نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۱، بهار ۱۴۰۳، صفحه ۱-۲۴

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

مسعود علیلو[۱]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۲/۳۰

کلمات کلیدی:
توربین بادی
پنل فتوولتائیک
ریزشبکه مسکونی
سیستم ذخیره ساز الکتریکی
بهینه سازی چندهدفه

چکیده

مدیریت انرژی سالانه در ریزشبکه‌ها به طور قابل توجهی می‌تواند وابستگی این شبکه‌ها به شبکه اصلی برق را کاهش دهد. این رویکرد بهینه‌سازی، امکان استفاده بهتر از انرژی مازاد تولید شده در سطح محلی یا ذخیره شده را، برای تأمین نیازهای انرژی در دوره‌های زمانی دیگر فراهم می‌کند. این مقاله به بررسی یک روش چندهدفه نوآورانه برای مدیریت سالیانه انرژی در ریزشبکه‌های هوشمند پرداخته است. ریزشبکه مورد مطالعه، یک شبکه برق متشکل از خانه‌های مسکونی کوچک با الگوهای مصرف تصادفی در فصل‌ها و روزهای مختلف سال است. همچنین مدل‌سازی احتمالاتی توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک در این تحلیل گنجانده شده است. از یک سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی مبتنی بر سدیم-گوگرد نیز برای مدیریت انرژی استفاده می‌شود. مدیریت انرژی در دو سناریو شامل مدیریت روزانه در طول یک سال و مدیریت سالیانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی به عنوان توابع هدف مسئله مدیریت انرژی ریزشبکه مدنظر قرار گرفته شده‌اند که با استفاده از ترکیب الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی و روش تصمیم گیری فازی بهینه سازی می‌شوند. نتایج عددی حاصل از اجرای این روش در یک ریزشبکه نمونه نشان می‌دهد که عملکرد آن مناسب بوده و به طور قابل ملاحظه‌ای معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی شبکه را بهبود بخشیده است. به طور کلی، این رویکرد منجر به افزایش بهره‌وری ریزشبکه هوشمند شده است.

۱. استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
masoud.alilou@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 عدم‌قطعیت 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 مشترکان 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 مشترکان 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 تابحال، 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

۲. مدل‌سازی انرژی ریزشبکه هوشمند

مدل‌سازی انرژی ریزشبکه براساس نیازهای مصرف‌کنندگان برق، انرژی تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر محلی، و انرژی ذخیره یا آزادشده توسط سیستم ذخیره‌سازی الکتریکی انجام می‌گیرد. ریزشبکه‌های 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 می‌باشد. میزان انرژی الکتریکی موردنیاز ریزشبکه برای یک بازه زمانی مشخص با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$D_p = \sum_{t=1}^{n_{tp}} D_t \qquad (۱)$$

در این رابطه، D_p انرژی الکتریکی مورد نیاز ریزشبکه در طول یک دوره بهره برداری معین همچون یک شبانه‌روز، هفته، فصل یا حتی یک سال است. n_{tp} تعداد ساعت های بهره‌برداری در طول دوره بهره‌برداری را نشان می‌دهد. D_t نیز نشان‌دهنده انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه در طول ساعت t است.

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

$$G_P = \sum_{t=1}^{n_{tp}} \sum_{i=1}^{n_{REU}} G_{ti} \qquad (۲)$$

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)، می‌توان وضعیت انرژی ریزشبکه را در حضور منابع تجدیدپذیر محلی، با در نظر گرفتن عدم تطابق ساعتی بین عرضه و تقاضا، از طریق رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$E_{t_{MG}} = D_t - G_t \qquad (۳)$$

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

با وجود کاهش چشمگیر میزان انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادستی، واحدهای انرژی تجدیدپذیر ممکن است همواره در دسترس نباشند؛ چرا که منابع اولیه آن‌ها مانند باد و تابش خورشید، به‌طور مداوم قابل استفاده نیستند. استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی یک راهکار مؤثر برای کاهش اثرات رفتار تصادفی منابع تجدیدپذیر و متعادل‌سازی ناهماهنگی میان تقاضا و عرضه در ریزشبکه محسوب می‌شود. وضعیت انرژی ریزشبکه با در نظر گرفتن حضور سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی بر اساس رابطه (۴) مدل‌سازی شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

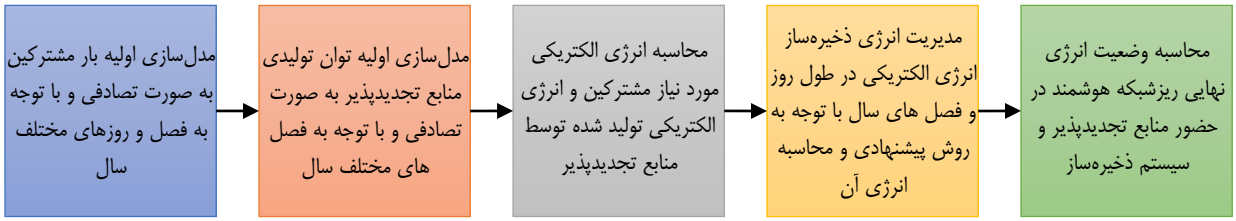
$$E_{t_{MG}} = D_t - G_t + ESS_t \quad (۴)$$

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.

$$E_P = \sum_{t=1}^{n_{tp}} E_{t_{MG}} = \sum_{t=1}^{n_{tp}} (D_t - G_t + ESS_t) \quad (۵)$$

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 کی‌مینز است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بار الکتریکی

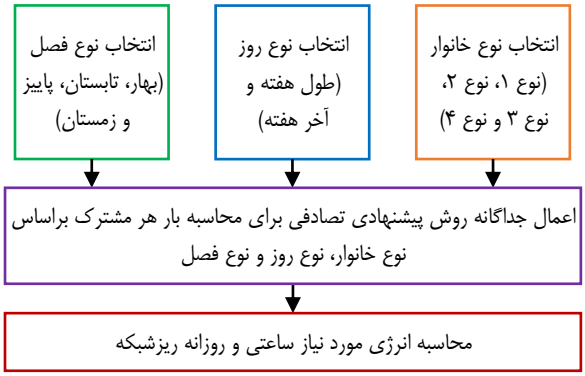
کل نیاز برق یک ریزشبکه مسکونی برابر با مجموع مصرف انرژی تمامی خانوارهای موجود در آن ریزشبکه است. تقاضای برق هر ساختمان بر اساس تابع توزیع احتمال نرمال که در معادله (۶) ارائه شده است، مدل‌سازی شده است [17].

