

مدیریت چندهدفه سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی در یک ریزشبه هوشمند مسکونی در حضور عدم قطعیت بار مشترکین و انرژی های تجدیدپذیر

مسعود علیلو^۱

چکیده

مدیریت انرژی سالانه در ریزشبه ها به طور قابل توجهی می تواند وابستگی این شبکه ها به شبکه اصلی برق را کاهش دهد. این رویکرد بهینه سازی، امکان استفاده بهتر از انرژی مازاد تولید شده در سطح محلی یا ذخیره شده را، برای تأمین نیازهای انرژی در دوره های زمانی دیگر فراهم می کند. این مقاله به بررسی یک روش چندهدفه نوآورانه برای مدیریت سالیانه انرژی در ریزشبه های هوشمند پرداخته است. ریزشبه مورد مطالعه، یک شبکه برق متشکل از خانه های مسکونی کوچک با الگوهای مصرف تصادفی در فصل ها و روزهای مختلف سال است. همچنین مدل سازی احتمالاتی توربین های بادی و پنل های فتوولتائیک در این تحلیل گنجانده شده است. از یک سیستم ذخیره ساز الکتریکی مبتنی بر سدیم-گوگرد نیز برای مدیریت انرژی استفاده می شود. مدیریت انرژی در دو سناریو شامل مدیریت روزانه در طول یک سال و مدیریت سالیانه مورد بررسی قرار می گیرد. شاخص های اقتصادی و زیست محیطی به عنوان توابع هدف مسئله مدیریت انرژی ریزشبه مدنظر قرار گرفته شده اند که با استفاده از ترکیب الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی و روش تصمیم گیری فازی بهینه سازی می شوند. نتایج عددی حاصل از اجرای این روش در یک ریزشبه نمونه نشان می دهد که عملکرد آن مناسب بوده و به طور قابل ملاحظه ای معیارهای اقتصادی و زیست محیطی شبکه را بهبود بخشیده است. به طور کلی، این رویکرد منجر به افزایش بهره وری ریزشبه هوشمند شده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۲/۳۰

کلمات کلیدی:

توربین بادی

پنل فتوولتائیک

ریزشبه مسکونی

سیستم ذخیره ساز الکتریکی

بهینه سازی چندهدفه

۱. استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

masoud.alilou@gmail.com

۱. مقدمه

شبکه هوشمند را می‌توان ترکیبی از شبکه برق فعلی با تجهیزاتی مدرن نظیر ابزارهای اندازه‌گیری، کنترل، ارتباطات و حسگرهای خودکار تعریف کرد. تفاوت اصلی میان یک شبکه هوشمند و شبکه‌های برق سنتی در استفاده از تجهیزات کنترلی و اندازه‌گیری خودکار است که امکان مدیریت بهینه شبکه را در شرایط مختلف بهره‌برداری فراهم می‌کند. این شبکه‌ها با ایجاد ارتباط دوسویه میان تولیدکننده و مصرف‌کننده، قابلیت بهره‌گیری مؤثر از راهبردهایی نظیر پاسخگویی بار، منابع تولید پراکنده و خودروهای برقی را فراهم می‌آورند [1]. یک شبکه هوشمند از چندین ریزشبکه هوشمند تشکیل شده و هر ریزشبکه نیز در مقیاسی کوچکتر از قابلیت‌های مشابه یک شبکه هوشمند برخوردار است [2]. مدیریت سمت تقاضا به عنوان روشی برای اصلاح الگوی مصرف انرژی در بخش تقاضا معرفی می‌شود، که هدف آن افزایش بهره‌وری و عملکرد شبکه انرژی الکتریکی است. این مدیریت شامل برنامه‌هایی است که تأثیر مستقیمی بر نحوه و میزان مصرف برق مشترکین دارند و توسط شرکت‌های برق به گونه‌ای طراحی می‌شوند که منافع مشترکین، جامعه و خود شرکت‌ها تأمین شود [3]. در زمینه بهبود بهره‌وری شبکه برق، برنامه‌های پاسخگویی بار یکی از روش‌های کلیدی در سیستم‌های توزیع محسوب می‌شوند. مشترکینی که در شبکه‌های سنتی تنها به عنوان مصرف‌کننده عمل کرده و هزینه برق را بر اساس تعرفه‌های ثابت پرداخت می‌کردند، اکنون این امکان را دارند که مصرف خود را بر اساس تغییرات قیمت مدیریت کرده و با کاهش بار پیک، نقشی مؤثر در مدیریت شبکه ایفا کنند [4]. یکی از الزامات اساسی برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌های هوشمند، استفاده از منابع تولید پراکنده است. بهره‌برداری کارآمد از این منابع نه تنها وابستگی ریزشبکه به شبکه اصلی را کاهش می‌دهد، بلکه به بهبود وضعیت زیست‌محیطی و اقتصادی این شبکه‌ها کمک می‌کند. اگرچه انرژی تولیدشده توسط منابع تولید پراکنده غیربازگشتی قابل اعتماد و در دسترس است، اما منابع تجدیدپذیر به دلیل مزایای زیست‌محیطی در اولویت قرار دارند [5]. علاوه بر منابع تولید پراکنده که اجزای حیاتی ریزشبکه‌ها هستند، استفاده از باتری‌ها یا سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی نیز برای افزایش پایداری و بهره‌وری ریزشبکه اهمیت دارد. باتری‌ها می‌توانند ناپایداری‌های ناشی از تولید منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی یا بادی را کاهش دهند. این سیستم‌ها با ذخیره انرژی در زمان‌هایی که تولید بیشتر از مصرف بوده یا قیمت انرژی پایین است، و تخلیه انرژی در اوج بار یا زمان افزایش قیمت برق، به افزایش بهره‌وری اقتصادی کمک می‌کنند [6]. در حالی که تمایل دولت‌ها برای استفاده از منابع تجدیدپذیر به دلیل مزایای زیست‌محیطی آنها روزبه‌روز بیشتر می‌شود، اما طبیعت ناپایدار این منابع مانند تغییرات باد و تابش خورشید موجب اختلالاتی در طول شبانه‌روز و سال می‌شود. یکی از راهکارهای عملی برای رفع این محدودیت‌ها، بهره‌گیری از باتری‌ها در کنار استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک است. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی بدین ترتیب موجب افزایش بهره‌وری و کارایی این منابع خواهد شد [7].

مفهوم ریزشبکه به همراه مدیریت انرژی واحدهای تولید انرژی در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. برای درک کلی این مطالعات، می‌توان به منبع [8] اشاره کرد که مرور جامعی از روش‌های مختلف مدیریت مصرف انرژی در ریزشبکه ارائه داده است. این روش‌ها اهداف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را در نظر گرفته و لایه‌های متنوع ریزشبکه هوشمند، تکنیک‌های بهینه‌سازی و نقش باتری‌ها با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر را ارزیابی کرده‌اند. در منبع [9] نیز بررسی کاملی از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ریزشبکه‌های هوشمند همراه با منابع تجدیدپذیر انجام شده است. این مقاله به مطالعه فناوری‌ها، چالش‌ها، روش‌های کنترل، مدیریت و کاربرد باتری‌ها پرداخته است. بهینه‌سازی مدیریت ترکیبی پنل‌های فتوولتائیک، باتری‌ها و شبکه برق طی شبانه‌روز در منبع [10] مطرح شده است. در این پژوهش، ظرفیت تولید تجهیزات در ساعات مختلف روز به گونه‌ای تنظیم شده تا هزینه قبض‌های مصرف‌کنندگان به حداقل برسد. بار شبکه به دو صورت قطعی و احتمالی مدل‌سازی شده و با استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار مدیریت شده است. منبع [11] به بهینه‌سازی عملکرد

ریزشبکه در حضور استراتژی‌های مختلف مدیریت سمت تقاضا پرداخته است. در این مطالعه، نحوه استفاده از منابع تولید پراکنده و برنامه‌های پاسخگویی بار برای افزایش بهره‌وری شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل برنامه‌ریزی احتمالی، شامل سرعت باد، تابش خورشید و بار شبکه، برای حل چالش عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر تدوین شده است. علاوه بر این، از الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات برای حداقل‌سازی تلفات زیست‌محیطی و هزینه بهره‌برداری استفاده شده و عملکرد تجهیزات مختلف در دوره ۲۴ ساعته با وجود یا عدم وجود برنامه‌های پاسخگویی بار تحلیل شده است. در منبع [12] یک مدل برنامه‌ریزی دوطرفه برای تعیین موقعیت و اندازه بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ارائه شده است. هدف نهایی این پژوهش، کاهش محدودیت‌های توربین بادی بود؛ نتایج نشان داد که استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی در محل مصرف نسبت به مزرعه بادی سود بیشتری به همراه دارد. مطالعات اقتصادی مرتبط با ریزشبکه‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منبع [13] یک مدل اقتصادی برای بهینه‌سازی بهره‌وری اقتصادی ریزشبکه بر اساس تعادل درآمدها و هزینه‌ها ارائه کرده است. در این پژوهش، شاخص بهره‌وری اقتصادی و بازده کل شبکه به عنوان اهداف اصلی مدیریت انرژی در ریزشبکه هوشمند مورد توجه قرار گرفته‌اند. در منبع [14] از الگوریتم هوشمند ازدحام سالپ برای حل مسائل مدیریت انرژی در ریزشبکه هوشمند به همراه دستگاه‌های ذخیره‌ساز بهره گرفته شده است. این مطالعه برای نزدیک‌تر کردن شرایط به واقعیت، مدل‌های احتمالی بار، منابع تولید پراکنده و قیمت بازار برق را لحاظ کرده است. هدف اصلی، کاهش تلفات و هزینه‌های کلی ریزشبکه بود که با ترکیب توابع هدف در قالب یک مسئله تک‌هدفه بررسی شد. برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزانه از ریزشبکه هوشمند در منبع [15] مورد توجه قرار گرفته و اهدافی مانند کاهش هزینه‌های عملیاتی و آلودگی زیست‌محیطی مطرح شده‌اند. همچنین شاخص‌هایی مانند میزان قطعی بار و دسترسی به انرژی بادی برای افزایش رضایت مشتریان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تصمیم‌گیری چندهدفه در این مطالعه بهترین مسیر مدیریت انرژی طی شبانه‌روز را تعیین کرده است. در نهایت، منبع [16] مدیریت انرژی و توان یک ریزشبکه متصل به شبکه بالادست را تحلیل کرده است. اهداف مطالعه شامل کاهش تلفات توان و انرژی و نیز کاهش هزینه‌های بهره‌برداری بوده و از یک الگوریتم تکاملی برای افزایش بازده شبکه و مدیریت بهینه استفاده شده است.

بر اساس منابع بررسی‌شده، در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی درباره مدیریت سمت تقاضا انجام شده است. این مطالعات عمدتاً با هدف بهبود بهره‌وری شبکه هوشمند از طریق روش‌های متنوع صورت گرفته‌اند. اگرچه اهداف فنی و زیست‌محیطی نیز در تحلیل‌های مدیریت شبکه هوشمند مورد توجه قرار می‌گیرند، غالب این پژوهش‌ها بر شاخص‌های اقتصادی تمرکز داشته‌اند. برخی از مقالات به بررسی مکان‌یابی بهینه منابع انرژی در شبکه‌های هوشمند پرداخته‌اند. در سوی دیگر، تحلیل برنامه‌های پاسخگویی بار و تأثیر تغییر الگوهای مصرف مشتریان بر بهره‌وری شبکه هوشمند نیز توسط پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، شماری از مطالعات به برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید انرژی در طول شبانه‌روز اختصاص یافته است. گروه دیگری از تحقیقات نیز بر ارزیابی تجهیزات مصرف‌کننده و تأمین‌کننده انرژی مانند خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های هوشمند متمرکز بوده‌اند.

