاصل از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه) توسط روش تصمیم‌گیری فازی

الکتریکی توسط تکنولوژی در نظر گرفته شده است. n_B و P_{Bij}^{Ch} به ترتیب تعداد ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی استفاده‌شده و انرژی شارژ آن‌ها در فاصله زمانی t هستند.

میزان تولید گازهای آلاینده ریزشبکه: با توجه به افزایش جمعیت و استفاده بیش از حد از انرژی‌های فسیلی، وضعیت زیست‌محیطی جهان روزبه‌روز در حال بدتر شدن است. از این رو حداقل‌سازی میزان تولید گازهای آلاینده ریزشبکه به‌عنوان یکی از توابع هدف مسئله مدیریت منابع ریزشبکه در نظر گرفته شده است. این شاخص میزان تولید گازهای آلوده‌کننده محیط‌زیست توسط منابع مختلف انرژی شامل واحدهای تجدیدپذیر، باتری و شبکه بالادست را در طول شبانه‌روز محاسبه می‌کند. رابطه (۱۵) برای محاسبه این شاخص زیست‌محیطی استفاده می‌شود.

$$Poll_r = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_{unit}} \sum_{j=1}^{n_G} P_{unit_i}(h) \times PG_{ij} \quad (15)$$

در این رابطه، n_{unit} تعداد منابع انرژی مورد استفاده برای تأمین انرژی مورد نیاز ریزشبکه را نشان می‌دهد که شامل منابع تجدیدپذیر، باتری‌ها و شبکه بالادست است. n_G نیز تعداد گازهای آلوده‌کننده در نظر گرفته شده است. پارامترهای P_{unit_i} و PG_{ij} نیز به ترتیب توان تولیدشده هر منبع انرژی و میزان آلاینده‌گی آن بر اساس گاز آلوده‌کننده خاص را نشان می‌دهند.

۵.۲. قیود مسئله

توابع هدف مسئله مدیریت منابع ریزشبکه در حضور برخی محدودیت‌ها بهینه می‌شوند. یکی از قیود که در رابطه (۱۶) نشان داده شده، بیانگر این است که همواره باید تعادلی بین میزان تولید انرژی الکتریکی و مصرف آن در ریزشبکه وجود داشته باشد. محدودیت دیگر مربوط به حداقل و حداکثر توان الکتریکی تولیدشده در منابع انرژی تجدیدپذیر است. معادله (۱۷) این قید را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i=1}^{n_{REU}} E_{RU_i} + E_{G_MG} + E_{B,Dis} = \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n E_{MG_j} + E_{MG_G} + E_{B,Ch} \quad (17)$$

$$P_{RGU}^{min} \leq P_{RGU_i} \leq P_{RGU}^{max}$$

در رابطه (۱۶)، E_{RU_i} ، E_{G_MG} و $E_{B,Dis}$ به ترتیب انرژی الکتریکی تولیدشده توسط انواع منابع تجدیدپذیر، انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست و انرژی دشارژشده باتری هستند. پارامترهای E_{MG_j} ، E_{MG_G} و $E_{B,Ch}$ نیز به ترتیب انرژی مورد نیاز همه مشترکین، انرژی فروخته‌شده به شبکه بالادست و انرژی شارژشده در باتری را نشان می‌دهند. در معادله (۱۷)، P_{RGU}^{min} و P_{RGU}^{max} نیز به ترتیب حداکثر و حداقل توان قابل تولید

سرعت همگرایی سریع و کارآمدی مناسبی برای حل مسائل غیرخطی و پیچیده مهندسی است. با توجه به این مزایا، از الگوریتم چندهدفه شیرمورچه برای بهینه‌سازی چندهدفه شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی مسئله مدیریت منابع ریزشبه استفاده شده است. برای مطالعه بیشتر در مورد نحوه کار این الگوریتم چندهدفه پیشنهاد می‌شود به مرجع [۲۸] مراجعه شود. پس از اعمال الگوریتم چندهدفه، روش فازی برای یافتن بهترین راه‌حل از بین نتایج نامغلوب (صفحه پارتو) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روش فازی، انتخاب بهینه‌ترین ذره بر اساس مقدار عضویت ذرات انجام می‌گیرد به نحوی که هر ذره‌ای که بیشترین مقدار را داشته باشد به‌عنوان بهترین راه‌حل انتخاب می‌شود. مقدار عضویت ذرات با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند [۲۹].

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{NK} \sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k} \quad (18)$$

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & F_i^k \leq F_i^{min} \\ \frac{F_i^{max} - F_i^k}{F_i^{max} - F_i^{min}} & F_i^{min} < F_i^k < F_i^{max} \\ 0 & F_i^k \geq F_i^{max} \end{cases} \quad (19)$$