$$f(demand) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} \quad (۶)$$

در این رابطه، پارامترهای μ و σ بیان کننده میانگین و واریانس پارامتر تصادفی هستند. این مقادیر با توجه به اطلاعات آماری و بار مشترکین در 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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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

توربین بادی

در بسیاری از کشورهایی که در زمینه انرژی‌های پاک پیشرو هستند، توربین‌های بادی به‌عنوان یکی از فناوری‌های رایج منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر شناخته می‌شوند. عملکرد توربین‌های بادی ماهیتی تصادفی دارد و مدل احتمالی آن‌ها بر اساس داده‌های تاریخی موجود تدوین می‌شود. با توجه به رفتار سرعت باد و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، برای مدل‌سازی سرعت باد از تابع توزیع رایلی استفاده می‌شود. این تابع، حالت خاصی از تابع توزیع احتمال ویبول است که در آن شاخص شکل برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود [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، می‌توان رابطه بین توان خروجی یک توربین بادی و سرعت باد را به صورت رابطه (۸) بیان کرد.

$$f(v) = \frac{K}{C^K} v^{(K-1)} e^{-(\frac{v}{C})^K} \qquad 0 \le v \le \infty \qquad (۷)$$

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \le V \le V_{ci}\,, V_{co} \le V \\ P_{w-rated} \times \dfrac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} \le V \le V_r \\ P_{w-rated} & V_r \le V \le V_{co} \end{cases} \qquad (۸)$$

در این معادلات، V نشان‌دهنده 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 می‌کنند. توان خروجی توربین بادی نیز با P_W نشان داده شده است.

پنل فتوولتائیک

پنل‌های فتوولتائیک یکی از فناوری‌های کاربردی و تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی به‌ویژه در مناطق مسکونی محسوب می‌شوند. با توجه به ماهیت متغیر و احتمالی تابش خورشید، توان خروجی این پنل‌ها نیز در طول شبانه‌روز ثابت نبوده و نمی‌توان مقدار مشخصی برای آن پیش‌بینی کرد. بر اساس جدیدترین تحقیقات، تابع توزیع بتا مناسب‌ترین مدل احتمالی برای نمایش تغییرات تابش خورشید به شمار می‌رود. به

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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].

$$f(Si)=\begin{cases}\dfrac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\times Si^{(\alpha-1)}\times(1-Si)^{(\beta-1)} & if\quad 0\le Si\le 1,\alpha\ge 0,\beta\ge 0\\ 0 & Otherwise\end{cases} \quad (۹)$$

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.

$$\beta=(1-\mu)\times\left(\frac{\mu\times(1+\mu)}{\sigma^2}-1\right) \quad (۱۰)$$

$$\alpha=\frac{\mu\times\beta}{1-\mu} \quad (۱۱)$$

$$P_S(Si)=\eta\times A\times Si \quad (۱۲)$$

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

نحوه استخراج مقادیر عددی بار و منابع ریزشبکه

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 لایه‌بندی‌شده 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_u یک عدد تصادفی با تابع توزیع یکنواخت است ($r_u\in(0,1)$). حال، مقدار نمونه‌برداری شده با استفاده از تابع معکوس، معکوس می‌شود. از لحاظ ریاضی، رابطه (۱۴) بیانگر آن است [21].

$$P_i=\left(\frac{1}{N_s}\right)r_u+\frac{(i-1)}{N_s} \quad (۱۳)$$

$$X_i=F^{-1}(P_i) \quad (۱۴)$$

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 کی-مینز 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 اختصاص‌یافته به هر خوشه است [21].

٤. روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی سالیانه ریزشبکه

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 ریزشبکه 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 ریزشبکه هستند. توابع هدف مسئله مدیریت انرژی به بیان ریاضی به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$OF = \max \{I_{EUP}, I_{GER}\} \quad (۱۵)$$

شاخص اقتصادی: نیازهای انرژی مصرف‌کنندگان توسط شرکت برق از طریق ترکیبی از منابع مختلف انرژی تامین می شود. این منابع شامل انرژی‌های تجدیدپذیر تولیدشده به صورت محلی، انرژی ذخیره‌شده در سیستم‌های ذخیره‌سازی الکتریکی، و انرژی خریداری‌شده 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 عمدتاً 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 ریزشبکه با استفاده از رابطه (۱۶) تعریف می‌شود.

$$I_{EUP} = \sum_{t=1}^{n_{tp}} \left[I_{Demand_t} + I_{MG2G_t} - I_{G2MG_t} - I_{REU_t} - I_{ESS_t} \right] \quad (۱۶)$$

در این رابطه، I_{Demand_t} سود ساعتی فروش انرژی به مصرف‌کنندگان است که با توجه به رابطه (۱۷) محاسبه می شود. پارامتر I_{MG2G_t} که با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می شود، 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 می شود. هزینه های بهره برداری 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 می شوند.

$$I_{Demand_t} = D_t \times Pr_t \quad (۱۷)$$

$$I_{MG2G_t} = E_{MG2G_t} \times \omega_{MG2G} \times Pr_t \quad (۱۸)$$

$$I_{G2MG_t} = E_{G2MG_t} \times \omega_{G2MG} \times Pr_t \quad (۱۹)$$

$$I_{REU_t} = G_t \times \omega_{Local} \times Pr_t \quad (۲۰)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$I_{ESS_t} = \begin{cases} -1 \times ESS_t \times \omega_{Local} \times Pr_t & if \quad ESS_t < 0 \\ 0 & if \quad ESS_t \geq 0 \end{cases} \quad (۲۱)$$

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 ریزشبکه‌ها 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.