با توجه به مطالب فوق، جنبه‌های مختلف شبکه‌های هوشمند یا در ابعاد کوچک‌تر، ریزشبکه‌های هوشمند همچون مدیریت منابع تجدیدپذیر، پاسخگویی بار و خودروهای برقی در مقالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اما تا بحال، در کمتر مطالعه‌ای، بهره‌برداری سالیانه ریزشبکه هوشمند مورد مطالعه قرار گرفته شده است. به همین دلیل در این مقاله، مدیریت سمت تقاضا در یک ریزشبکه هوشمند به نحوی در طول یک سال با توجه به پارامترهای مختلف همچون شرایط آب و هوایی، قیمت بازار برق و الگوی مصرف مشترکین مورد مطالعه قرار می‌گیرد که شاخص‌های فنی و اقتصادی ریزشبکه هوشمند بهبود یابند. به عبارت دیگر در این مقاله، مدیریت چندهدفه انرژی ریزشبکه در طی فصول مختلف به نحوی با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند انجام می‌شود که بهره‌وری سالیانه ریزشبکه هوشمند افزایش پیدا کند. در بخش ۲، مدل سازی انرژی ریزشبکه هوشمند انجام خواهد شد. مدلسازی احتمالاتی ریزشبکه شامل مدلسازی احتمالاتی بار مشترکین و مدلسازی احتمالاتی

منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در بخش ۳ ارائه شده است. بخش ۴ در مورد روش پیشنهادی مدیریت انرژی سالیانه ریزشبهک هوشمند است. توابع هدف، قیود، الگوریتم هوشمند و روش انتخاب بهینه ترین جواب مسئله در این بخش توضیح داده شده اند. نتایج مطالعات عددی و تجزیه و تحلیل روش پیشنهادی با توجه به نتایج حاصل شده در یک ریزشبهک نمونه در بخش ۵ ارائه شده است. در نهایت، نتیجه گیری مقاله در بخش ۶ بیان شده است.

۲. مدل سازی انرژی ریزشبهک هوشمند

مدل سازی انرژی ریزشبهک براساس نیازهای مصرف کنندگان برق، انرژی تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر محلی، و انرژی ذخیره یا آزاد شده توسط سیستم ذخیره سازی الکتریکی انجام می گیرد. ریزشبهک های مسکونی معمولاً نوسانات قابل توجهی در نیاز به انرژی الکتریکی دارند که این تغییرات تحت تأثیر عواملی نظیر نوع خانوار، زمان روز، ایام هفته یا تعطیلات آخر هفته، و فصول مختلف می باشد. میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز ریزشبهک برای یک بازه زمانی مشخص با استفاده از رابطه (۱) تعیین می شود.

$$D_p = \sum_{t=1}^{n_{tp}} D_t \quad (1)$$

در این رابطه، D_p انرژی الکتریکی مورد نیاز ریزشبهک در طول یک دوره بهره برداری معین همچون یک شبانه روز، هفته، فصل یا حتی یک سال است. n_{tp} تعداد ساعت های بهره برداری در طول دوره بهره برداری را نشان می دهد. D_t نیز نشان دهنده انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه در طول ساعت t است.

تمام انرژی مورد نیاز یک ریزشبهک که فاقد منابع انرژی محلی است، باید از طریق شبکه بالادستی تامین شود. بهره گیری از واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر یکی از راهکارهای دوستدار محیط زیست برای تامین برق در ریزشبهک ها محسوب می شود. به همین دلیل، می توان تولیدی واحدهای انرژی محلی را در یک بازه زمانی مشخص با استفاده از رابطه (۲) محاسبه کرد.

$$G_p = \sum_{t=1}^{n_{tp}} \sum_{i=1}^{n_{REU}} G_{ti} \quad (2)$$

در این رابطه، G_p مجموع توان تولیدی همه واحدهای انرژی در یک دوره معین است. n_{REU} تعداد منابع تجدیدپذیر محلی از جمله توربین بادی و پنل خورشیدی را نشان می دهد. توان تولیدی هر واحد انرژی (i) در هر ساعت t با استفاده از پارامتر G_{ti} نشان داده شده است. براساس روابط (۱) و (۲)، می توان وضعیت انرژی ریزشبهک را در حضور منابع تجدیدپذیر محلی، با در نظر گرفتن عدم تطابق ساعتی بین عرضه و تقاضا، از طریق رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$E_{tMG} = D_t - G_t \quad (3)$$

در این معادله، E_{tMG} وضعیت انرژی ریزشبهک در ساعت را نشان می دهد. زمانی که مقدار شاخص E_{tMG} بزرگ تر از صفر باشد، شرکت بهره بردار ریزشبهک ملزم به خرید برق از شبکه بالادستی بوده و زمانی که مقدار این شاخص کوچک تر از صفر باشد، شرکت بهره بردار ریزشبهک توانایی فروش انرژی به سیستم اصلی را دارد.

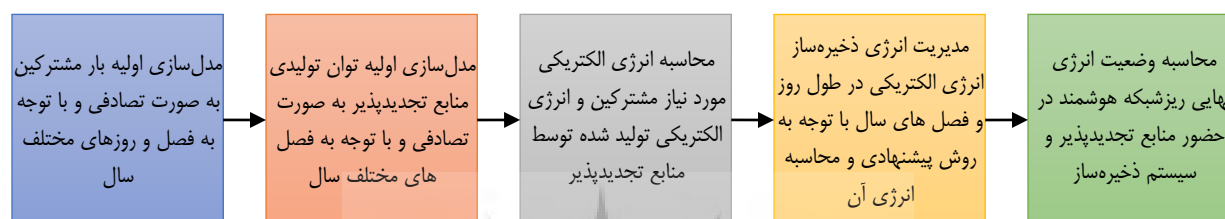
با وجود کاهش چشمگیر میزان انرژی خریداری شده از شبکه بالادستی، واحدهای انرژی تجدیدپذیر ممکن است همواره در دسترس نباشند؛ چرا که منابع اولیه آن ها مانند باد و تابش خورشید، به طور مداوم قابل استفاده نیستند. استفاده از سیستم ذخیره سازی انرژی الکتریکی یک راهکار مؤثر برای کاهش اثرات رفتار تصادفی منابع تجدیدپذیر و متعادل سازی ناهماهنگی میان تقاضا و عرضه در ریزشبهک محسوب می شود. وضعیت انرژی ریزشبهک با در نظر گرفتن حضور سیستم ذخیره سازی انرژی الکتریکی بر اساس رابطه (۴) مدل سازی شده است.

$$E_{tMG} = D_t - G_t + ESS_t \quad (4)$$

در این رابطه، ESS_t نشان‌دهنده انرژی شارژ شده (+) و دشارژ شده (-) باطری در ساعت t است. بنابراین، مدل‌سازی نهایی انرژی ریزشبکه در طول یک دوره زمانی مشخص با استفاده از رابطه (۵) انجام می‌شود.

$$E_P = \sum_{t=1}^{n_{tp}} E_{tMG} = \sum_{t=1}^{n_{tp}} (D_t - G_t + ESS_t) \quad (5)$$

روند کلی محاسبه و مدل‌سازی وضعیت انرژی ریزشبکه در طول یک سال، شامل تعیین انرژی مورد نیاز ریزشبکه، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر محلی و مدیریت بهینه انرژی سیستم ذخیره‌سازی الکتریکی، در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): روندنمای کلی محاسبه و مدل‌سازی وضعیت انرژی ریزشبکه در طول یک سال

۳. مدل‌سازی احتمالاتی ریزشبکه

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، انرژی کلی یک ریزشبکه مسکونی شامل نیازهای برق مصرف‌کنندگان، انرژی تولیدشده توسط واحدهای تجدیدپذیر و همچنین انرژی ذخیره‌شده یا تخلیه شده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است. برای دستیابی به مدلی واقعی‌تر از عملکرد ریزشبکه، مدل‌های تصادفی مربوط به بار، توربین بادی و پنل خورشیدی در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه، فرآیند مدل‌سازی احتمالاتی برای پارامترهای تصادفی این ریزشبکه هوشمند تشریح می‌شود. در نهایت، روش تعیین پارامترهای احتمالاتی که ترکیبی از روش ابرمکعب لاتین و الگوریتم خوشه‌بندی کی‌میز است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

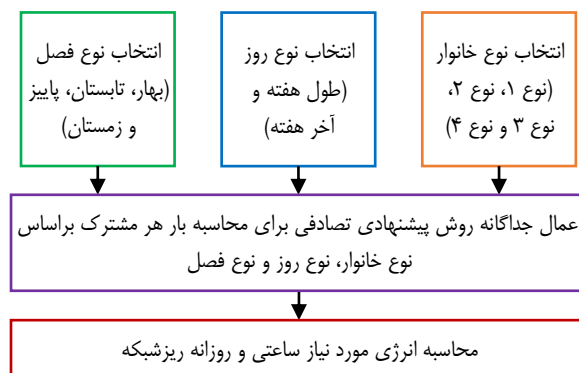
بار الکتریکی

کل نیاز برق یک ریزشبکه مسکونی برابر با مجموع مصرف انرژی تمامی خانوارهای موجود در آن ریزشبکه است. تقاضای برق هر ساختمان بر اساس تابع توزیع احتمال نرمال که در معادله (۶) ارائه شده است، مدل‌سازی شده است [17].

$$f(demand) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

در این رابطه، پارامترهای μ و σ بیان‌کننده میانگین و واریانس پارامتر تصادفی هستند. این مقادیر با توجه به اطلاعات آماری و بار مشترکین گذشته تعیین می‌شوند.

برای محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی کل ریزشبکه، برنامه احتمالاتی پیشنهادی به‌صورت مجزا برای هر ساختمان مسکونی اجرا می‌شود و در این فرآیند، نوع خانوار مربوطه نیز مدنظر قرار می‌گیرد. این روش برای تمامی روزهای سال (۳۶۵ روز) تکرار می‌شود. روندنمای محاسبه انرژی الکتریکی روزانه ریزشبکه در طول فصول مختلف در شکل (۲) ارائه شده است. انواع خانوارها بر اساس دسته‌بندی ارائه‌شده توسط سازمان ملل در سال ۲۰۱۹ انتخاب گردیده‌اند [18].



شکل (۲): روندنمای محاسبه انرژی الکتریکی روزانه مشترکین ریزشکه در طی روزها و فصل های مختلف سال

توربین بادی

در بسیاری از کشورهایی که در زمینه انرژی های پاک پیشرو هستند، توربین های بادی به عنوان یکی از فناوری های رایج منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر شناخته می شوند. عملکرد توربین های بادی ماهیتی تصادفی دارد و مدل احتمالی آن ها بر اساس داده های تاریخی موجود تدوین می شود. با توجه به رفتار سرعت باد و نتایج آزمایش های انجام شده، برای مدل سازی سرعت باد از تابع توزیع راییلی استفاده می شود. این تابع، حالت خاصی از تابع توزیع احتمال ویبول است که در آن شاخص شکل برابر با ۲ در نظر گرفته می شود [19].

تابع توزیع ویبول استفاده شده برای محاسبه سرعت باد توسط رابطه (۷) بیان شده است. در این معادله، K و C به ترتیب شاخص شکل و شاخص مقیاس تابع توزیع ویبول هستند. با توجه به تابع توزیع احتمال ویبول و تغییرات سرعت باد، می توان رابطه بین توان خروجی یک توربین بادی و سرعت باد را به صورت رابطه (۸) بیان کرد.

$$f(v) = \frac{K}{C^K} v^{(K-1)} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} \quad 0 \leq v \leq \infty \quad (7)$$

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq V \leq V_{ci}, V_{co} \leq V \\ P_{w-rated} \times \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_{w-rated} & V_r \leq V \leq V_{co} \end{cases} \quad (8)$$

در این معادلات، V نشان دهنده سرعت باد در ارتفاع توربین بادی است. پارامترهای V_{ci} ، V_r و V_{co} نیز به ترتیب سرعت حداقل، نرمال و حداکثر باد برای به حرکت درآوردن توربین بادی را بیان می کنند. توان خروجی توربین بادی نیز با P_w نشان داده شده است.