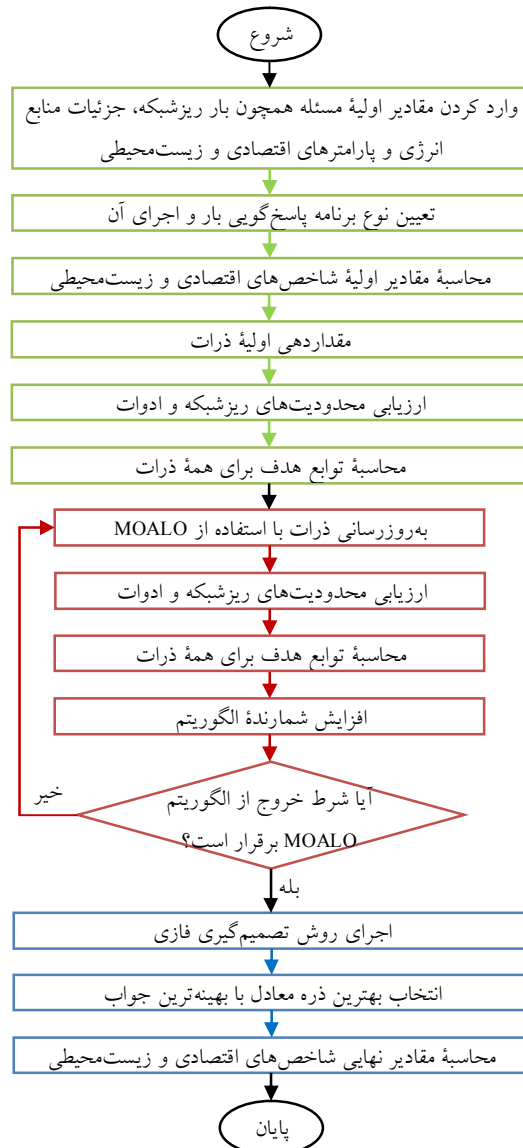
طرح‌واره کلی اجرای روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی چندهدفه منابع تجدیدپذیر و باتری در یک ریزشبه هوشمند در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۶. شبیه‌سازی عددی و ارزیابی نتایج

در این بخش، روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی الگوی مصرف مشترکین و برنامه بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر و باتری در یک ریزشبه نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در نرم‌افزار متلب^۲ مدل سال ۲۰۲۰ انجام شده‌اند.

تغییرات ساعتی بار الکتریکی مشترکین ریزشبه در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز قابل مشاهده است، حداکثر مصرف اولیه ریزشبه برابر با ۳۷۱۵ کیلووات است [۳۰]. بهره‌بردار ریزشبه می‌تواند نیاز الکتریکی مصرف‌کنندگان را با استفاده از منابع تجدیدپذیر، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و شبکه بالادست تأمین کند. علاوه بر این، آن می‌تواند در زمان‌هایی که انرژی تولیدی منابع محلی بیشتر از بار ریزشبه باشد، به شبکه بالادست انرژی الکتریکی بفروشد.

منابع انرژی ریزشبه با توجه به فناوری‌های موجود در بازار

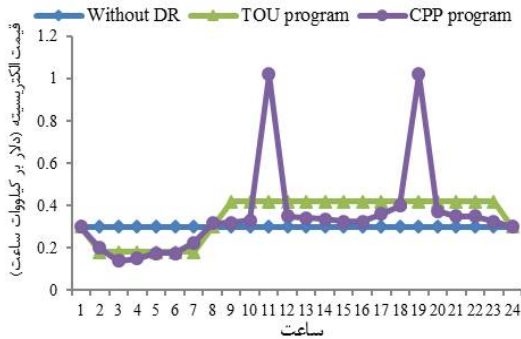


شکل (۴): فلوچارت اجرای روش پیشنهادی برای مدیریت ریزشبه

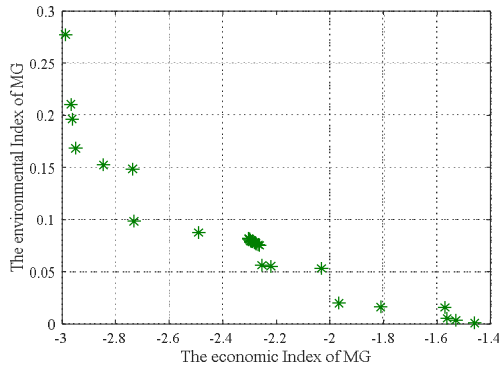
در نتیجه، ابتدا از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شیرمورچه^۱ (MOALO) برای بهینه‌سازی چندهدفه و نامغلوب توابع هدف و ایجاد صفحه بهینه پارتو استفاده می‌شود. در این الگوریتم، همانند اکثر الگوریتم‌های هوشمند که از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، از مکانیزم شکار شیرمورچه‌ها و ارتباط بین طعمه و شیرمورچه برای رسیدن به بهینه‌ترین جواب استفاده شده است. به‌طور مشابه با سایر الگوریتم‌های هوشمند، در این الگوریتم با استفاده از مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی، راه‌حل‌های بهینه برای حل مسائل بهینه‌سازی تقریب زده می‌شوند. راه‌حل‌های تصادفی در این الگوریتم بر اساس اصول تعامل بین شیرمورچه و مورچه‌ها بهبود می‌یابند. این الگوریتم دارای دقت،

هزینه تولید ۱ کیلووات ساعت با استفاده از توربین بادی و پنل فتوولتائیک به ترتیب ۰/۰۳۷ و ۰/۰۳۸ دلار فرض شده است. بهره‌بردار ریزشبكة، انرژی الکتریکی را از شبکه بالادست با قیمت ۰/۱۲ دلار بر کیلووات ساعت خریداری می‌کند و از طرف دیگر، انرژی مازاد ریزشبكة را با قیمت متوسط بازار برق به شبکه بالادست می‌فروشد. جزئیات شاخص زیست محیطی که میزان آلاینده‌گی منابع انرژی مختلف را شامل می‌شود نیز در جدول (۱) آورده شده است [۱۱].

ابتدا از الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه برای بهینه‌سازی نامعلوب توابع هدف اقتصادی و زیست محیطی مسئله استفاده می‌شود. شکل (۹) صفحه بهینه پارتو پس از اعمال الگوریتم شیرمورچه را نشان می‌دهد. حال با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی بهترین ذره که معادل با بهینه‌ترین برنامه بهره‌برداری از ریزشبكة است، انتخاب می‌شود.