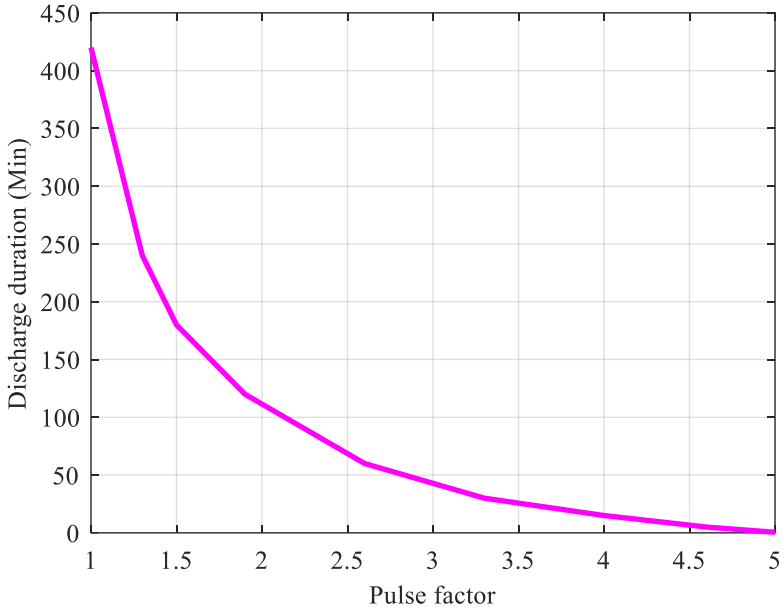
$$I_{GER} = \frac{G_P + E_{ESS_d}}{D_P + E_{ESS_c}} \quad (۲۲)$$

در این رابطه، D_p تقاضای برق ریزشبکه 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 ریزشبکه در طول دوره بهره برداری را نشان می دهند.

قیود

در این مطالعه، فناوری سدیم-گوگرد (NaS) به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در ریزشبکه 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 به‌صورت 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 داده‌شده، با توجه به مقدار پالس NaS و توان تخلیه‌شده بین ۳۰ ثانیه تا ۷ ساعت متغیر است. به‌عبارت دیگر، ضریب پالس NaS تعیین‌کننده مقدار توان تخلیه و مدت زمان آن خواهد بود. بااین‌حال، 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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل (۳): تاثیر ضریب پالس باطری NaS بر مدت زمان دشارژ سیستم ذخیره‌ساز 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].

$$M_{ESS_{Dis}}(t) \le N_{Pulse}(t) \le 2.6 \times M_{ESS_{Dis}}(t) \quad (۲۳)$$

$$0 \le P_{ESS_{Dis}}(t) \le N_{Pulse}(t) \times P_{ESS}^{max} \quad (۲۴)$$

$$0 \le P_{ESS_{Ch}}(t) \le M_{ESS_{Ch}}(t) \times P_{ESS}^{max} \quad (۲۵)$$

$$M_{ESS_{Ch}}(t) + M_{ESS_{Dis}}(t) \le 1 \quad (۲۶)$$

$$SOC_{ESS}(t) = SOC_{ESS}(t-1) - \left(P_{ESS_{Ch}}(t) \times \eta_{ESS}\right) - P_{ESS_{Dis}}(t) - P_{loss}(t) \quad (۲۷)$$

$$SOC_{ESS}^{min} \le SOC_{ESS}(t) \le SOC_{ESS}^{max} \quad (۲۸)$$

$$P_{loss}(t) = \frac{7 - [N_{Pulse}(t) - D_d(t)]}{D_d(t)} M_{ESS_{Dis}}(t) \quad (۲۹)$$

$$D_d(t) = -3.4497 N_{Pulse}(t)^3 + 21.5962 N_{Pulse}(t)^2 - 45.7961 N_{Pulse}(t) + 34.7117 \quad (۳۰)$$

در روابط (۲۳) الی (۳۰)، $P_{ESS_{Ch}}(t)$ و $P_{ESS_{Dis}}(t)$ توان شارژ و دشارژ باطری NaS در بازه زمانی t را نشان می‌دهند، در حالی که P_{ESS}^{max} حداکثر نرخ توان باتری است. پارامترهای $M_{ESS_{Ch}}(t)$ و $M_{ESS_{Dis}}(t)$ مقادیر باینری هستند که حالت های شارژ و دشارژ باتری NaS در بازه زمانی t را نشان می دهند. $N_{Pulse}(t)$ ضریب پالس NaS را نشان می دهد 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 می دهند. معادله (۲۶) برای رفع تعارض بین حالت های شارژ و دشارژ در یک دوره خاص در نظر گرفته شده است. وضعیت شارژ باطری (SOC) توسط رابطه (۲۷) محاسبه می شود. این معادله نشان می دهد که SOC باطری 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 باطری 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 می شود. $D_d(t)$ مدت زمان تخلیه باطری NaS است که توسط رابطه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

(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.

$$SOC_{end_d} = SOC_{initial_d} \quad (۳۱)$$

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 می‌شود. 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.

$$SOC_{initial_d} = SOC_{end_{d-1}} \quad (۳۲)$$

الگوریتم هوشمند چندهدفه چندوجهی

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه چندوجهی (MOMVO) برای حل توابع هدف پیچیده و دستیابی به مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نهایی و غیرغالب طراحی شده است. این الگوریتم، همچون بسیاری از دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی، از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته است. در الگوریتم MOMVO، نظریه چندوجهی به عنوان پایه‌ای برای ایجاد و شبیه‌سازی جهان عمل می‌کند. این نظریه بیان می‌کند که بیگ‌بنگ‌های متعدد در شکل‌گیری جهان‌های مختلف نقش داشته‌اند، به طوری که هر رخداد بیگ‌بنگ به پیدایش یک جهان منحصربه‌فرد منجر می‌شود. بر اساس این نظریه، سه نوع مشخص از ساختارهای فضایی وجود دارند: سفیدچاله‌ها، سیاه‌چاله‌ها و کرم‌چاله‌ها. سفیدچاله‌ها که تاکنون در جهان ما مشاهده نشده‌اند، به‌عنوان عوامل اساسی در خلق جهان شناخته می‌شوند. از سوی دیگر، سیاه‌چاله‌ها که بارها مشاهده شده‌اند، دارای نیروی گرانشی بسیار قوی هستند که می‌توانند تمامی مواد، حتی نور، را جذب کنند. در نهایت، کرم‌چاله‌ها عملکردی اتصال‌دهنده داشته و به عنوان گذرگاه‌هایی برای ارتباط بین نقاط مختلف یک جهان عمل می‌کنند. در الگوریتم MOMVO، مفاهیم سفیدچاله و سیاه‌چاله برای بررسی فضای جستجو به کار گرفته می‌شوند، در حالی که کرم‌چاله‌ها فرآیند بهره‌برداری مؤثر از این فضاها را تسهیل می‌کنند. ساختار بهینه‌سازی این الگوریتم تضمین می‌کند که نرخ تورم بالاتر با افزایش احتمال روبرو شدن با سفیدچاله‌ها و کاهش مواجهه با سیاه‌چاله‌ها همراه است. در نتیجه، در جهان‌هایی با نرخ تورم بالا، اجرام عمدتاً از طریق سفیدچاله‌ها منتقل می‌شوند، در حالی که در جهان‌هایی با نرخ تورم پایین‌تر، میزان بیشتری از اجرام از مسیر سیاه‌چاله‌ها عبور می‌کنند. به بیان ریاضی، این الگوریتم موقعیت جهان‌ها که نمایانگر ذرات مسئله هستند را بر اساس رابطه‌ی (۳۳) به روزرسانی می‌کند [24].