پنل فتوولتائیک

پنل های فتوولتائیک یکی از فناوری های کاربردی و تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی به ویژه در مناطق مسکونی محسوب می شوند. با توجه به ماهیت متغیر و احتمالی تابش خورشید، توان خروجی این پنل ها نیز در طول شبانه روز ثابت نبوده و نمی توان مقدار مشخصی برای آن پیش بینی کرد. بر اساس جدیدترین تحقیقات، تابع توزیع بتا مناسب ترین مدل احتمالی برای نمایش تغییرات تابش خورشید به شمار می رود. به

صورت ریاضی، تابع توزیع احتمال بتا برای تابش خورشید طبق رابطه (۹) تعریف شده است. در این معادله، Si نشان‌دهنده میزان تابش خورشید است [20].

$$f(Si) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times Si^{(\alpha-1)} \times (1 - Si)^{(\beta-1)} & \text{if } 0 \leq Si \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

برای محاسبه α و β که پارامترهای مورد استفاده در تابع توزیع احتمال بتا هستند، از روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود. در این معادلات، μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد متغیر تصادفی هستند که با توجه به داده‌های هواشناسی گذشته محاسبه می‌شوند. پس از محاسبه تابع توزیع احتمال تابش خورشید توسط رابطه (۹)، جهت محاسبه توان خروجی پنل فتوولتائیک از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (11)$$

$$P_s(Si) = \eta \times A \times Si \quad (12)$$

در این معادله، η و A به ترتیب نشان‌دهنده بازده و مساحت کل پنل فتوولتائیک هستند.

نحوه استخراج مقادیر عددی بار و منابع ریزشکه

در این مقاله، از ترکیبی از روش ابرمکعب لاتین و الگوریتم خوشه‌بندی کی‌مینز برای تعیین داده‌های تصادفی استفاده شده است. روش ابرمکعب لاتین برای تولید سناریوهای احتمالی به کار می‌رود، در حالی که الگوریتم کی‌مینز وظیفه کاهش تعداد سناریوها را بر عهده دارد. روش ابرمکعب لاتین، که تلفیقی از نمونه‌برداری لایه‌بندی شده و تصادفی است، لایه‌هایی را از کل توزیع متغیرهای تصادفی استخراج می‌کند. این رویکرد نمونه‌برداری قادر است تخمین‌هایی دقیق‌تر و پایدارتر در مقایسه با روش‌های سنتی مانند نمونه‌برداری مونت کارلو ارائه دهد. علاوه بر این، بهبود قابل توجهی در سرعت عملیات نمونه‌برداری نیز حاصل می‌شود. در روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین، در مرحله اول، تعداد N_s نمونه تولید می‌شوند تا ماهیت تصادفی پارامتر احتمالی مثل سرعت باد را نشان دهند. سپس، تابع توزیع تجمعی پارامتر احتمالی به فواصل N_s با احتمال برابر $\frac{1}{N_s}$ تقسیم می‌شود. پس از آن، یک مقدار تصادفی از هر فاصله انتخاب می‌شود. احتمال تجمعی نمونه‌برداری در فاصله i با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. در این معادله، r_{iu} یک عدد تصادفی با تابع توزیع یکنواخت است ($r_{iu} \in (0,1)$). حال، مقدار نمونه‌برداری شده با استفاده از تابع معکوس، معکوس می‌شود. از لحاظ ریاضی، رابطه (۱۴) بیانگر آن است [21].

$$P_i = \left(\frac{1}{N_s} \right) r_{iu} + \frac{(i-1)}{N_s} \quad (13)$$

$$X_i = F^{-1}(P_i) \quad (14)$$

در فرآیند شبیه‌سازی پارامترهای احتمالی و تصادفی، مانند روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین، افزایش تعداد سناریوها موجب افزایش زمان اجرای برنامه می‌شود. از آنجا که شبکه برق به‌عنوان یک سیستم پویا عمل می‌کند، بهره‌بردار شبکه یا سیستم مدیریت انرژی خانگی باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن تصمیمات بهینه را با توجه به شرایط موجود اتخاذ کند. به همین دلیل، استفاده از روش‌های کاهش سناریو برای کم کردن تعداد سناریوهای تولیدشده از پارامترهای احتمالی ضروری به‌نظر می‌رسد. این روش‌ها باعث کاهش زمان محاسباتی موردنیاز برای شبیه‌سازی داده‌های احتمالی می‌شوند. در این مطالعه، به‌منظور کاهش سناریوها، از الگوریتم خوشه‌بندی کی‌مینز استفاده شده است. پایه اصلی این روش بر مرتب‌سازی سناریوهای اولیه پارامترهای احتمالی در قالب خوشه‌ها استوار است. این مرتب‌سازی با توجه به میزان تشابه بین سناریوهای

تولیدشده انجام می‌شود. بدین صورت که مقدار میانگین هر خوشه به‌عنوان داده احتمالی نماینده آن خوشه در نظر گرفته شده و سایر داده‌ها کنار گذاشته می‌شوند. خروجی الگوریتم کی‌مینز شامل داده‌های احتمالی نماینده برای هر خوشه و تعداد سناریوهای اختصاص یافته به هر خوشه است [21].

۴. روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی سالیانه ریز شبکه

در این بخش، نحوه فرمول‌بندی توابع هدف و قیود مرتبط با مسئله مدیریت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، الگوریتم هوشمند چندهدفه به کار گرفته شده و روش تصمیم‌گیری فازی به طور مفصل شرح داده شده‌اند. در انتهای این بخش، روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی سالیانه ریز شبکه به صورت کلی تشریح شده است.

توابع هدف

حداکثر کردن سود شرکت برق (I_{EUP}) و شاخص انرژی الکتریکی پاک (I_{GER}) توابع هدف اصلی برنامه مدیریت انرژی ریز شبکه هستند. توابع هدف مسئله مدیریت انرژی به بیان ریاضی به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$OF = \max \{I_{EUP}, I_{GER}\} \quad (15)$$

شاخص اقتصادی: نیازهای انرژی مصرف‌کنندگان توسط شرکت برق از طریق ترکیبی از منابع مختلف انرژی تامین می‌شود. این منابع شامل انرژی‌های تجدیدپذیر تولیدشده به صورت محلی، انرژی ذخیره‌شده در سیستم‌های ذخیره‌سازی الکتریکی، و انرژی خریداری شده از شبکه بالادستی هستند. در این تحلیل فرض شده است که شرکت برق برای خرید انرژی از شبکه بالادستی باید ۹۰ درصد قیمت بازار برق را پرداخت نماید. در مقابل، هزینه بهره‌برداری از واحدهای محلی تولید انرژی تنها معادل ۱۰ درصد قیمت بازار است. این هزینه عمده‌تاً مربوط به عملیات بهره‌برداری و نگهداری از واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر است. قیمت بازار برق به تعرفه‌ای اشاره دارد که مصرف‌کنندگان باید برای استفاده از انرژی الکتریکی به شرکت بهره‌بردار شبکه پرداخت کنند. علاوه بر این، شرکت برق نیز قادر است انرژی مازاد تولیدی خود را به شبکه بالادستی بفروشد. قیمت فروش انرژی به این شبکه معادل ۸۰ درصد قیمت بازار تعیین شده است. بدین ترتیب، شاخص سودآوری ریز شبکه با استفاده از رابطه (۱۶) تعریف می‌شود.

$$I_{EUP} = \sum_{t=1}^{n_{tp}} [I_{Demand_t} + I_{MG2G_t} - I_{G2MG_t} - I_{REU_t} - I_{ESS_t}] \quad (16)$$

در این رابطه، I_{Demand_t} سود ساعتی فروش انرژی به مصرف‌کنندگان است که با توجه به رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود. پارامتر I_{MG2G_t} که با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود، سود ساعتی فروش انرژی به شبکه اصلی است. هزینه خرید ساعتی برق از شبکه بالادستی با I_{G2MG_t} نشان داده شده است. این هزینه توسط رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری واحدهای انرژی تجدیدپذیر I_{REU_t} و سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی I_{ESS_t} نیز به ترتیب با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شوند.

$$I_{Demand_t} = D_t \times Pr_t \quad (17)$$

$$I_{MG2G_t} = E_{MG2G_t} \times \omega_{MG2G} \times Pr_t \quad (18)$$

$$I_{G2MG_t} = E_{G2MG_t} \times \omega_{G2MG} \times Pr_t \quad (19)$$

$$I_{REU_t} = G_t \times \omega_{Local} \times Pr_t \quad (20)$$

$$I_{ESS_t} = \begin{cases} -1 \times ESS_t \times \omega_{Local} \times Pr_t & \text{if } ESS_t < 0 \\ 0 & \text{if } ESS_t \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

در این روابط، ω_{MG2G} ، ω_{G2MG} و ω_{Local} ضرایب اقتصادی هستند که به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۹ و ۱ هستند.

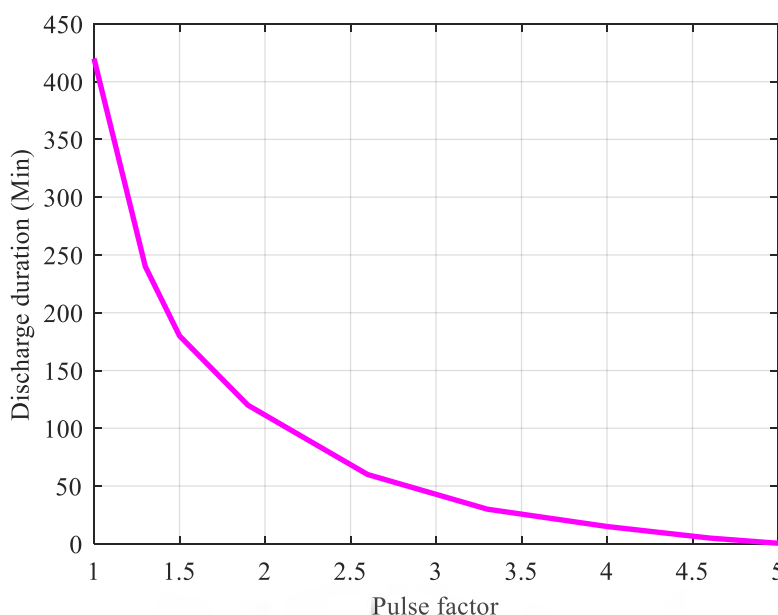
شاخص زیست‌محیطی: یکی از موضوعات مورد توجه در مطالعات مربوط به پایایی و توسعه پایدار سیستم‌های انرژی مربوط به مسائل زیست محیطی است. از زمان انقلاب صنعتی، مشکلات زیست‌محیطی نظیر گرمایش جهانی به دلیل گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی به طور چشمگیری افزایش یافته است. کاهش این معضلات مستلزم به‌کارگیری رویکردهای کارآمد، از جمله جایگزینی واحدهای انرژی تجدیدپذیر به جای منابع تجدیدناپذیر، می‌باشد. بر این اساس، شاخص انرژی الکتریکی پاک در ریزشکه‌ها به عنوان یک هدف کلیدی مطرح شده است. برای ارزیابی این شاخص، از فرمول ارائه‌شده در رابطه (۲۲) بهره گرفته می‌شود که برای تحلیل میزان سازگاری سیستم با الزامات زیست‌محیطی است.

$$I_{GER} = \frac{G_P + E_{ESS_d}}{D_P + E_{ESS_c}} \quad (22)$$

در این رابطه، D_P تقاضای برق ریزشکه در طول یک دوره معین و E_{ESS_c} انرژی شارژ شده در سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در این زمان است. G_P و E_{ESS_d} نیز به ترتیب مقدار انرژی استفاده شده از منابع انرژی تجدیدپذیر محلی و سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی برای تامین برق مورد نیاز ریزشکه در طول دوره بهره برداری را نشان می‌دهند.

قیود

در این مطالعه، فناوری سدیم-گوگرد (NaS) به عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ریزشکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. چرخه الکتروشیمیایی NaS در حالت‌های شارژ و دشارژ به این صورت عمل می‌کند که در مدت زمان تخلیه، فرآیند اکسیداسیون رخ می‌دهد و در دوره شارژ، سدیم بازگشت‌پذیر کاهش می‌یابد و گوگرد مذاب اکسید می‌شود. این ویژگی به سیستم ذخیره‌سازی NaS این امکان را می‌دهد که تنظیم توان تخلیه‌شده را به صورت مستقل انجام دهد [22]. توان نامی باتری NaS بر اساس ظرفیت مبدل و ضریب پالس قابل تغییر است و می‌توان آن را در بازه یک تا پنج تنظیم کرد، که این امر منجر به افزایش توان خروجی می‌شود. از سوی دیگر، مدت زمان تخلیه، مطابق آنچه در شکل (۳) نشان داده شده، با توجه به مقدار پالس NaS و توان تخلیه‌شده بین ۳۰ ثانیه تا ۷ ساعت متغیر است. به عبارت دیگر، ضریب پالس NaS تعیین‌کننده مقدار توان تخلیه و مدت زمان آن خواهد بود. با این حال، باید توجه داشت که هرچند افزایش ضریب پالس NaS می‌تواند توان تخلیه احتمالی را افزایش داده و مدت زمان تخلیه را کاهش دهد، اما این امر به دلیل بالا رفتن دمای داخلی باتری منجر به افزایش تلفات انرژی خواهد شد. بنابراین، انتخاب دقیق توان شارژ و دشارژ متناسب با نیاز سیستم ذخیره‌سازی NaS در هر بازه زمانی از اهمیت بالایی برخوردار است [23].