شکل (۸): قیمت بازار برق برای الکتريسته در ريزشبكة



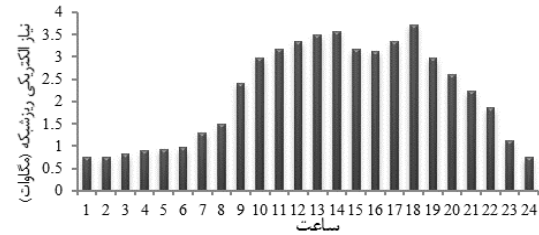
شکل (۹): صفحه پارتو پس از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌خوار

جدول (۱): میزان آلاینده‌گی واحدهای انرژی در ریزشبكة [۱۱]

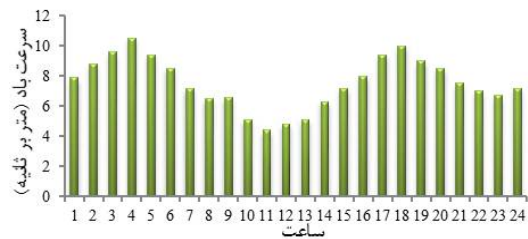
نوع منبع انرژی	میزان آلاینده‌گی بر اساس گازهای مختلف (کیلوگرم بر کیلووات ساعت)				
	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀
واحدهای تجدیدپذیر	۰	۰	۰	۰	۰
باتری	۰/۰۲	۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱
شبكة بالادست	۰/۸۵	۲/۱۴	۹/۷۲۳	۶/۰۴۳	۰/۸۷

انتخاب شده‌اند. توربین بادی استفاده‌شده از نوع AW1500 از شرکت NORDEX با ظرفیت ۱۵۰۰ کیلووات است. سرعت حداقل، نرمال و حداکثر توربین بادی به ترتیب برابر با ۴، ۱۳ و ۲۵ متر بر ثانیه است. از پنل فتوولتائیک شرکت IBC-SOLAR نیز برای تولید انرژی الکتریکی از انرژی خورشیدی استفاده شده است. ظرفیت پنل فتوولتائیک ۳۳۵ کیلووات است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی شرکت ECCINC نیز با ظرفیت ۴۰۰ کیلووات ساعت به‌عنوان باتری در ریزشبكة در نظر گرفته شده است. ماکزیمم ظرفیت قابل شارژ و دشارژ ساعتی باتری ۱۰۰ کیلووات بوده و بازده آن ۹۵٪ است [۳۱]. توان تولیدی توربین بادی و پنل فتوولتائیک به ترتیب با توجه به تغییرات ساعتی سرعت باد و تابش خورشیدی محاسبه می‌شوند. در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب سرعت باد و تابش خورشید نشان داده شده است.

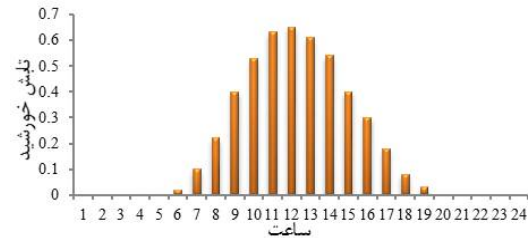
همان‌طور که در بخش‌های پیشین نیز ذکر شد، در این مطالعه دو نوع برنامه پاسخ‌گویی بار شامل زمان استفاده و اوج بحرانی مد نظر قرار گرفته شده است. قیمت بازار برق ریزشبكة با و بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار در شکل (۸) قابل مشاهده است.



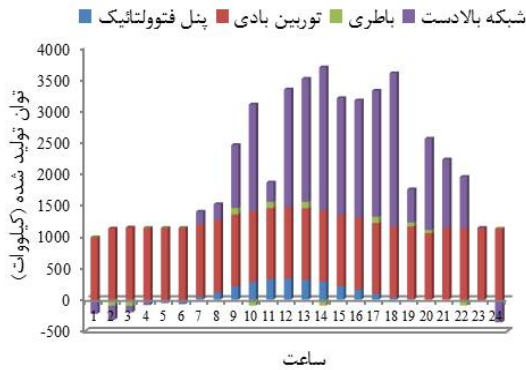
شکل (۵): میزان مصرف ساعتی انرژی الکتریکی در ریزشبكة



شکل (۶): پیش‌بینی سرعت باد روزانه در ریزشبكة



شکل (۷): پیش‌بینی میزان تابش نور خورشید در ریزشبكة



شکل (۱۲): برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع مختلف در سناریو ۶