$$X_i^j = \begin{cases} if\ r_2 < C_W\ then\ X_i^j = \begin{cases} X_j + \left[C_T \times \left((j_{max} - j_{min}) \times r_4 + j_{min}\right)\right] & \forall \quad r_3 < 0.5 \\ X_j - \left[C_T \times \left((j_{max} - j_{min}) \times r_4 + j_{min}\right)\right] & \forall \quad r_3 \geq 0.5 \end{cases} \\ if\ r_2 \geq C_W\ then\ X_i^j = X_i^j \end{cases} \quad (۳۳)$$

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_{min} و j_{max} 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_W و C_T ضرایبی هستند که با استفاده از روابط (۳۴) و (۳۵) محاسبه می‌شوند. در این معادلات n_i و n_{max} به ترتیب شماره تکرار و حداکثر تعداد تکرارها را نشان می دهند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$C_W = 0.2 + \left(n_i \times \frac{0.8}{n_{max}}\right) \quad (۳۴)$$

$$C_T = 1 - \left(\frac{n_i}{n_{max}}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (۳۵)$$

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].

$$\mu_i{}^k = \begin{cases} 1 & f_i{}^k \le f_i{}^{min} \\ \dfrac{f_i{}^{max} - f_i{}^k}{f_i{}^{max} - f_i{}^{min}} & f_i{}^{min} < f_i{}^k < f_i{}^{max} \\ 0 & f_i{}^{max} \le f_i{}^k \end{cases} \quad (۳۶)$$

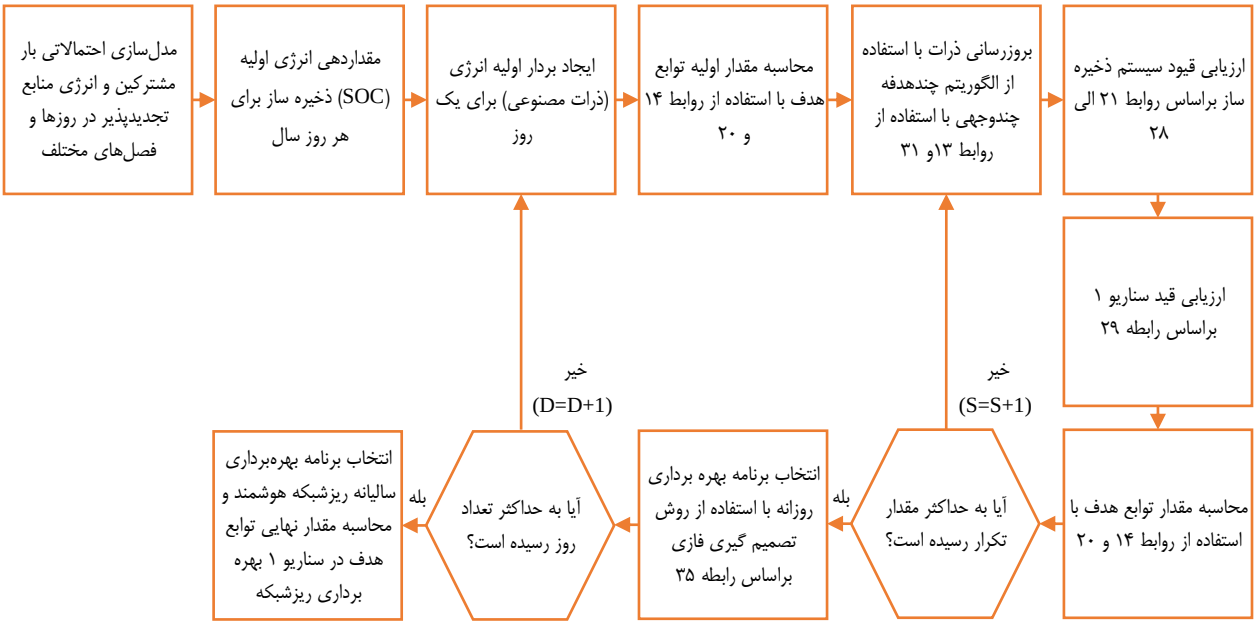
$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{NO} \mu_i{}^k}{\sum_{k=1}^{NK} \sum_{i=1}^{NO} \mu_i{}^k} \quad (۳۷)$$

در روابط فوق، f_i^{max} و f_i^{min} 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 نحوی‌که $\mu_i^k = 0$ 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 به عنوان بهینه‌ترین برنامه مدیریت انرژی ریزشبکه هوشمند انتخاب می‌شود.