شکل (۳): تاثیر ضریب پالس باتری NaS بر مدت زمان دشارژ سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی

در طی مدیریت برنامه شارژ/دشارژ بهینه برای سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی NaS باید معادلات (۲۳)–(۳۰) در نظر گرفته شود [23].

$$M_{ESSDis}(t) \leq N_{Pulse}(t) \leq 2.6 \times M_{ESSDis}(t) \quad (23)$$

$$0 \leq P_{ESSDis}(t) \leq N_{Pulse}(t) \times P_{ESS}^{max} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{ESSCh}(t) \leq M_{ESSCh}(t) \times P_{ESS}^{max} \quad (25)$$

$$M_{ESSCh}(t) + M_{ESSDis}(t) \leq 1 \quad (26)$$

$$SOC_{ESS}(t) = SOC_{ESS}(t-1) - (P_{ESSCh}(t) \times \eta_{ESS}) - P_{ESSDis}(t) - P_{loss}(t) \quad (27)$$

$$SOC_{ESS}^{min} \leq SOC_{ESS}(t) \leq SOC_{ESS}^{max} \quad (28)$$

$$P_{loss}(t) = \frac{7 - [N_{Pulse}(t) - D_d(t)]}{D_d(t)} M_{ESSDis}(t) \quad (29)$$

$$D_d(t) = -3.4497N_{Pulse}(t)^3 + 21.5962N_{Pulse}(t)^2 - 45.7961N_{Pulse}(t) + 34.7117 \quad (30)$$

در روابط (۲۳) الی (۳۰)، $P_{ESSCh}(t)$ و $P_{ESSDis}(t)$ توان شارژ و دشارژ باتری NaS در بازه زمانی t را نشان می‌دهند، در حالی که P_{ESS}^{max} حداکثر نرخ توان باتری است. پارامترهای $M_{ESSDis}(t)$ و $M_{ESSCh}(t)$ مقادیر باینری هستند که حالت های شارژ و دشارژ باتری NaS در بازه زمانی t را نشان می‌دهند. $N_{Pulse}(t)$ ضریب پالس NaS را نشان می‌دهد که طبق رابطه (۲۳) باید کمتر از ۲/۶ باشد. معادلات (۲۴) و (۲۵) به ترتیب حد پایین و بالایی دشارژ و شارژ باتری را نشان می‌دهند. معادله (۲۶) برای رفع تعارض بین حالت های شارژ و دشارژ در یک دوره خاص در نظر گرفته شده است. وضعیت شارژ باتری (SOC) توسط رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود. این معادله نشان می‌دهد که SOC باتری در زمان جاری $SOC_{ESS}(t)$ برابر است با مجموع SOC آن در زمان قبلی و توان شارژ یا دشارژ شده و تلفات توان $P_{loss}(t)$ در این دوره زمانی. پارامتر η_{ESS} بازده باتری است. طبق رابطه (۲۸)، SOC فعلی باتری در بازه زمانی t باید بین حداقل SOC_{ESS}^{min} و حداکثر SOC_{ESS}^{max} سطح SOC آن باشد. اتلاف برق باتری در حالت دشارژ با رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود. $D_d(t)$ مدت زمان تخلیه باتری NaS است که توسط رابطه

(۳۰) محاسبه می شود. همانطور که در این معادله نشان داده می شود، مدت زمان تخلیه باتری با ضریب پالس NaS مرتبط است. علاوه بر این، در سناریوی اول مدیریت انرژی که در آن مدیریت انرژی سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی به طور جداگانه برای هر روز از سال بررسی می شود، محدودیت (۳۱) در نظر گرفته شده است. این رابطه بیان می کند که SOC باطری در انتهای هر روز SOC_{end_d} به منظور ایجاد امکان استفاده از باطری در روز آینده باید با SOC باطری در ابتدای روز $SOC_{initial_d}$ برابر باشد.

$$SOC_{end_d} = SOC_{initial_d} \quad (31)$$

در سناریوی دوم مدیریت انرژی که در آن انرژی ذخیره شده باطری در پایان یک روز برای مدیریت انرژی سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی در روزهای دیگر نیز در نظر گرفته می شود، به جای رابطه (۳۱) محدودیت (۳۲) در نظر گرفته می شود. این رابطه بیان می کند که SOC باطری در ابتدای روز $SOC_{initial_d}$ برابر با SOC باطری در انتهای روز قبلی $SOC_{end_{d-1}}$ است.

$$SOC_{initial_d} = SOC_{end_{d-1}} \quad (32)$$

الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی

الگوریتم بهینه سازی چندهدفه چندوجهی (MOMVO) برای حل توابع هدف پیچیده و دستیابی به مجموعه ای از راه حل های نهایی و غیر غالب طراحی شده است. این الگوریتم، همچون بسیاری از دیگر تکنیک های بهینه سازی، از پدیده های طبیعی الهام گرفته است. در الگوریتم MOMVO، نظریه چندوجهی به عنوان پایه ای برای ایجاد و شبیه سازی جهان عمل می کند. این نظریه بیان می کند که بیگ بنگ های متعدد در شکل گیری جهان های مختلف نقش داشته اند، به طوری که هر رخداد بیگ بنگ به پیدایش یک جهان منحصر به فرد منجر می شود. بر اساس این نظریه، سه نوع مشخص از ساختارهای فضایی وجود دارند: سفیدچاله ها، سیاهچاله ها و کرمچاله ها. سفیدچاله ها که تاکنون در جهان ما مشاهده نشده اند، به عنوان عوامل اساسی در خلق جهان شناخته می شوند. از سوی دیگر، سیاهچاله ها که بارها مشاهده شده اند، دارای نیروی گرانشی بسیار قوی هستند که می توانند تمامی مواد، حتی نور، را جذب کنند. در نهایت، کرمچاله ها عملکردی اتصال دهنده داشته و به عنوان گذرگاه هایی برای ارتباط بین نقاط مختلف یک جهان عمل می کنند. در الگوریتم MOMVO، مفاهیم سفیدچاله و سیاهچاله برای بررسی فضای جستجو به کار گرفته می شوند، در حالی که کرمچاله ها فرآیند بهره برداری مؤثر از این فضاها را تسهیل می کنند. ساختار بهینه سازی این الگوریتم تضمین می کند که نرخ تورم بالاتر با افزایش احتمال روبرو شدن با سفیدچاله ها و کاهش مواجهه با سیاهچاله ها همراه است. در نتیجه، در جهان هایی با نرخ تورم بالا، اجرام عمدتاً از طریق سفیدچاله ها منتقل می شوند، در حالی که در جهان هایی با نرخ تورم پایین تر، میزان بیشتری از اجرام از مسیر سیاهچاله ها عبور می کنند. به بیان ریاضی، این الگوریتم موقعیت جهان ها که نمایانگر ذرات مسئله هستند را بر اساس رابطه ی (۳۳) به روزرسانی می کند [24].

$$X_i^j = \begin{cases} \text{if } r_2 < C_W \text{ then } X_i^j = \begin{cases} X_j + [C_T \times (j_{max} - j_{min}) \times r_4 + j_{min}] & \forall \quad r_3 < 0.5 \\ X_j - [C_T \times (j_{max} - j_{min}) \times r_4 + j_{min}] & \forall \quad r_3 \geq 0.5 \end{cases} \\ \text{if } r_2 \geq C_W \text{ then } X_i^j = X_i^j \end{cases} \quad (33)$$

در این رابطه، X_i^j پارامتر j ام جهان را نشان می دهد در حالی که X_j پارامتر i ام بهترین جهان را نشان می دهد. j_{max} و j_{min} حداقل و حداکثر کران پارامتر j را نشان می دهند. پارامترهای r_2 ، r_3 و r_4 اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. C_T و C_W ضرایبی هستند که با استفاده از روابط (۳۴) و (۳۵) محاسبه می شوند. در این معادلات n_i و n_{max} به ترتیب شماره تکرار و حداکثر تعداد تکرارها را نشان می دهند.

$$C_W = 0.2 + \left(n_i \times \frac{0.8}{n_{max}} \right) \quad (34)$$

$$C_T = 1 - \left(\frac{n_i}{n_{max}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (35)$$

روش تصمیم‌گیری فازی

در این پژوهش، به منظور دستیابی به تعادلی بهینه میان ذرات و اهداف مشخص‌شده آن‌ها و همچنین انتخاب بهینه‌ترین ذره به‌عنوان مطلوب‌ترین گزینه در برنامه مدیریت انرژی، از رویکرد تصمیم‌گیری فازی بهره گرفته شده است. رویکرد فازی بر این اساس شکل می‌گیرد که برای هر ذره و هر یک از توابع هدف مرتبط با آن، تابع عضویتی تعریف می‌شود. در نهایت، با استفاده از روابطی که در ادامه معرفی خواهند شد، ذره‌ای که بیشترین مقدار تابع عضویت را دارد، به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌گردد. برای محاسبه تابع عضویت مربوط به هر تابع هدف یک ذره نامغلوب از میان اعضای جبهه پارتو، از رابطه (۳۶) استفاده می‌شود. همچنین، تابع عضویت کلی مرتبط با هر ذره، با توجه به مقادیر تابع عضویت هر یک از توابع هدف آن، از طریق رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود [25].

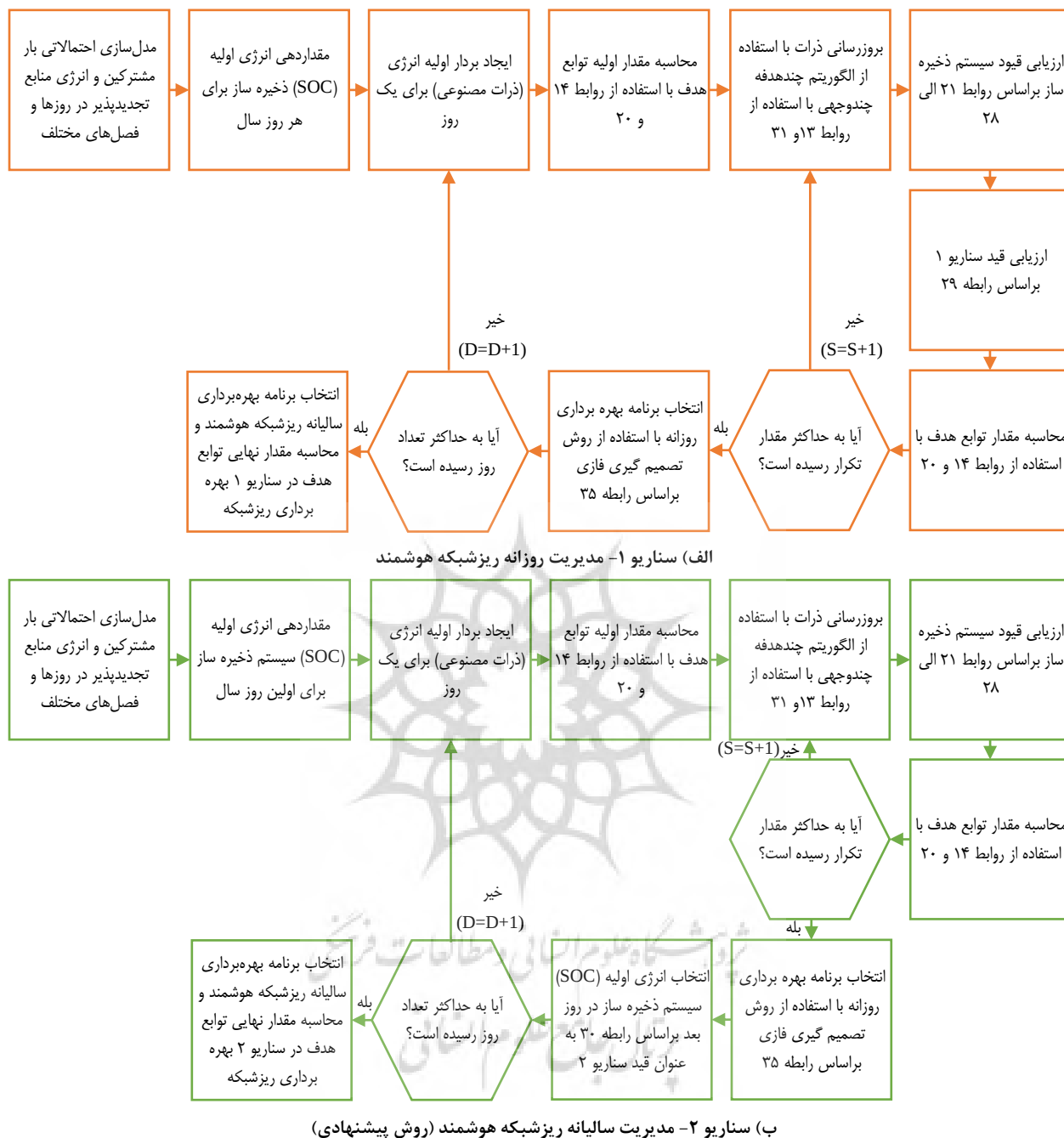
$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & f_i^k \leq f_i^{min} \\ \frac{f_i^{max} - f_i^k}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} < f_i^k < f_i^{max} \\ 0 & f_i^{max} \leq f_i^k \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{NK} \sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k} \quad (37)$$