جدول (۲): مقادیر شاخص‌های ریزشکبه بدون حضور پاسخ‌گویی بار

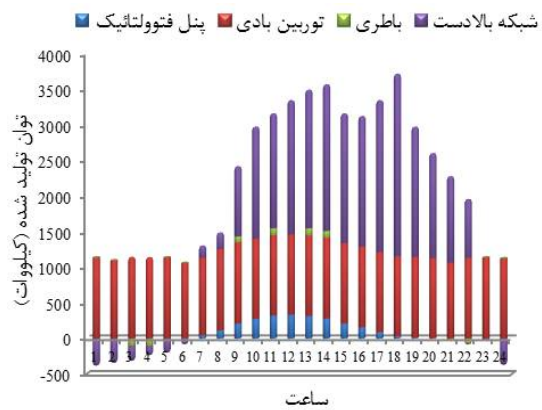
ساعت	سنا ر یو ۱	سنا ر یو ۲	سنا ر یو ۱	سنا ر یو ۲
۱	۱۳۳/۷۴	۲۲۷/۹۹	۱۴۵۱۲/۱۲	۰/۰۰۰۰۰۰
۲	۱۳۳/۷۴	۲۲۴/۶۲	۱۴۵۱۲/۱۲	۰/۰۰۰۰۰۰
۳	۱۴۷/۱۱	۲۰۰/۷۸	۱۶۰۴۰/۳۳	۰/۰۰۰۰۰۰
۴	۱۶۰/۴۹	۲۱۳/۶۰	۱۷۴۹۸/۵۴	۰/۰۰۰۰۰۰
۵	۱۶۷/۱۸	۲۶۱/۶۰	۱۸۲۲۷/۶۵	۰/۰۰۰۰۰۰
۶	۱۷۳/۸۶	۲۶۱/۶۹	۱۸۹۵۶/۷۵	۰/۰۰۰۰۰۰
۷	۲۳۴/۰۵	۳۲۸/۳۳	۲۵۵۱۸/۷۱	۳۲۱۴/۷۴۰
۸	۲۶۷/۴۸	۳۷۱/۸۴	۲۹۱۶۲/۲۴	۴۴۶۰/۹۹۰
۹	۴۳۴/۶۶	۵۵۶/۵۵	۴۷۳۹۱/۸۸	۱۹۲۵۳/۷۱
۱۰	۵۳۴/۹۶	۶۵۱/۳۱	۵۸۳۲۸/۴۷	۳۰۷۵۱/۹۸
۱۱	۵۶۸/۴۰	۷۰۰/۲۸	۶۱۹۷۴/۰۰	۳۱۵۷۵/۲۳
۱۲	۶۰۱/۸۳	۷۲۲/۹۰	۶۵۶۱۹/۵۳	۳۶۹۱۲/۵۸
۱۳	۶۲۸/۵۸	۷۶۰/۴۹	۶۸۵۳۵/۹۵	۳۸۱۴۶/۰۴
۱۴	۶۴۱/۹۵	۷۷۰/۶۶	۶۹۹۹۴/۱۷	۴۰۳۳۳/۶۷
۱۵	۵۶۸/۴۰	۶۷۹/۴۷	۶۱۹۷۴/۰۰	۳۵۶۵۹/۴۶
۱۶	۵۶۱/۷۱	۶۶۸/۹۱	۶۱۲۴۴/۸۹	۳۵۵۵۸/۶۶
۱۷	۶۰۱/۸۳	۷۰۲/۵۶	۶۵۶۱۹/۵۳	۴۱۷۷۹/۸۳
۱۸	۶۶۸/۷۰	۷۶۴/۶۷	۷۲۹۱۰/۵۹	۵۰۲۰۹/۱۹
۱۹	۵۳۴/۹۶	۶۳۰/۱۵	۵۸۳۲۸/۴۷	۳۵۸۱۶/۰۸
۲۰	۴۶۸/۰۹	۵۶۱/۹۱	۵۱۰۳۷/۴۱	۲۸۸۵۴/۱۵
۲۱	۴۰۱/۲۲	۴۷۱/۲۱	۴۳۷۴۶/۳۵	۲۳۶۸۶/۶۲
۲۲	۳۳۴/۳۵	۳۸۸/۲۵	۳۶۴۵۵/۲۹	۱۶۰۹۸/۰۳
۲۳	۲۰۰/۶۱	۲۹۴/۹۶	۲۱۸۷۳/۱۸	۰/۰۰۰۰۰۰
۲۴	۱۳۳/۷۴	۲۲۷/۰۴	۱۴۵۱۲/۱۲	۰/۰۰۰۰۰۰

همان طور که در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مشهود است، توربین بادی می‌تواند در هر زمان از شبانه‌روز انرژی الکتریکی را به ریزشکبه تزریق کند، درحالی‌که انرژی الکتریکی پیل فتوولتائیک فقط در ساعات میانی روز در دسترس است. این تفاوت به رفتار طبیعی سرعت باد و تابش خورشید مربوط است.

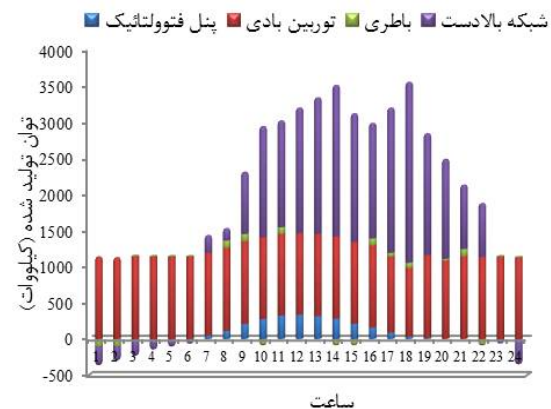
برای ارزیابی بهتر عملکرد روش پیشنهادی، ۶ سناریوی زیر در نظر گرفته شده است:

- سناریو ۱: حال پایه (ریزشکبه بدون پاسخ‌گویی بار، منابع تجدیدپذیر و باتری)؛
- سناریو ۲: ریزشکبه با منابع تجدیدپذیر و باتری؛
- سناریو ۳: ریزشکبه با برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده؛
- سناریو ۴: ریزشکبه با برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده، منابع تجدیدپذیر و باتری؛
- سناریو ۵: ریزشکبه با برنامه پاسخ‌گویی بار اوج بحرانی؛
- سناریو ۶: ریزشکبه با برنامه پاسخ‌گویی بار اوج بحرانی، منابع تجدیدپذیر و باتری.