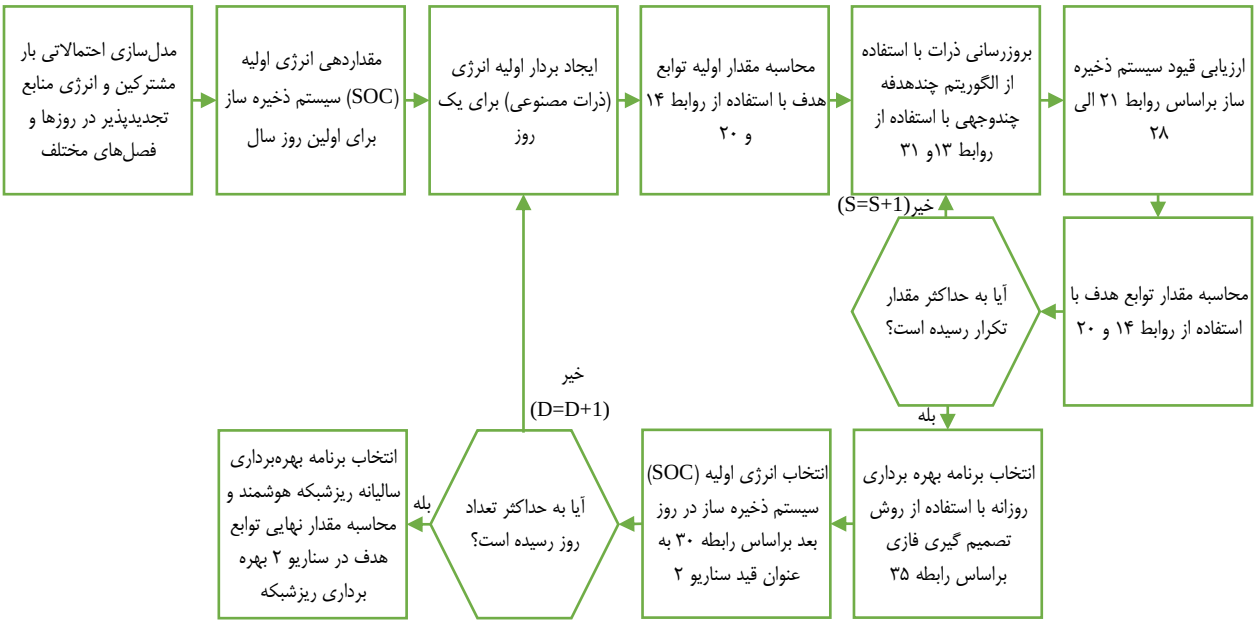
روش کلی مدیریت انرژی

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



الف) سناریو ۱- مدیریت روزانه ریزشبکه هوشمند



ب) سناریو ۲- مدیریت سالیانه ریزشبکه هوشمند (روش پیشنهادی)

شکل (۴): روندنمای روش مدیریت انرژی سالیانه ریزشبکه هوشمند در دو سناریو بهره‌برداری روزانه و سالیانه

۵. مطالعات عددی و ارزیابی نتایج

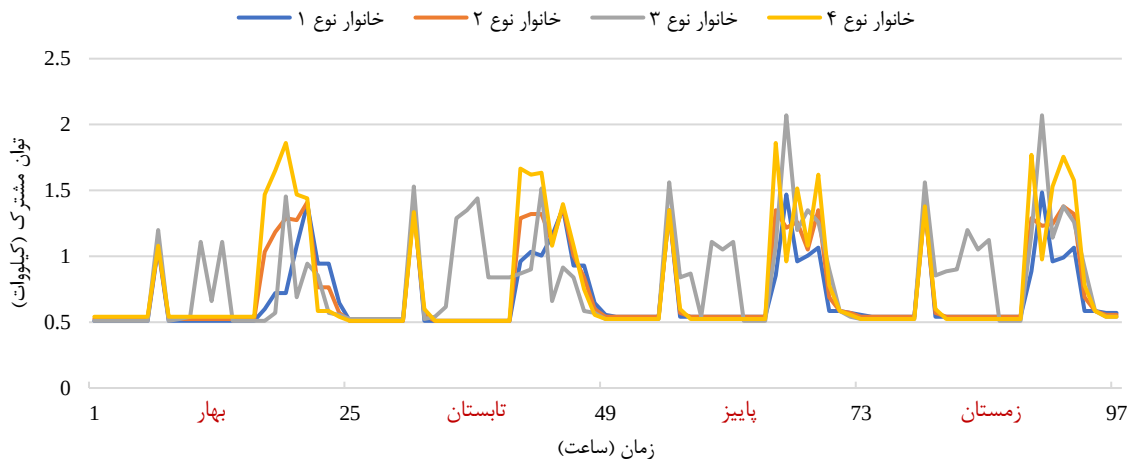
در این بخش، روش پیشنهادی برای مدیریت سالیانه یک ریزشبکه، با در نظر گرفتن ادوات مختلف انرژی که پیش‌تر به تفصیل شرح داده شده‌اند، به‌صورت عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا اطلاعات سیستم مورد مطالعه معرفی شده و سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

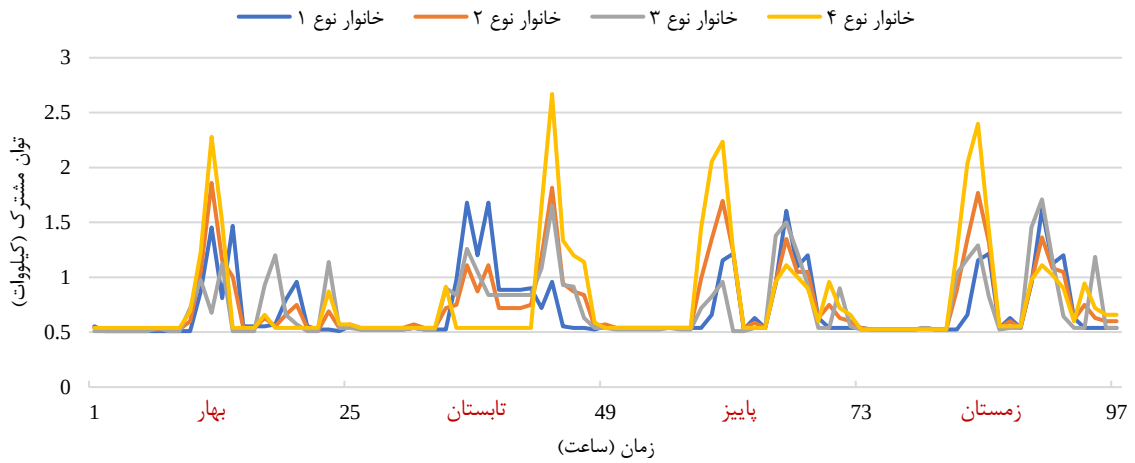
فرض شده است که این ریزشبکه دارای ۱۰۰ ساختمان مسکونی (خانه) است. بر اساس تقسیم بندی سازمان ملل متحد، چهار نوع خانوار در این MG زندگی می کنند. انواع این خانواده ها عبارتند از [18]: نوع ۱ (خانواده تک نفره)، نوع ۲ (خانواده ۲ یا ۳ نفره)، نوع ۳ (خانواده ۴ یا ۵ نفره)، و نوع ۴ (خانواده ۶ نفره یا بیشتر).