در روابط فوق، f_i^{min} و f_i^{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیری هستند که از بهینه‌سازی هر کدام از توابع هدف به تنهایی حاصل می‌شوند. NO تعداد توابع هدف و NK نیز تعداد ذره‌های نامغلوب موجود در صفحه پارتو هستند. در حالت کلی، تابع عضویت مقداری بین صفر و یک است، به نحوی که $\mu_i^k = 0$ نامطلوب‌ترین و $\mu_i^k = 1$ مطلوب‌ترین نتیجه حاصل شده هستند. بنابراین، بعد از محاسبه مقدار نرمالایز شده تابع عضویت برای تمامی ذرات نامغلوب از رابطه (۳۷)، ذره‌ای که دارای بیشترین مقدار تابع عضویت است به‌عنوان بهینه‌ترین برنامه مدیریت انرژی ریزشکه هوشمند انتخاب می‌شود.

روش کلی مدیریت انرژی

در بخش‌های پیشین، موضوع مدیریت انرژی در یک ریزشکه هوشمند با هدف بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور مفصل بررسی شد. در این راستا، توابع هدف و قیود مسئله مدل‌سازی گردید و جزئیات برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از ریزشکه ارائه شد. به‌طور کلی، روش پیشنهادی مدیریت انرژی سالانه یک ریزشکه مسکونی در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴): روندنمای روش مدیریت انرژی سالیانه ریزش شبکه هوشمند در دو سناریو بهره برداری روزانه و سالیانه

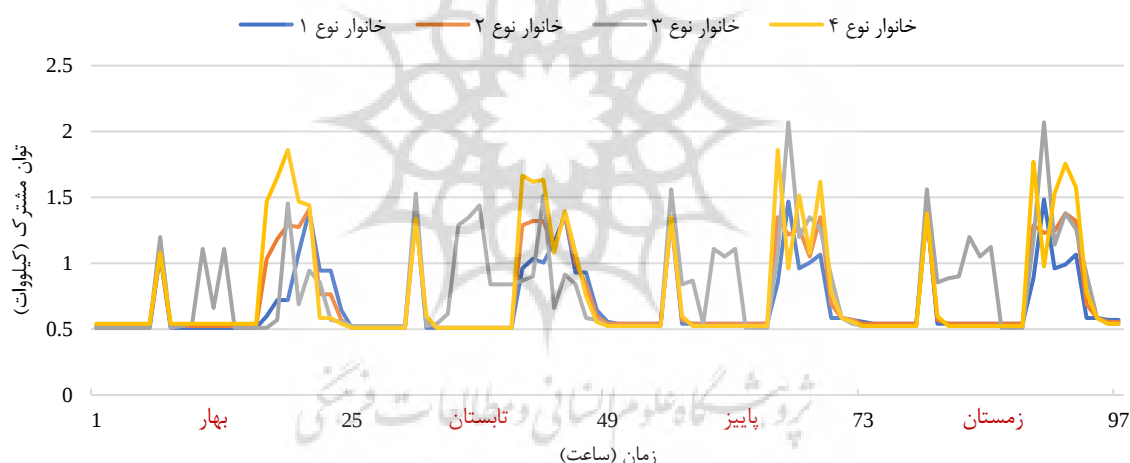
۵. مطالعات عددی و ارزیابی نتایج

در این بخش، روش پیشنهادی برای مدیریت سالیانه یک ریزش شبکه، با در نظر گرفتن ادوات مختلف انرژی که پیش تر به تفصیل شرح داده شده اند، به صورت عددی مورد ارزیابی قرار می گیرد. ابتدا اطلاعات سیستم مورد مطالعه معرفی شده و سپس با استفاده از نتایج به دست آمده،

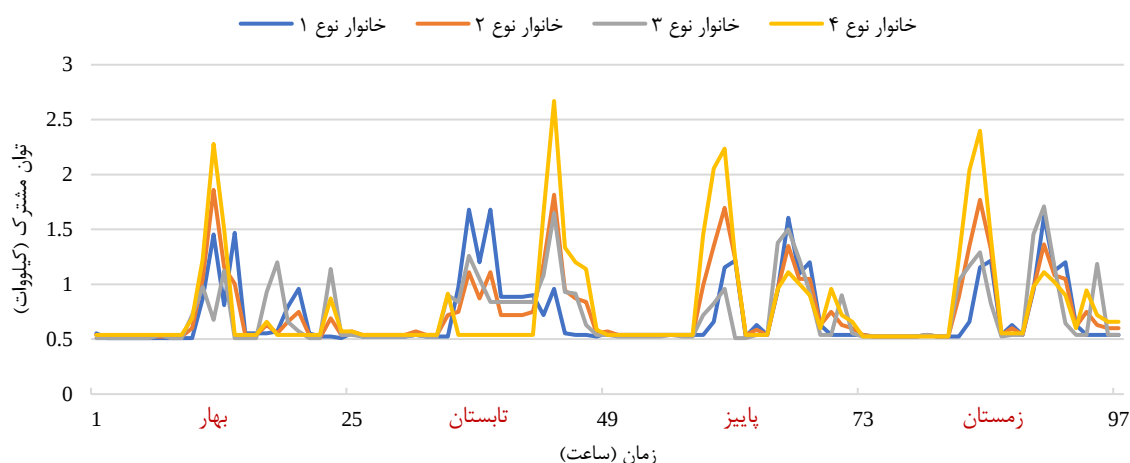
کارایی روش پیشنهادی در مدیریت انرژی تحلیل می‌شود. ریزشبه در نظر گرفته شده برای ارزیابی عددی روش پیشنهادی، شبکه برق یک شهر کوچک مسکونی است. این ریزشبه قابلیت استفاده از توربین های بادی محلی و پنل های فتوولتائیک را دارد. یک سیستم ذخیره سازی الکتریکی سدیم-گوگرد نیز در ریزشبه موجود است.

فرض شده است که این ریزشبه دارای ۱۰۰ ساختمان مسکونی (خانه) است. بر اساس تقسیم بندی سازمان ملل متحد، چهار نوع خانوار در این MG زندگی می کنند. انواع این خانواده ها عبارتند از [18]: نوع ۱ (خانواده تک نفره)، نوع ۲ (خانواده ۲ یا ۳ نفره)، نوع ۳ (خانواده ۴ یا ۵ نفره)، و نوع ۴ (خانواده ۶ نفره یا بیشتر).

ترکیب واحدهای مسکونی بر اساس انواع مختلف خانوارها، مطابق با تقسیم بندی جمعیت ارائه شده توسط سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۹ انتخاب شده است. طبق این گزارش، خانوارهای دسته بندی شده در خانوارهای نوع ۱، نوع ۲، نوع ۳ و نوع ۴ به ترتیب در ۱۴، ۳۳، ۲۹ و ۲۵ ساختمان توزیع شده اند [18]. مقادیر میانگین تقاضای برق برای هر نوع خانوار در طول روزهای هفته و آخر هفته به ترتیب در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است. همچنین، واریانس تغییرات مصرف در تمامی ساعات شبانه روز برابر با ۰/۲ است [26]. روش تصادفی پیشنهادی برای محاسبه تقاضای احتمالی ریزشبه به طور جداگانه برای ۱۰۰ خانه بر اساس نوع خانوار آنها اجرا شده است. این روش برای تمام روزهای سال (۳۶۵ روز) اجرا می شود.

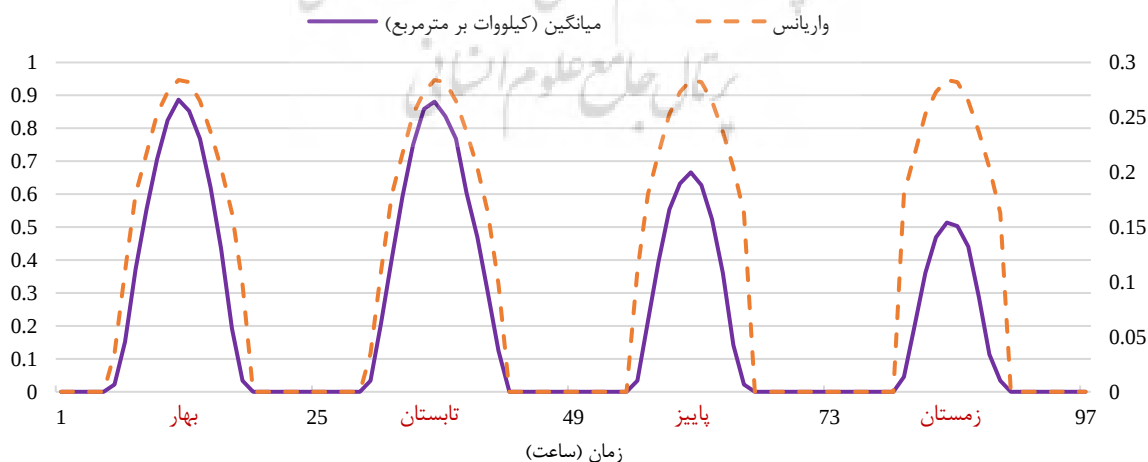


شکل (۵): متوسط انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین مختلف ریزشبه هوشمند در طول هفته

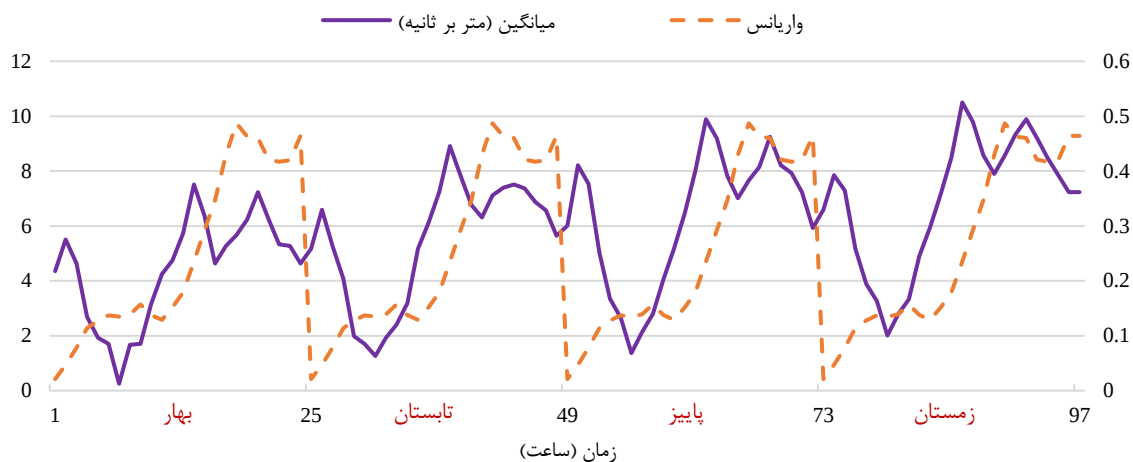


شکل (۶): متوسط انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین مختلف ریزشبکه هوشمند در آخر هفته