توان تزریق شده توسط منابع مختلف انرژی شامل توربین بادی، پیل فتوولتائیک، باتری و شبکه بالادست به ریزشکبه در سناریوهای ۲، ۴ و ۶ به ترتیب در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع مختلف در سناریو ۲



شکل (۱۱): برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع مختلف در سناریو ۴

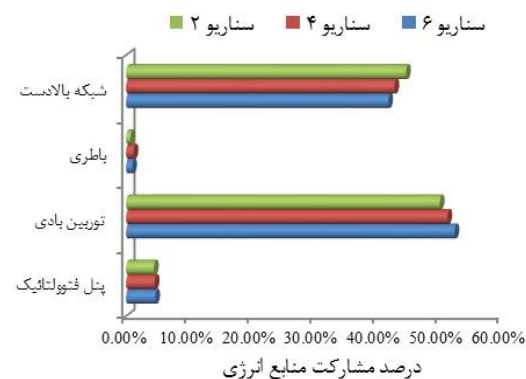
جدول (۴): مقادیر شاخص‌های ریزشبه در حضور برنامه CPP

ساعت	سود بهره‌بردار ریزشبه (دلار)			آلاینده‌ی ریزشبه (کیلوگرم)
	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۵	
۱	۱۳۷/۳۶۰	۲۱۹/۴۱۰	۱۴۹۷۶/۷۱	۰/۰۰۰۰۰۰
۲	۶۴/۶۷۰۰	۱۱۲/۸۸۰	۱۵۸۶۵/۹۳	۰/۰۰۰۰۰۰
۳	۱۸/۷۸۰۰	۶۶/۹۴۰۰	۱۸۳۳۰/۶۶	۰/۰۰۰۰۰۰
۴	۳۱/۵۵۰۰	۱۲۶/۰۲۰	۲۰۶۳۹/۷۰	۰/۰۰۰۰۰۰
۵	۵۹/۴۷۰۰	۱۵۳/۹۰۰	۲۱۲۲۱/۸۱	۰/۰۰۰۰۰۰
۶	۵۸/۶۱۰۰	۱۵۳/۰۲۰	۲۰۹۱۴/۷۰	۰/۰۰۰۰۰۰
۷	۱۴۶/۴۶۰	۲۴۵/۰۷۰	۲۷۳۷۶/۳۴	۴۰۴۸/۸۷۰
۸	۲۹۴/۹۶۰	۳۹۹/۳۲۰	۲۹۶۸۶/۶۵	۴۹۸۳/۴۰۰
۹	۴۹۰/۱۳۰	۶۱۳/۹۸۰	۴۸۰۹۶/۳۱	۱۹۶۳۸/۷۸
۱۰	۶۲۹/۵۹۰	۷۰۰/۷۶۰	۵۸۸۳۹/۷۷	۳۳۱۳۲/۴۶
۱۱	۱۶۷۱/۰۹	۱۸۰۲/۸۵	۳۶۴۴۰/۹۴	۶۰۶۲/۷۵۰
۱۲	۷۶۶/۷۳۰	۸۸۷/۴۴۰	۶۵۳۹۴/۴۵	۳۶۸۱۷/۴۹
۱۳	۷۷۰/۳۱۰	۹۰۲/۱۹۰	۶۸۱۷۸/۸۰	۳۸۱۳۳/۷۹
۱۴	۷۷۱/۱۶۰	۸۴۳/۲۹۰	۷۰۳۹۴/۳۱	۴۴۴۷۵/۲۳
۱۵	۶۵۴/۹۹۰	۷۶۶/۰۶۰	۶۲۷۰۶/۲۲	۳۶۳۹۱/۶۸
۱۶	۶۴۷/۲۸۰	۷۵۴/۴۸۰	۶۱۹۶۸/۴۹	۳۶۵۸۲/۲۷
۱۷	۷۹۴/۷۹۰	۹۰۷/۲۴۰	۶۴۹۹۴/۲۹	۳۹۲۴۰/۵۹
۱۸	۱۰۰۴/۹۲	۱۱۰۰/۸۹	۷۰۴۳۷/۲۵	۴۷۷۳۶/۰۶
۱۹	۱۵۷۲/۷۹	۱۶۷۶/۵۷	۳۴۲۹۷/۳۵	۱۰۳۰۳/۷۴
۲۰	۶۵۰/۷۴۰	۷۴۳/۹۵۰	۵۰۰۸۲/۲۸	۲۸۴۶۴/۳۲
۲۱	۵۱۰/۹۱۰	۶۰۵/۸۲۰	۴۳۵۹۶/۲۹	۲۱۱۵۳/۹۷
۲۲	۴۲۵/۷۶۰	۴۷۵/۱۸۰	۳۶۳۳۰/۲۵	۱۵۹۴۳/۱۵
۲۳	۲۳۱/۱۷۰	۳۲۱/۱۹۰	۲۲۱۳۱/۶۱	۰/۰۰۰۰۰۰
۲۴	۱۳۷/۳۶۰	۲۳۰/۶۵۰	۱۴۹۷۶/۷۱	۰/۰۰۰۰۰۰