ترکیب واحدهای مسکونی بر اساس انواع مختلف خانوارها، مطابق با تقسیم‌بندی جمعیت ارائه‌شده توسط سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۹ انتخاب شده است. طبق این گزارش، خانوارهای دسته‌بندی‌شده در خانوارهای نوع ۱، نوع ۲، نوع ۳ و نوع ۴ به ترتیب در ۱۴، ۳۲، ۲۹ و ۲۵ ساختمان توزیع شده‌اند [18]. مقادیر میانگین تقاضای برق برای هر نوع خانوار در طول روزهای هفته و آخر هفته به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. همچنین، واریانس تغییرات مصرف در تمامی ساعات شبانه‌روز برابر با ۰/۲ است [26]. روش تصادفی پیشنهادی برای محاسبه تقاضای احتمالی ریزشبکه 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 ریزشبکه هوشمند در طول هفته

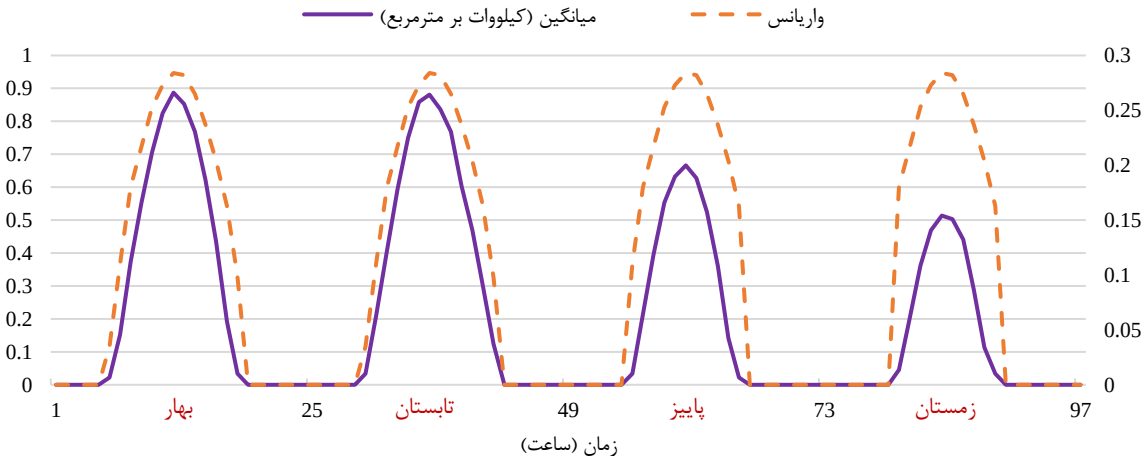
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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

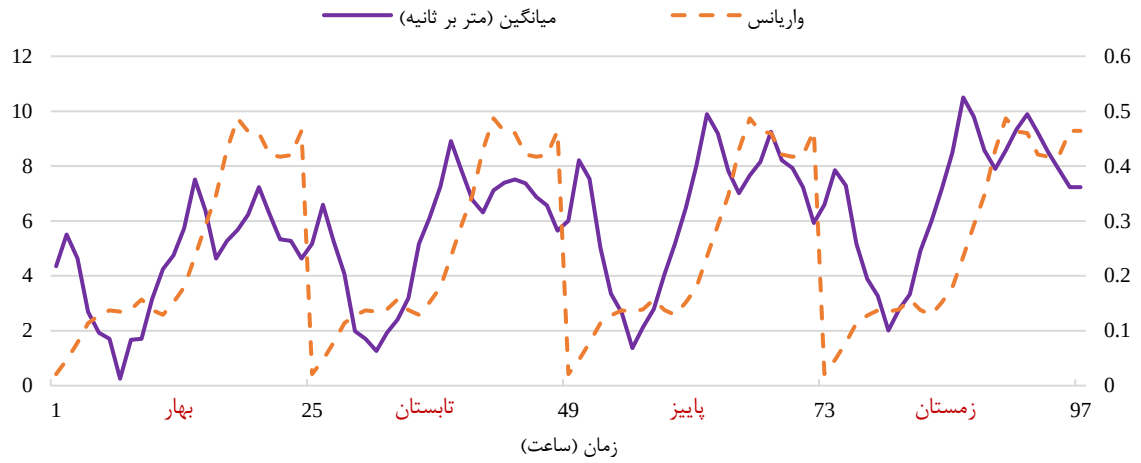
نیروگاه خورشیدی موجود در ریزشبکه هوشمند از ۱۰۰۰ پنل خورشیدی مدل PMB6655 ساخت شرکت TW Solar با ظرفیت ۶۵۵ وات بهره می‌برد. بنابراین، مجموع ظرفیت نیروگاه خورشیدی به ۶۵۵ کیلووات می‌رسد [27]. همچنین، توربین بادی استفاده‌شده در این ریزشبکه از مدل V39-500kW شرکت Westas با ظرفیت تولید ۵۰۰ کیلووات است [28]. میانگین 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 باطری 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].

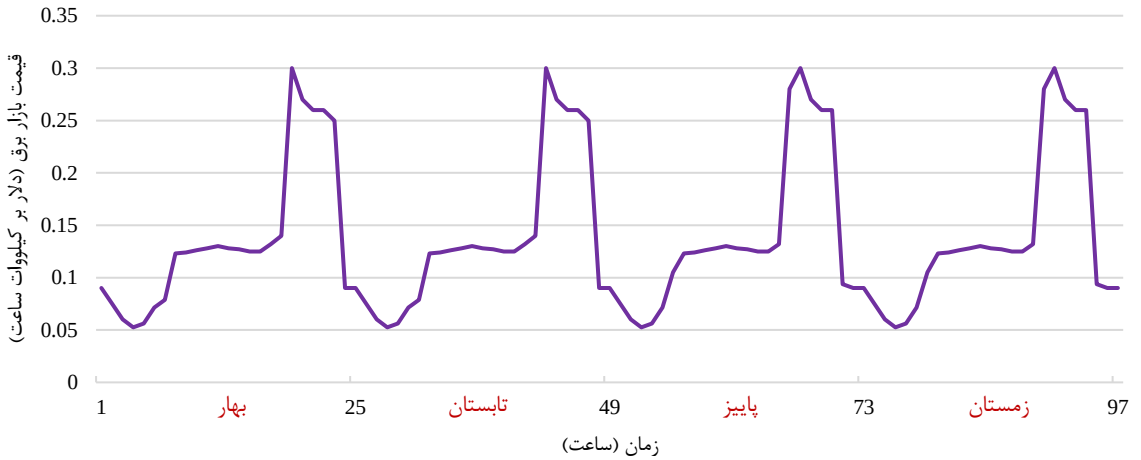


شکل (۷): میانگین و واریانس شدت تابش خورشید در فصول مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