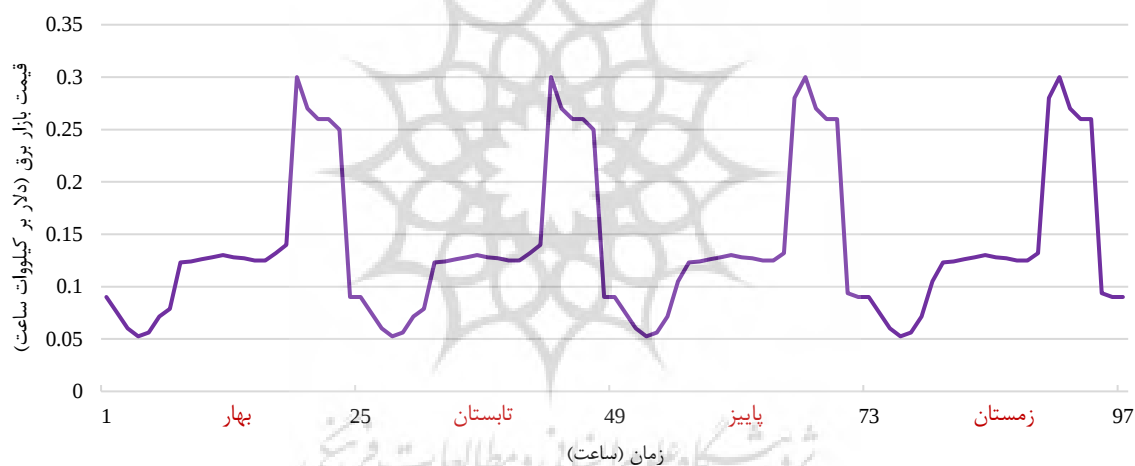
نیروگاه خورشیدی موجود در ریزشبکه هوشمند از ۱۰۰۰ پنل خورشیدی مدل PMB6۶۵۵ ساخت شرکت TW Solar با ظرفیت ۶۵۵ وات بهره می‌برد. بنابراین، مجموع ظرفیت نیروگاه خورشیدی به ۶۵۵ کیلووات می‌رسد [27]. همچنین، توربین بادی استفاده‌شده در این ریزشبکه از مدل Westas V39-500kW شرکت با ظرفیت تولید ۵۰۰ کیلووات است [28]. میانگین و واریانس تابش خورشیدی در فصول مختلف در شکل (۷) نمایش داده شده است، در حالی که شکل (۸) اطلاعات مربوط به میانگین و واریانس سرعت باد در طول فصول مختلف را ارائه می‌دهد [29]. سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی دارای ظرفیتی معادل ۱۰ مگاوات ساعت است. این باتری قادر است با حداکثر سرعت شارژ و دشارژ ۵۰۰ کیلووات در ساعت عمل کند. بازده آن نیز در فرآیند شارژ و دشارژ برابر با ۰/۹۷ می‌باشد. برای جلوگیری از تخلیه عمیق و خالی شدن کامل، سطح شارژ (SOC)، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی باید همیشه حداقل ۲۰ درصد باشد [30]. قیمت بازار سیستم توزیع در فصول مختلف در شکل (۹) ارائه شده است [10].



شکل (۷): میانگین و واریانس شدت تابش خورشید در فصول مختلف

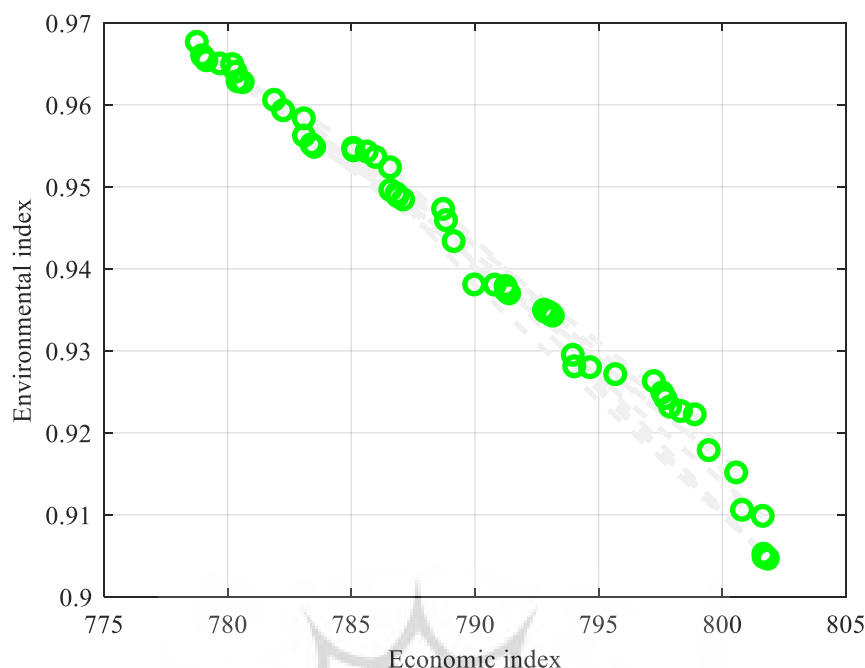


شکل (۸): میانگین و واریانس سرعت باد در فصول مختلف



شکل (۹): قیمت بازار برق در ریزشکده هوشمند در طی فصول مختلف

ابتدا الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی برای بهینه سازی توابع هدف اقتصادی و زیست محیطی استفاده می شود. شکل (۱۰) نمونه جبهه پارتو پس از اعمال الگوریتم چندهدفه به مسئله مدیریت انرژی را نشان می دهد. سپس، روش تصمیم گیری فازی برای انتخاب یک راه حل بدون تسلط واحد از جبهه پارتو برای ارزیابی عددی نتایج استفاده می شود.



شکل (۱۰): صفحه بهینه پارتو و ذرات نامغلوب پس از اعمال الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در دو سناریو شامل، سناریو ۱: مدیریت انرژی روزانه در طول یک سال، و سناریو ۲: مدیریت انرژی روزانه در طول سال با در نظر گرفتن امکان استفاده از انرژی روزهای دیگر، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، نتایج عددی بر اساس حالت‌های بهره‌برداری زیر ارائه شده است:

حالت ۱: ریزشکه بدون منابع تجدیدپذیر و باتری

حالت ۲: ریزشکه با توربین بادی و بدون باتری

حالت ۳: ریزشکه با پنل خورشیدی و بدون باتری

حالت ۴: ریزشکه با توربین بادی و باتری با در نظر گرفتن سناریو ۱

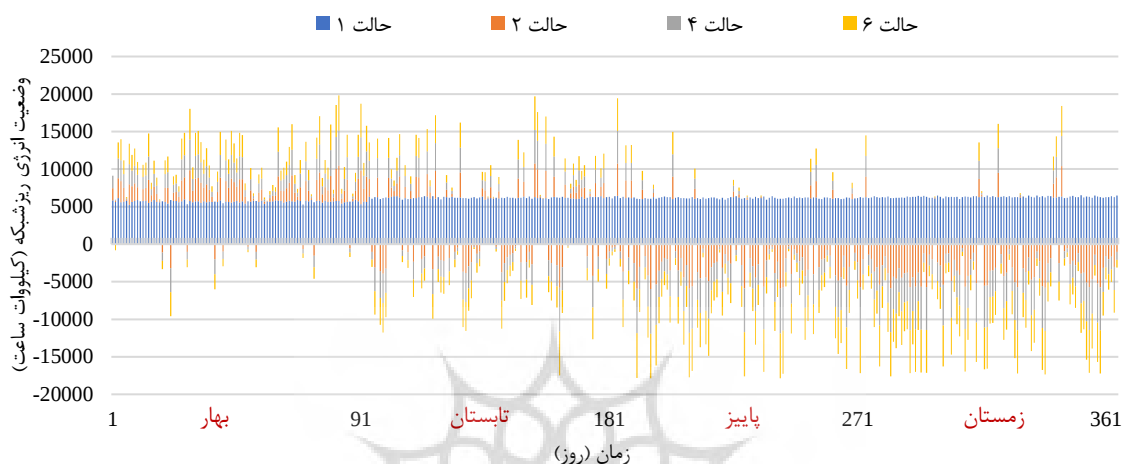
حالت ۵: ریزشکه با پنل خورشیدی و باتری با در نظر گرفتن سناریو ۱

حالت ۶: ریزشکه با توربین بادی و باتری با در نظر گرفتن سناریو ۲

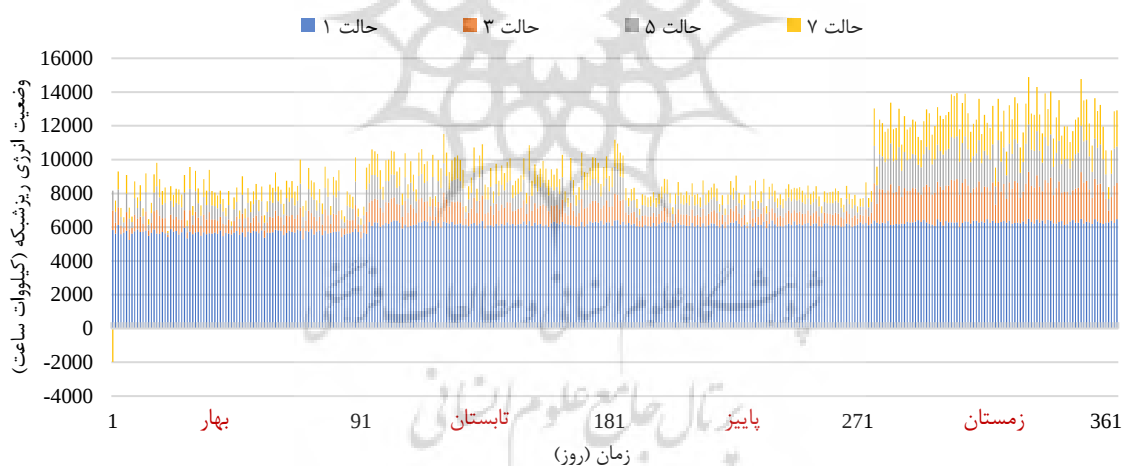
حالت ۷: ریزشکه با پنل خورشیدی و باتری با در نظر گرفتن سناریو ۲

وضعیت انرژی ریزشکه با در نظر گرفتن شرایط متنوع در شکل (۱۱) مورد تحلیل قرار گرفته است. بخش (الف) از این شکل، حالت‌های مختلف بهره‌برداری در حضور توربین بادی را نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های این بخش، مشخص است که ریزشکه در فصول پاییز و زمستان از استقلال بیشتری برخوردار بوده و بدین ترتیب قادر است در اکثر روزها انرژی مازاد خود را به شبکه بالادستی تزریق کند. از سوی دیگر، بخش (ب) شکل ۱۱ به بررسی حالت‌های بهره‌برداری در حضور پنل خورشیدی می‌پردازد. نتایج حاکی از آن است که در این شرایط، ریزشکه طی تابستان و زمستان نیاز بیشتری به تأمین انرژی از شبکه بالادستی دارد. لازم به ذکر است که اگرچه تابستان‌ها انرژی خورشیدی بیشتری در

دسترس است، اما افزایش تقاضای انرژی الکتریکی مصرفی در این فصل نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کند. در هر دو سناریو (حضور توربین بادی یا استفاده از پنل خورشیدی)، روش پیشنهادی که شامل حالت‌های بهره‌برداری ۶ و ۷ می‌شود، بیشترین تأثیر را در مدیریت وضعیت انرژی ریزشکه دارد. بر اساس این روش، انرژی ذخیره شده در روزها و فصول گذشته به نحوی بهینه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد تا در روزهایی که عرضه انرژی کمتر از مقدار تقاضای مصرفی است، نیاز انرژی به بهترین شکل تأمین شود.