جدول (۳): مقادیر شاخص‌های ریزشبه در حضور برنامه TOU

ساعت	سود بهره‌بردار ریزشبه (دلار)			آلاینده‌ی ریزشبه (کیلوگرم)
	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۳	
۱	۱۳۷/۴۰۰	۱۸۵/۹۳۰	۱۴۹۸۱/۵۴	۰/۰۰۰۰۰۰
۲	۴۹/۰۵۰۰	۹۸/۱۵۰۰	۱۶۰۴۶/۶۷	۰/۰۰۰۰۰۰
۳	۵۳/۹۶۰۰	۱۴۸/۶۹۰	۱۷۶۵۱/۳۴	۰/۰۰۰۰۰۰
۴	۵۸/۸۷۰۰	۱۵۳/۳۴۰	۱۹۲۵۶/۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰
۵	۶۱/۳۲۰۰	۱۵۵/۷۵۰	۲۰۰۵۸/۳۴	۰/۰۰۰۰۰۰
۶	۶۳/۷۷۰۰	۱۵۸/۱۸۰	۲۰۸۶۰/۶۷	۰/۰۰۰۰۰۰
۷	۸۵/۸۵۰۰	۱۸۴/۴۶۰	۲۸۰۸۱/۶۷	۴۷۵۴/۲۱۰
۸	۲۷۴/۸۱۰	۳۹۱/۱۷۰	۲۹۹۶۳/۰۸	۳۲۹۹/۳۷۰
۹	۶۹۱/۳۵۰	۸۱۵/۲۰۰	۴۵۲۲۸/۳۴	۱۶۷۷۰/۸۱
۱۰	۸۵۰/۸۹۰	۹۲۱/۵۲۰	۵۵۶۶۵/۶۵	۳۰۰۱۸/۹۸
۱۱	۹۰۴/۰۸۰	۱۰۳۵/۲۹	۵۹۱۴۴/۷۵	۲۸۸۵۵/۱۸
۱۲	۹۵۷/۲۶۰	۱۰۷۸/۳۳	۶۲۶۲۳/۸۶	۳۳۹۱۶/۹۱
۱۳	۹۹۹/۸۰۰	۱۱۱۹/۸۳	۶۵۴۰۷/۱۴	۳۶۹۷۴/۹۵
۱۴	۱۰۲۱/۰۸	۱۰۹۲/۸۳	۶۶۷۹۸/۷۸	۴۰۹۳۷/۴۰
۱۵	۹۰۴/۰۸۰	۹۶۹/۱۵۰	۵۹۱۴۴/۷۵	۳۴۷۷۱/۸۱
۱۶	۸۹۳/۴۴۰	۱۰۱۱/۹۹	۵۸۴۴۸/۹۳	۳۱۲۰۸/۴۹
۱۷	۹۵۷/۲۶۰	۱۰۵۷/۶۴	۶۲۶۲۳/۸۶	۳۹۳۰۰/۹۸
۱۸	۱۰۶۳/۶۲	۱۱۵۳/۴۴	۶۹۵۸۲/۰۶	۴۸۹۵۴/۸۷
۱۹	۸۵۰/۸۹۰	۹۴۷/۱۷۰	۵۵۶۶۵/۶۵	۳۲۸۹۷/۵۳
۲۰	۷۴۴/۵۳۰	۸۳۷/۲۴۰	۴۸۷۰۷/۴۴	۲۶۹۸۸/۴۳
۲۱	۶۳۸/۱۷۰	۷۴۴/۹۷۰	۴۱۷۴۹/۲۴	۱۷۳۶۵/۰۶
۲۲	۵۳۱/۸۱۰	۵۷۹/۵۰۰	۳۴۷۹۱/۰۳	۱۴۵۱۴/۲۳
۲۳	۳۱۹/۰۹۰	۴۱۳/۴۴۰	۲۰۸۷۴/۶۲	۰/۰۰۰۰۰۰
۲۴	۱۳۷/۴۰۰	۲۳۰/۷۰۰	۱۴۹۸۱/۵۴	۰/۰۰۰۰۰۰

با استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار و برنامه بهره‌برداري پیشنهادی از منابع انرژی، وابستگی ریزشبه به توان شبکه بالادستی در حدود ۶۰٪ کاهش می‌یابد. توربین بادی با توجه به در دسترس بودن شبانه‌روزی نقش پررنگ‌تری نسبت به پنل فتوولتائیک در تأمین انرژی دارد. به‌علاوه، برنامه شارژ و دشارژ باتری نیز به‌نحوی برنامه‌ریزی شده است که با تزریق انرژی در زمان‌های مورد نیاز باعث افزایش پایداری انرژی ریزشبه شود. درصد مشارکت منابع انرژی مختلف در تأمین انرژی مورد نیاز ریزشبه در سناریوهای ۲، ۴ و ۶ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): درصد مشارکت واحدهای انرژی در تأمین انرژی ریزشبه

مقادیر ساعتی شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبه در سناریوهای بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار در جدول (۲) ارائه شده‌اند. میزان سود اولیه سیستم در حالت پایه (سناریو ۱) ۹۳۰۱ دلار است. این سود پس از استفاده از توربین بادی، پنل فتوولتائیک و باتری در حدود ۲۵/۱۶٪ بهبود می‌یابد. میزان آلودگی ریزشبه نیز پس از بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد به‌طوری که این شاخص در سناریو ۲ کاهش ۵۳/۳۹ درصدی نسبت به سناریو ۱ دارد.

در سناریو ۲ که هیچ‌گونه برنامه پاسخ‌گویی بار در شبکه اجرا نمی‌شود، مقدار انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست ۴۵٪ از کل تقاضای الکتریکی ریزشبه است. پس از اعمال یکی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، نقش شبکه بالادست در تأمین نیاز انرژی ریزشبه به‌میزان ۴۱٪ از کل انرژی ریزشبه کاهش می‌یابد.

این شکل‌های قابل مشاهده است، وقتی از منابع انرژی محلی و یکی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبه استفاده می‌شود، شاخص‌های در نظر گرفته شده به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. سناریو ۴ بیشترین افزایش را در بهبود میزان شاخص اقتصادی ریزشبه دارد درحالی‌که بیشترین کاهش شاخص زیست‌محیطی در سناریو ۶ اتفاق می‌افتد. در حالت کلی با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در بهبود کارایی ریزشبه دارد.

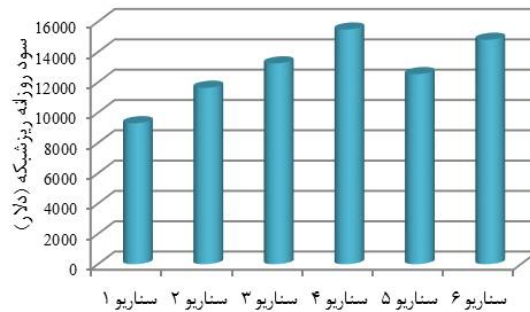
۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری در یک ریزشبه به منظور افزایش میزان سود بهره‌بردار و کاهش میزان آلاینده‌گی ریزشبه مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار زمان استفاده و اوج بحرانی نیز برای بهبود الگوی مصرف مشترکین ریزشبه پیشنهاد شدند. برای انتخاب بهترین برنامه بهره‌برداری ریزشبه از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه و روش فازی استفاده شد.