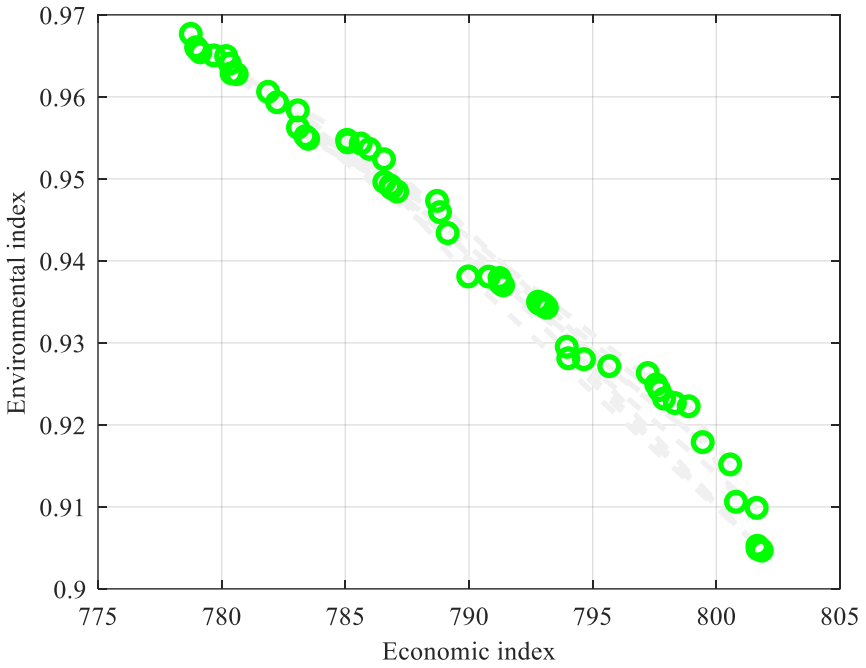
شکل (۸): میانگین و واریانس سرعت باد در فصول مختلف



شکل (۹): قیمت بازار برق در ریزشبکه 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 تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب یک راه‌حل بدون تسلط واحد از جبهه پارتو برای ارزیابی عددی نتایج استفاده می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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

همانطور که قبلا 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 می شود. بنابراین، نتایج عددی بر اساس حالت‌های بهره‌برداری زیر ارائه شده است:

حالت ۱: ریزشبکه بدون منابع تجدیدپذیر و باطری

حالت ۲: ریزشبکه با توربین بادی و بدون باطری

حالت ۳: ریزشبکه با پنل خورشیدی و بدون باطری

حالت ۴: ریزشبکه با توربین بادی و باطری با در نظر گرفتن سناریو ۱

حالت ۵: ریزشبکه با پنل خورشیدی و باطری با در نظر گرفتن سناریو ۱

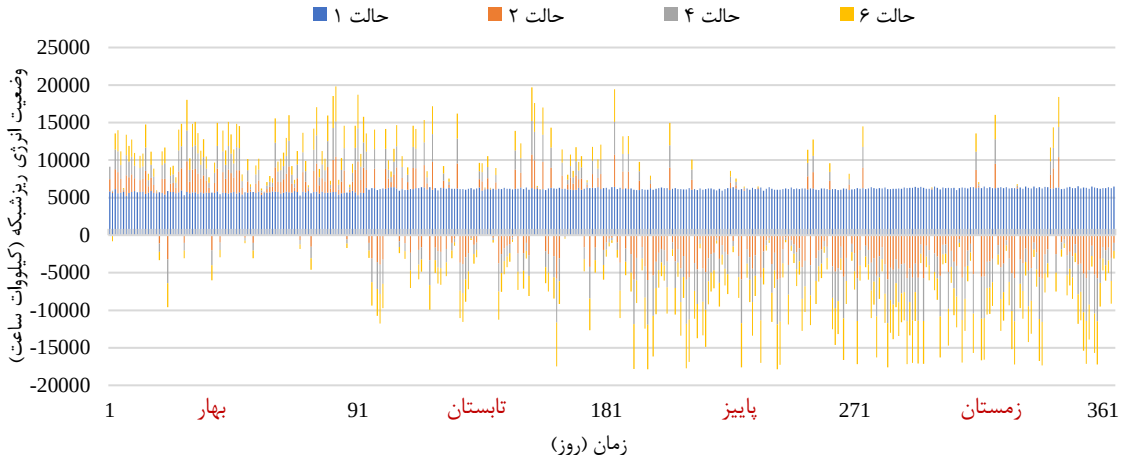
حالت ۶: ریزشبکه با توربین بادی و باطری با در نظر گرفتن سناریو ۲

حالت ۷: ریزشبکه با پنل خورشیدی و باطری با در نظر گرفتن سناریو ۲

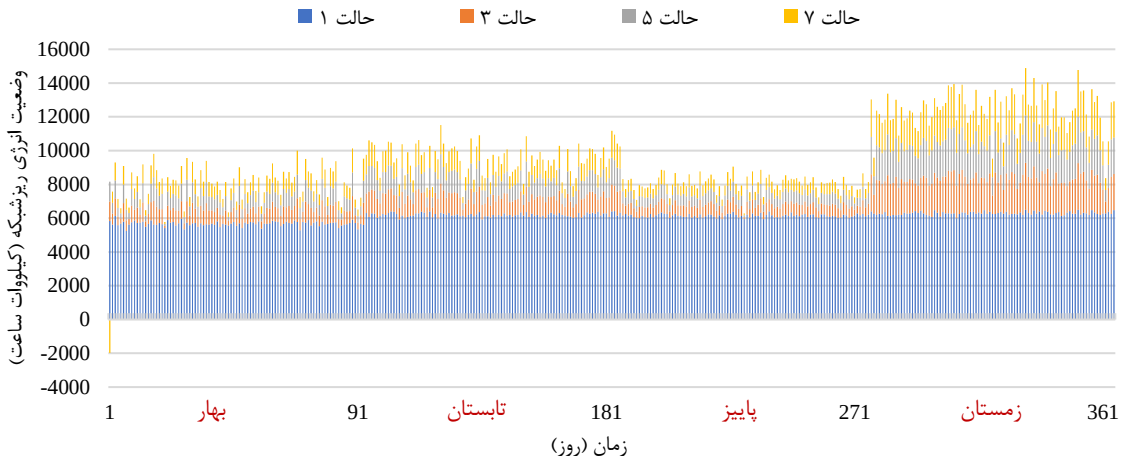
وضعیت انرژی ریزشبکه با در نظر گرفتن شرایط متنوع در شکل (۱۱) مورد تحلیل قرار گرفته است. بخش (الف) از این شکل، حالت‌های مختلف بهره‌برداری در حضور توربین بادی را نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های این بخش، مشخص است که ریزشبکه در فصول پاییز و زمستان از استقلال بیشتری برخوردار بوده و بدین ترتیب قادر است در اکثر 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، ریزشبکه طی تابستان و زمستان نیاز بیشتری به تأمین انرژی از شبکه بالادستی دارد. لازم به ذکر است که اگرچه تابستان‌ها انرژی خورشیدی بیشتری در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