الف) وضعیت انرژی ریزشکه در حالت های بهره برداری با حضور توربین بادی



ب) وضعیت انرژی ریزشکه در حالت های بهره برداری با حضور پنل خورشیدی

شکل (۱۱): وضعیت انرژی ریزشکه در حالت های مختلف بهره‌برداری

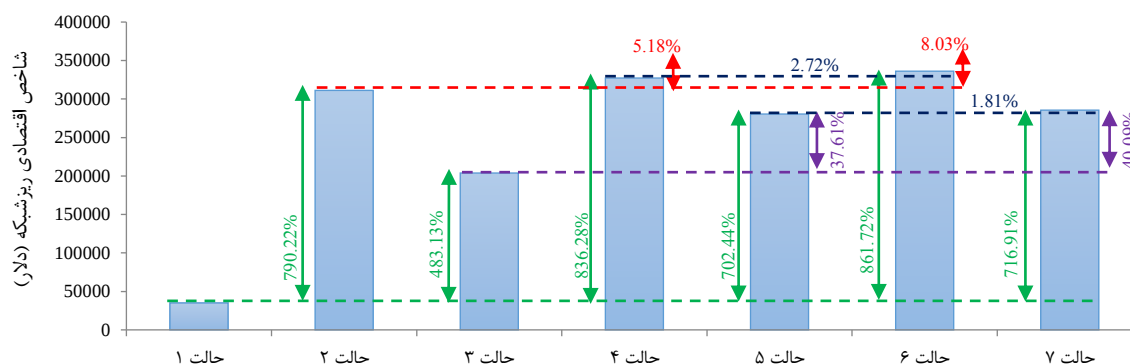
در جدول (۱)، سود فصلی و سالانه شرکت بهره‌بردار ریزشکه هوشمند در شرایط مختلف بهره‌برداری تحلیل شده است. در حالت‌های ۳، ۵ و ۷ که به دسترسی پنل خورشیدی اختصاص دارند، فصل پاییز با تأثیر تقریبی ۲۷ درصد بیشترین و زمستان با تأثیر حدود ۲۳ درصد کمترین سهم را در شاخص سود ریزشکه دارد. تابستان و بهار نیز به ترتیب ۲۶ و ۲۴ درصد از سود سالانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از سوی دیگر، در حالت‌های ۲، ۴ و ۶ که به دسترسی توربین بادی مرتبط هستند، بیشترین تأثیر سود به زمستان با ۳۰ درصد و کمترین تأثیر به بهار با ۱۶ درصد تعلق دارد. در این موارد، تابستان و پاییز به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد روی شاخص اقتصادی ریزشکه اثرگذار هستند. روش پیشنهادی، که در

شرایط ۶ و ۷ مورد استفاده قرار گرفته است، امکان بهره‌گیری از انرژی مزاد روزانه یا فصلی برای تأمین نیازهای انرژی در زمان‌های دیگر را فراهم می‌آورد. این استراتژی به‌طور قابل ملاحظه‌ای منجر به افزایش سود فصلی شرکت برق در مقایسه با سایر شیوه‌های بهره‌برداری شده است.

جدول (۱): شاخص سود ریزشکه هوشمند در حالت های مختلف بهره‌برداری

حالت بهره‌برداری	شاخص اقتصادی ریزشکه (هزار دلار)				سال
	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	
۱	۸/۱۸۰	۸/۹۶۰	۸/۲۴۰	۸/۹۹۰۰	۳۴/۹۶۰
۲	۵۰/۳۰	۷۴/۰۹	۸۹/۹۸	۹۶/۸۱۰	۳۱۱/۱۹
۳	۵۰/۴۰	۵۳/۴۲	۵۵/۰۵	۴۴/۹۸۰	۲۰۳/۸۴
۴	۵۵/۴۶	۸۰/۸۱	۹۲/۲۰	۹۸/۸۳۰	۳۲۷/۲۹
۵	۶۷/۶۵	۷۲/۱۵	۷۵/۱۲	۶۵/۵۷۰	۲۸۰/۵۱
۶	۵۶/۸۰	۸۱/۵۹	۹۵/۹۷	۱۰۱/۸۲	۳۳۶/۱۸
۷	۶۹/۳۱	۷۳/۴۶	۷۶/۱۷	۶۶/۶۲۰	۲۸۵/۵۶

شکل (۱۲) نرخ بهبود شاخص اقتصادی ریزشکه را که نشان‌دهنده سود سالانه شرکت برق در شرایط مختلف بهره‌برداری است، به تصویر می‌کشد. اگرچه استفاده از دستگاه‌های انرژی محلی (مانند منابع تجدیدپذیر و باتری) نسبت به حالت پایه (حالت ۱) بهبود چشمگیری در سود ایجاد می‌کند، اما نرخ بهبود روش پیشنهادی از سایر حالت‌ها بالاتر است. تاثیر استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کنار واحدهای تجدیدپذیر، به‌ویژه هنگام استفاده از پیل فتوولتائیک در ریزشکه، قابل توجه است. در حالت‌های ۴ و ۶، میزان سود به ترتیب حدود ۵ و ۸ درصد بیشتر از حالت ۲ است که تنها توربین بادی در آن استفاده می‌شود. این در حالی است که در حالت‌های ۵ و ۷، سود نسبت به حالت ۳، که فقط پیل فتوولتائیک به کار گرفته شده، به ترتیب حدود ۳۸ و ۴۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. با توجه به سناریوهای مرتبط با سیستم ذخیره‌ساز انرژی، روش پیشنهادی سودآوری بیشتری نسبت به مدیریت مستقل روزانه دارد. به گونه‌ای که در حالت ۶ نسبت به حالت ۴، سود حدود ۳ درصد بیشتر است و در حالت ۷ نیز نسبت به حالت ۵، حدود ۲ درصد سود بیشتری حاصل می‌شود. با در نظر گرفتن نوع منبع تجدیدپذیر، مشاهده می‌شود که توربین بادی به دلیل زمان دسترسی بیشتر، در مقایسه با پیل خورشیدی مزیت بیشتری از نظر سودآوری دارد. در حالت ۶، که مدیریت توربین بادی و باطری بر مبنای روش پیشنهادی انجام می‌شود، سود سالانه حدود ۱۸ درصد بالاتر از حالتی است که پیل فتوولتائیک جایگزین توربین بادی شده است (حالت ۷). در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی بر اساس شاخص سود سالانه شرکت برق کارایی مناسبی از خود ارائه می‌دهد.



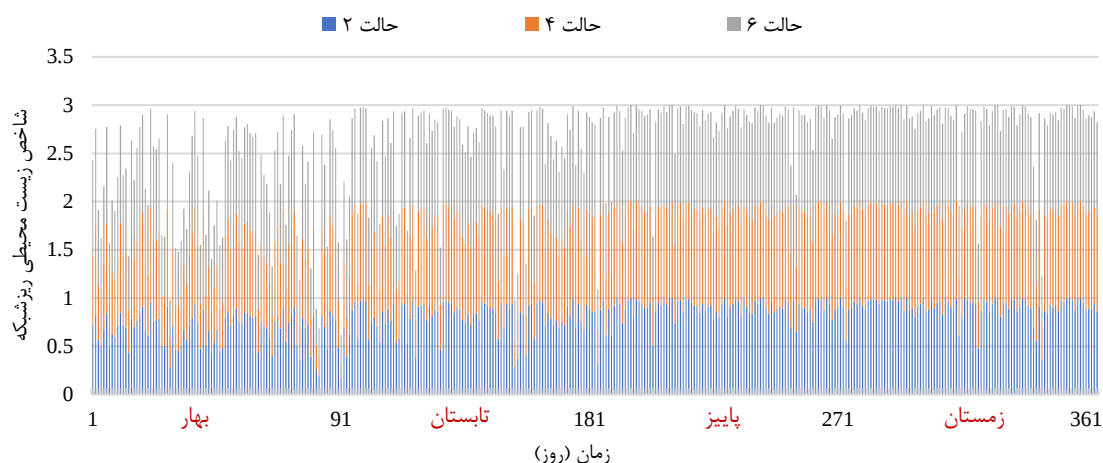
شکل (۱۲): میزان بهبود شاخص اقتصادی ریزشبهک هوشمند در حالت‌های مختلف بهره‌برداری

جدول (۲) شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهک را در شرایط مختلف بهره‌برداری به صورت فصلی و سالیانه نشان می‌دهد. در حالت ۳، انرژی خورشیدی تنها قادر به تأمین حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از تقاضاست، در حالی که توربین بادی در حالت ۲ می‌تواند بین ۶۷ تا ۹۱ درصد از نیاز برق ریزشبهک را در فصول مختلف تأمین کند. با اینکه ادغام باتری با منابع تجدیدپذیر باعث افزایش شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهک می‌شود، نرخ بهبود در روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است. همچنین، با اعمال روش مدیریت انرژی پیشنهادی، ریزشبهک به مدت بیشتری به صورت مستقل عمل می‌کند.

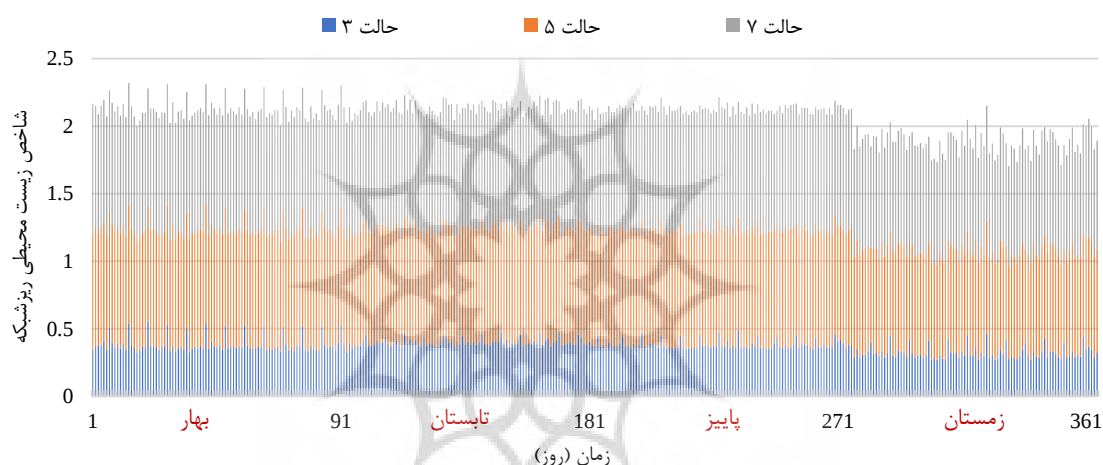
جدول (۲): شاخص زیست‌محیطی ریزشبهک هوشمند در حالت‌های مختلف بهره‌برداری

حالت بهره‌برداری	شاخص زیست‌محیطی ریزشبهک			
	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
۱	-	-	-	-
۲	۰/۶۶۸۳	۰/۸۰۳۲	۰/۸۹۶۶	۰/۹۱۴۸
۳	۰/۳۸۳۹	۰/۳۹۹۴	۰/۳۸۱۲	۰/۳۲۲۳
۴	۰/۷۰۶۳	۰/۸۶۹۲	۰/۹۶۰۷	۰/۹۶۸۹
۵	۰/۸۵۴۴	۰/۸۴۸۷	۰/۸۵۳۲	۰/۷۵۸۵
۶	۰/۸۱۶۱	۰/۹۲۴۵	۰/۹۸۱۱	۰/۹۷۹۹
۷	۰/۸۸۸۱	۰/۸۸۵۹	۰/۸۹۲۲	۰/۸۰۶۷

شکل (۱۳) وضعیت شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهک را در شرایط مختلف بهره‌برداری نمایش می‌دهد. میزان انرژی خریداری شده از شبکه بالادستی، که عموماً منبعی غیرتجدیدپذیر است، معمولاً کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل، روش پیشنهادی موجب بهبود عملکرد روزانه، فصلی و سالانه ریزشبهک بر مبنای این شاخص زیست‌محیطی می‌شود. نرخ بهبود سالانه شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهک در سناریوهای مختلف بهره‌برداری در شکل (۱۴) نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقدار این شاخص در حالت ۱ برابر با صفر است؛ اما در سایر سناریوها، بخشی از تقاضای ریزشبهک در طول سال می‌تواند با استفاده از منابع تجدیدپذیر تأمین گردد.