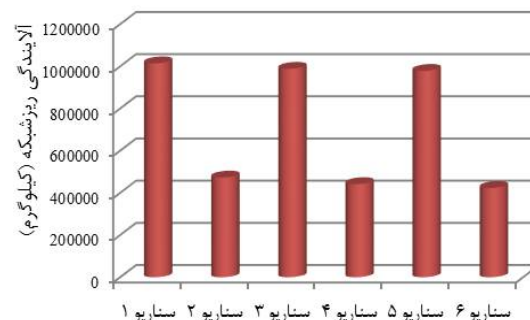
نتایج شبیه‌سازی عددی روش پیشنهادی نشان‌دهنده این موضوع است که منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و باتری در بهبود عملکرد ریزشبه و کاهش وابستگی آن به توان الکتریکی شبکه بالادستی عملکرد مناسبی دارند. توربین بادی بیشترین تأثیر را در استقلال انرژی ریزشبه دارد به طوری که توان تولیدی آن در حدود ۵۰٪ از کل تقاضای الکتریکی شبکه است. پنل فتوولتائیک به دلیل رفتار طبیعی تابش خورشیدی، فقط انرژی الکتریکی را در ساعات میانی روز به ریزشبه تزریق می‌کند. برنامه بهره‌برداری از باتری نیز با توجه به شرایط شبکه و منابع تجدیدپذیر به‌نحوی انجام شده است که بیشترین تأثیر را در بهبود شاخص‌های ریزشبه ایفا کند. اگرچه شاخص اقتصادی در برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده بیشتر از برنامه اوج بحرانی افزایش می‌یابد و شاخص زیست‌محیطی نیز در برنامه اوج بحرانی بیشتر از برنامه دیگر کاهش می‌یابد، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تأثیر مثبتی بر بهبود شاخص‌ها و بهره‌وری ریزشبه دارند. در حالت کلی، پس از اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و استفاده مناسب از منابع تجدیدپذیر و باتری با استفاده از روش پیشنهادی برای مصرف و تأمین بهینه انرژی الکتریکی ریزشبه، نه تنها میزان سودآوری شرکت بهره‌بردار ریزشبه هوشمند در حدود ۵۹٪ تا ۶۷٪ بهبود می‌یابد، میزان آلاینده‌گی زیست‌محیطی ریزشبه نیز در حدود ۵۷٪ تا ۶۰٪ در سناریوهای مختلف کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان ادعا کرد که روش پیشنهادی باعث افزایش راندمان انرژی الکتریکی ریزشبه می‌شود. البته برای بهبود شیوه مدیریت انرژی ریزشبه هوشمند پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده، مباحث فنی

جدول (۳) مقادیر ساعتی توابع هدف ریزشبه در سناریوهایی که برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. در سناریو ۳، برنامه زمان استفاده باعث می‌شود که سود روزانه ریزشبه در حدود ۴۲٪ نسبت به سناریو ۱ افزایش یابد درحالی‌که شاخص زیست‌محیطی نیز در حدود ۳٪ کاهش یافته است. استفاده همزمان از منابع انرژی محلی و برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده در سناریو ۴ نیز شاخص‌های ریزشبه را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد به‌نحوی که مقادیر سود و آلاینده‌گی روزانه ریزشبه برابر با ۱۵۴۸۴ دلار و ۴۴۱ مگاگرم می‌شوند.

مقادیر ساعتی شاخص‌های ریزشبه در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار اوج بحرانی (سناریوهای ۵ و ۶) در جدول (۴) ارائه شده است. در سناریو ۵، برنامه اوج بحرانی باعث بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبه به ترتیب در حدود ۳۵٪ و ۴٪ نسبت به سناریو ۱ می‌شود. استفاده از منابع تجدیدپذیر، باتری و برنامه اوج بحرانی در سناریو ۶ نیز باعث هرچه بهتر شدن بهره‌وری ریزشبه می‌شود. در این سناریو، سود ریزشبه ۵۹/۲۱٪ نسبت به حالت پایه ریزشبه بهبود می‌یابد درحالی‌که آلاینده‌گی ریزشبه نیز ۵۷/۲۷٪ کاهش یافته است.



شکل (۱۴): مقادیر شاخص اقتصادی ریزشبه در طول یک شبانه‌روز



شکل (۱۵): مقادیر شاخص زیست‌محیطی ریزشبه در طول یک شبانه‌روز

سود روزانه و میزان آلاینده‌گی ریزشبه در سناریوهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند. همان طور که در

شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی نیز می‌تواند تکمیل‌کننده روش پیشنهادی در این مقاله باشد.

ریزشبکه و مباحث اقتصادی از دید مشترکین ریزشبکه نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین مدیریت انرژی منابع ریزشبکه در کنار مدیریت

مراجع

- مجله هوش محاسباتی در مهندسی برق، شماره ۱۰، صفحه ۸۶-۹۸، ۱۳۹۸.
- [1] Alilou, M., Tousei, B. and Shayeghi, H., "Home energy management in a residential smart microgrid under stochastic penetration of solar panels and electric vehicles", *Solar Energy*, Vol. 212, pp. 6-18, 2020.
- [2] Roy, A., Auger, F., Robin, F., Bourguet, S. and Tran, Q., "A multi-level demand-side management algorithm for off-grid multi-source systems", *Energy*, Vol. 191, pp. 116536, 2020.
- [3] Zeynali, S., Rostami, N. and Feyzi, M., "Multi-Objective optimal short-term planning of renewable distributed generations and capacitor banks in power system considering different uncertainties including plug-in electric vehicles", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 119, pp. 105885, 2020.
- [4] Aznavi, S., Fajri, P., Sabzehgar, R. and Asrari, A., "Optimal management of residential energy storage systems in presence of intermittencies", *Journal of Building Engineering*, Vol. 29, pp. 101149, 2020.
- [5] میرزا محمدی، سعید، جبارزاده، آرمین، صالحی شهرابی، مهران، «برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه‌ها با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر در حالت ریزشبکه»، مهندسی و مدیریت انرژی، شماره ۱۰، صفحه ۹۵۶-۱۳۹۹.
- [6] Pallonetto, F., Rosa, M., Ettorre, F. and Finn, D., "On the assessment and control optimization of demand response programs in residential buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 127, pp. 109861, 2020.
- [7] تقی‌خانی، محمدعلی، ماندگار نیک، محسن، «تأثیر خانه‌های هوشمند در مدیریت و کاهش مصرف انرژی الکتریکی»، مهندسی و مدیریت انرژی، شماره ۹، صفحه ۸۵۲-۷۴، ۱۳۹۸.
- [8] Erdinc, O., Paterakis, N., Pappi, I., Bakirtzis, A. and Catalão, J., "A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response", *Applied Energy*, Vol. 143, pp. 26-37, 2015.
- [9] Sfikas, E., Katsigiannis, Y. and Georgilakis, P., "Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 67, pp. 101-113, 2015.
- [10] Wang, Y., Li, Y., Cao, Y., Tan, Y., He, L. and Han, J., "Hybrid AC/DC microgrid architecture with comprehensive control strategy for energy management of smart building", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 101, pp. 151-161, 2018.
- [11] Aghajani, G., Shayanfar, H. and Shayeghi, H., "Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response", *Energy*, Vol. 126, pp. 622-637, 2017.
- [12] Amir, V. and Azimian, M., "Dynamic multi-carrier microgrid deployment under uncertainty", *Applied Energy*, Vol. 260, pp. 114293, 2020.
- [13] امیر، وحید، عظیمیان، مهدی، حدادی‌پور، شاپور، «بهره‌برداری چند ریزشبکه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت»،
- [14] Amir, V., Azimian, M. and Razavizadeh, A., "Reliability-constrained optimal design of multicarrier microgrid", *International Transmission on Electrical Energy System*, Vol. 29, pp. 12131, 2019.
- [15] Allahnoori, M., Kazemi, S., Abdi, H. and Keyhani, R., "Reliability assessment of distribution systems in presence of microgrids considering uncertainty in generation and load demand", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 2, pp. 113-120, 2014.
- [16] Xu, G., Cheng, H., Fang, S., Ma, Z., Zeng, P. and Yao, L., "Optimal size and location of battery energy storage systems for reducing the wind power curtailments", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 46, pp. 342-352, 2018.
- [17] Wu, Z., Tazvinga, H. and Xia, X., "Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system", *Applied Energy*, Vol. 148, pp. 294-304, 2015.
- [18] Santo, K., Santo, S., Monaro, R. and Saidel, M., "Active DSM for households in sg using optimization and artificial intelligence", *Measurement*, Vol. 115, pp. 152-161, 2018.
- [19] Rastegar, M., Fotuhi, M. and Aminifar, F., "Load commitment in a smart home", *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 45-54, 2012.
- [20] Avril, S., Arnaud, G., Florentin, A. and Vinard, M., "Multi-Objective optimization of batteries and hydrogen storage technologies for remote photovoltaic systems", *Energy*, Vol. 35, pp. 5300-5308, 2010.
- [21] Gelazanskas, L. and Gamage, K., "Demand side management in smart grid: a review and proposals for future direction", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 11, pp. 22-30, 2014.
- [22] Shakouri, H. and Kazemi, A., "Multi-Objective cost-load optimization for demand side management of a residential area in smart grids", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 32, pp. 171-180, 2017.
- [23] Barbato, B., Capone, A., Chen, L., Martignon, F. and Paris, S., "A distributed demand-side management framework for the smart grid", *Computer communications*, Vol. 57, pp. 13-24, 2015.
- [24] Rastegar, M., Fotuhi, M. and MoeiniAghtaie, M., "Developing a two-level framework for residential energy management", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, pp. 1707-1717, 2018.
- [25] Sadati, S., Moshtagh, J., Shafie-khah, M. and Catalão, J., "Smart distribution system operational scheduling considering electric vehicle parking lot and demand response programs", *Electrical Power system Research*, Vol. 160, pp. 404-418, 2018.
- [26] Erdinc, O., Paterakis, N., Pappi, I., Bakirtzis, A. and Catalão, J., "A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response", *Applied Energy*, Vol. 143, pp. 26-37, 2015.
- [27] Alilou, M., Nazarpour, D. and Shayeghi, H., "Multi-Objective optimization of demand side management and

- multi dg in the distribution system with demand response*", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 6, pp. 230-242, 2018.
- [28] Mirjalili, S., Jangir, P. and Saremi, S., "*Multi-Objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems*", Applied Intelligence, Vol. 46, PP. 79-95, 2017.
- [29] Alilou, M., Talavat, V. and Shayeghi, H., "*Simultaneous placement of renewable dgs and protective devices for improving the loss, reliability and economic indices of distribution system with nonlinear load model*", International Journal of Ambient Energy, Vol. 41, pp. 871-881, 2020.
- [30] Shuaib, Y., Kalavathi, M. and Rajan, C., "*Optimal capacitor placement in radial distribution system using gravitational search algorithm*", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 384-397, 2015.
- [31] Alilou, M., Tousi, B. and Shayeghi, H., "*Multi-Objective energy management of smart homes considering uncertainty in wind power forecasting*", Electrical Engineering, In press, 2021.