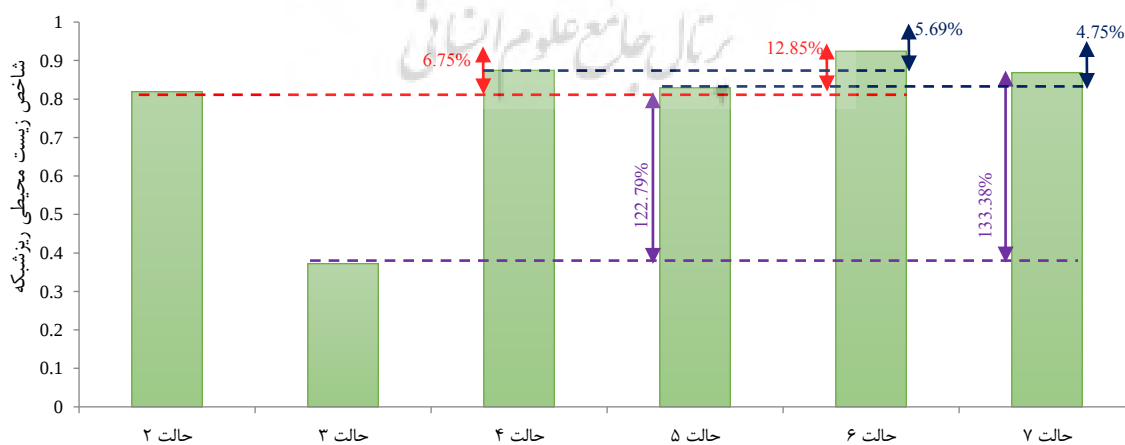


الف) شاخص زیست محیطی ریزشکه در حالت های بهره برداری با حضور توربین بادی



ب) شاخص زیست محیطی ریزشکه در حالت های بهره برداری با حضور پنل خورشیدی

شکل (۱۳): شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشکه هوشمند به صورت روزانه در حالت های مختلف بهره برداری



شکل (۱۴): میزان بهبود شاخص زیست محیطی ریزشکه هوشمند در حالت های مختلف بهره برداری

مشابه شاخص اقتصادی، تأثیر سیستم ذخیره‌ساز انرژی همراه با منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه هنگامی که از پنل خورشیدی در ریزشبهه استفاده می‌شود، قابل توجه است. برای مثال، در حالت‌های ۴ و ۶ شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهه به ترتیب حدود ۷ و ۱۳ درصد نسبت به حالت ۲ بهبود یافته است. همچنین در حالت‌های ۵ و ۷، این شاخص به ترتیب حدود ۱۲۳ و ۱۳۳ درصد نسبت به حالت ۳ افزایش نشان داده است. با بررسی سناریوهای استفاده از باتری، روش پیشنهادی شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهه بالاتری را نسبت به مدیریت روزانه جداگانه ارائه می‌کند؛ به‌طوری که در حالت ۶ این شاخص حدود ۶ درصد بیشتر از حالت ۴ افزایش یافته و در حالت ۷ نیز حدود ۵ درصد بهبود بیشتری نسبت به حالت ۵ مشاهده شده است. در ترکیب منابع تجدیدپذیر و سیستم ذخیره باتری، تأثیر توربین بادی نسبت به پنل خورشیدی بیشتر است؛ به‌نحوی که شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبهه در حالت ۶ حدود ۶ درصد بیشتر از حالت ۷ ارزیابی شده است.

در نتیجه، با توجه به نتایج عددی می‌توان گفت که روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی سالیانه ریزشبهه عملکرد مناسبی را ارائه می‌دهد. این روش با مدیریت مؤثر تجهیزات ریزشبهه نه‌تنها شاخص اقتصادی و زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد، بلکه امکان بیشترین استفاده از تجهیزات موجود در ریزشبهه را نیز فراهم می‌کند. به بیان دیگر، بهره‌وری ریزشبهه با این روش به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه جهت مدیریت انرژی سالیانه یک ریزشبهه مسکونی مورد بررسی قرار گرفت. این روش با در نظر گرفتن مدیریت انرژی روزانه و امکان بهره‌گیری از انرژی مازاد در دوره‌های مختلف زمانی (روزها و فصول)، به بهینه‌سازی عملکرد ریزشبهه می‌پردازد. یافته‌های عددی نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی با بهره‌برداری مؤثر از منابع تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، به طور قابل ملاحظه‌ای شرایط انرژی ریزشبهه را ارتقا می‌بخشد. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که میزان وابستگی ریزشبهه به شبکه بالادست، هنگام استفاده از توربین بادی در فصل‌های پاییز و زمستان افزایش می‌یابد، در حالی که در فصل‌های بهار و تابستان و با استفاده از پنل خورشیدی، ریزشبهه قابلیت استقلال بیشتری از شبکه بالادست نشان می‌دهد. علاوه بر این، اثرگذاری سیستم ذخیره‌سازی انرژی هنگام بهره‌برداری از پنل خورشیدی نسبت به توربین بادی چشمگیرتر است. به گونه‌ای که افزودن باتری به ریزشبهه در صورت بهره‌گیری از توربین بادی، سود سالیانه را حدود ۸ درصد افزایش می‌دهد، اما این افزایش با افزودن باتری در حضور پنل خورشیدی به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از مدیریت سالیانه ریزشبهه بر اساس روش پیشنهادی، سود کلی ریزشبهه نسبت به مدیریت روزانه حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نوع منبع تولید پراکنده، بهره‌وری اقتصادی ریزشبهه زمانی که از توربین بادی استفاده می‌شود بیشتر از پنل خورشیدی است. این تفاوت عملکرد ناشی از تفاوت زمان‌های دسترس‌پذیری انرژی اولیه توربین بادی نسبت به پنل خورشیدی است. همچنین، شاخص انرژی پاک ریزشبهه هوشمند با افزودن باتری، استفاده از منابع تجدیدپذیر و اعمال مدیریت بهینه بر این تجهیزات، به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. افزون بر این، روش پیشنهادی موجب کاهش وابستگی ریزشبهه به شبکه‌های بالادستی که عمدتاً مبتنی بر انرژی‌های تجدیدناپذیر هستند، خواهد شد. همانند شاخص اقتصادی، ارزیابی شاخص زیست‌محیطی نیز نشان‌دهنده بهبود بیشتر شاخص انرژی پاک ریزشبهه در حالت مدیریت سالیانه باتری نسبت به مدیریت روزانه آن است. به طور کلی می‌توان بیان کرد که روش پیشنهادی تأثیرات چشمگیری بر شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشبهه بر جای گذاشته و با اعمال مدیریت بهینه تجهیزات در یک دوره زمانی سالیانه، بهبود قابل توجهی در بهره‌وری کلی ریزشبهه ایجاد می‌کند.

References

- [1] M. E. Sezgin and M. Gol, "Distributed energy management and communication strategy for network of microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 238, p. 111079, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111079>.
- [2] H. Shayeghi and M. Alilou, "Multi-Objective Demand Side Management to Improve Economic and Environmental Issues of a Smart Microgrid," *J. Oper. Autom. Power Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 182–192, 2021, doi: 10.22098/joape.2021.7319.1530.
- [3] M. Khani, M. Samiei Moghaddam, T. Noori, and R. Ebrahimi, "Integrated energy management for enhanced grid flexibility: Optimizing renewable resources and energy storage systems across transmission and distribution networks," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, p. e39585, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39585>.
- [4] T. Chen, Y. Cao, X. Qing, J. Zhang, Y. Sun, and G. A. J. Amaratunga, "Multi-energy microgrid robust energy management with a novel decision-making strategy," *Energy*, vol. 239, p. 121840, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121840>.
- [5] A. Mallahi and I. Sadeghkhan, "A waveform similarity based current-only differential protection technique for inverter interfaced microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 241, p. 111295, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111295>.
- [6] S. Barik and B. Saravanan, "Recent developments and challenges in state-of-charge estimation techniques for electric vehicle batteries: A review," *J. Energy Storage*, vol. 100, p. 113623, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113623>.
- [7] M. Alilou, G. B. Gharehpetian, R. Ahmadihangar, A. Rosin, and A. Anvari-Moghaddam, "Day-Ahead Scheduling of Electric Vehicles and Electrical Storage Systems in Smart Homes Using a Novel Decision Vector and AHP Method," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11773, 2022, doi: 10.3390/su141811773.
- [8] D. Kanakadhurga and N. Prabakaran, "Demand side management in microgrid: a critical review of key issues and recent trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 156, p. 111915, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111915>.
- [9] S. Choudhury, "Review of energy storage system technologies integration to microgrid: types, control strategies, issues, and future prospects," *J. Energy Storage*, vol. 48, p. 103966, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103966>.
- [10] Z. Wu, H. Tazvinga, and X. Xia, "Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system," *Appl. Energy*, vol. 148, pp. 294–304, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.109>.
- [11] G. R. Aghajani, H. A. Shayanfar, and H. Shayeghi, "Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response," *Energy*, vol. 126, pp. 622–637, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.051>.
- [12] G. Xu, H. Cheng, S. Fang, Z. Ma, P. Zeng, and L. Yao, "Optimal Size and Location of Battery Energy Storage Systems for Reducing the Wind Power Curtailments," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 46, no. 3, pp. 342–352, Feb. 2018, doi: 10.1080/15325008.2018.1445141.
- [13] M. Barzegar, M. Rashidinejad, M. MollahassaniPour, A. Bakhshai, and H. Farahmand, "A techno-economic assessment of energy efficiency in energy management of a micro grid considering green-virtual resources," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, p. 102169, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102169>.
- [14] E. E. Elattar and S. K. ElSayed, "Probabilistic energy management with emission of renewable micro-grids including storage devices based on efficient salp swarm algorithm," *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 23–35, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.144>.
- [15] H. Chamandoust, S. Bahramara, and G. Derakhshan, "Day-ahead scheduling problem of smart micro-grid with high penetration of wind energy and demand side management strategies," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 40, p. 100747, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100747>.
- [16] M. Parol, T. Wójtcowicz, K. Książek, C. Wenge, S. Balisiewicz, and B. Arendarski, "Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, p. 105886, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105886>.
- [17] Y. Li, K. Li, Z. Yang, Y. Yu, R. Xu, and M. Yang, "Stochastic optimal scheduling of demand response-enabled microgrids with renewable generations: an analytical-heuristic approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 330, p. 129840, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129840>.
- [18] "Population division, database on household size and composition 2019," *United Nations, Department of Economic and Social Affairs*, 2019.

- [19] M. Alipour, B. Mohammadi-Ivatloo, and K. Zare, "Stochastic scheduling of renewable and CHP-based microgrids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 11, no. 5, pp. 1049–1058, 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2462296.
- [20] M. Alilou, B. Tousi, and H. Shayeghi, "Home energy management in a residential smart micro grid under stochastic penetration of solar panels and electric vehicles," *Sol. Energy*, vol. 212, pp. 6–18, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.063.
- [21] M. Alilou, B. Tousi, and H. Shayeghi, "Multi-objective unit and load commitment in smart homes considering uncertainties," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 11, pp. 1–21, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12614.
- [22] M. Alqarni, "Sodium sulfur batteries allocation in high renewable penetration microgrids using coronavirus herd immunity optimization," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 2, p. 101590, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.017>.
- [23] S. J. Kazempour and M. P. Moghaddam, "Economic viability of NaS battery plant in a competitive electricity market," in *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, 2009, pp. 453–459. doi: 10.1109/ICCEP.2009.5212011.
- [24] S. Mirjalili, P. Jangir, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, and I. N. Trivedi, "Optimization of problems with multiple objectives using the multi-verse optimization algorithm," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 134, pp. 50–71, 2017, doi: 10.1016/j.knosys.2017.07.018.
- [25] Y. Sun, N. Chai, Y. Dong, and B. Shi, "Assessing and predicting small industrial enterprises' credit ratings: A fuzzy decision-making approach," *Int. J. Forecast.*, vol. 38, no. 3, pp. 1158–1172, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.01.006>.
- [26] O. Erdinc, N. G. Paterakis, I. N. Pappi, A. G. Bakirtzis, and J. P. S. Catalão, "A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response," *Appl. Energy*, vol. 143, pp. 26–37, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.025>.
- [27] PV Tongwei Company, "Solar panels data." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://en.tongwei.com.cn/>
- [28] Wind Turbine Models, "Wind turbine data." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/383-vestas-v39>
- [29] H. Mehrjerdi and R. Hemmati, "Coordination of vehicle-to-home and renewable capacity resources for energy management in resilience and self-healing building," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 568–579, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.004>.
- [30] A. S. and A. company Fluence, "Energy storage systems data." Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: <https://fluenceenergy.com/gridstack-grid-energy-storage/>