دسترس است، اما افزایش تقاضای انرژی الکتریکی مصرفی در این فصل نقش تعیین‌کننده‌ای 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 ریزشبکه دارد. بر اساس این روش، انرژی ذخیره‌شده 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 ریزشبکه در حالت های بهره برداری با حضور توربین بادی



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

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

در جدول (۱)، سود فصلی و سالانه شرکت بهره‌بردار ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه اثرگذار هستند. روش پیشنهادی، که در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

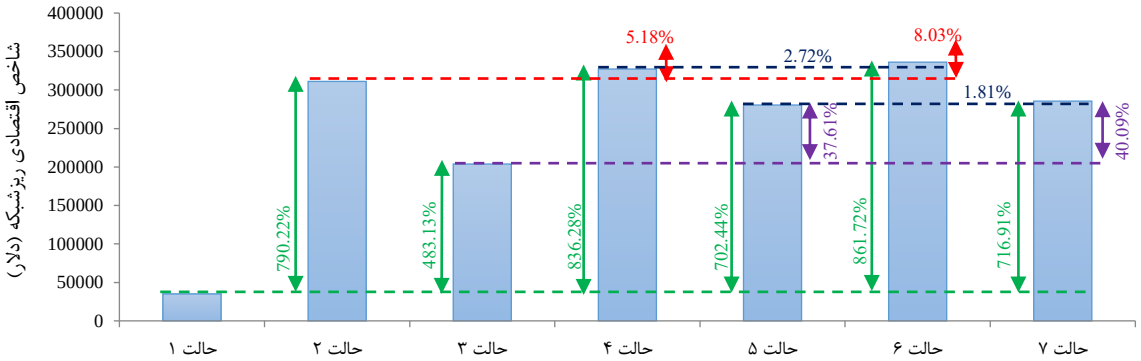
شـرایط ۶ و ۷ مورد اسـتفاده قرار گرفته اسـت، امکان بهره‌گیری از انرژی مازاد روزانه یا فصـلی برای تأمین نیازهای انرژی در زمان‌های دیگر را فراهم می‌آورد. این اسـتراتژی به‌طور قابل ملاحظه‌ای منجر به افزایش سـود فصـلی شـرکت برق در مقایسـه با سـایر شـیوه‌های بهره‌برداری شـده است.

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

حالت	شاخص اقتصادی ریزشبکه (هزار دلار)				
بهره برداری	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سال
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

شـکل (۱۲) نرخ بهبود شـاخص اقتصـادی ریزشـبکه را که نشـان‌دهنده سـود سـالانه شـرکت برق در شـرایط مختلف بهره‌برداری اسـت، به تصـویر می‌کشـد. اگرچه اسـتفاده از دسـتگاه‌های انرژی محلی (مانند منابع تجدیدپذیر و باتری) نسـبت به حالت پایه (حالت ۱) بهبود چشـمگیری در سـود ایجاد می‌کند، اما نرخ بهبود روش پیشـنهادی از سـایر حالت‌ها بالاتر اسـت. تاثیر اسـتفاده از سیسـتم ذخیره‌ساز انرژی در کنار واحدهای تجدیدپذیر، به‌ویژه هنگام اسـتفاده از پنل فتوولتائیک در ریزشـبکه، قابل توجه اسـت. در حالت‌های ۴ و ۶، میزان سـود به ترتیب حدود ۵ و ۸ درصـد بیشـتر از حالت ۲ اسـت که تنها توربین بادی در آن اسـتفاده می‌شـود. این در حالی اسـت که در حالت‌های ۵ و ۷، سـود نسـبت به حالت ۳، که فقط پنل فتوولتائیک به کار گرفته شـده، به ترتیب حدود ۳۸ و ۴۰ درصـد افزایش پیدا می‌کند. با توجه به سـناریوهای مرتبط با سـیسـتم ذخیره‌سـاز 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 پنل 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 پنل 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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

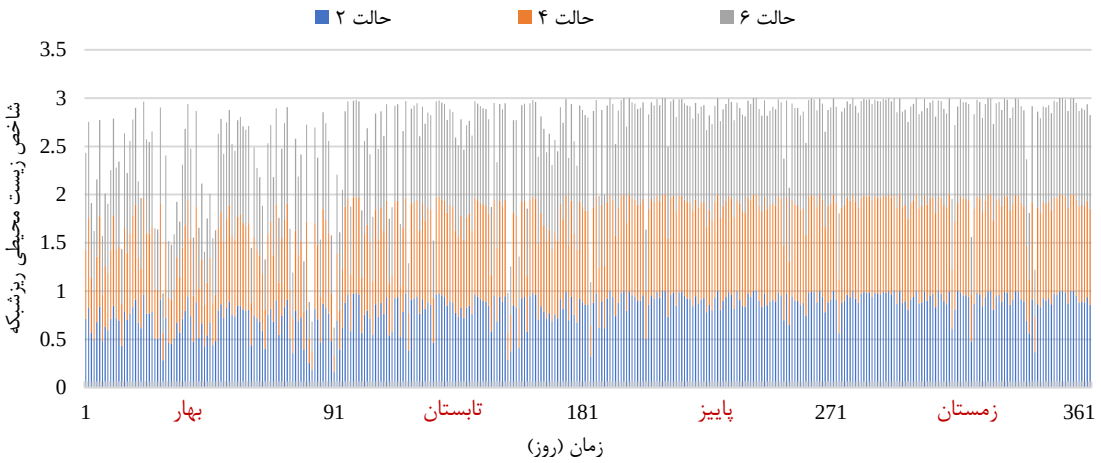
جدول (۲) شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه را در شرایط مختلف بهره‌برداری به صورت فصلی و سالیانه نشان می‌دهد. در حالت ۳، انرژی خورشیدی تنها قادر به تأمین حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از تقاضاست، در حالی که توربین بادی در حالت ۲ می‌تواند بین ۶۷ تا ۹۱ درصد از نیاز برق ریزشبکه را در فصول مختلف تأمین کند. با اینکه ادغام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

جدول (۲): شاخص زیست‌محیطی ریزشبکه هوشمند در حالت های مختلف بهره‌برداری

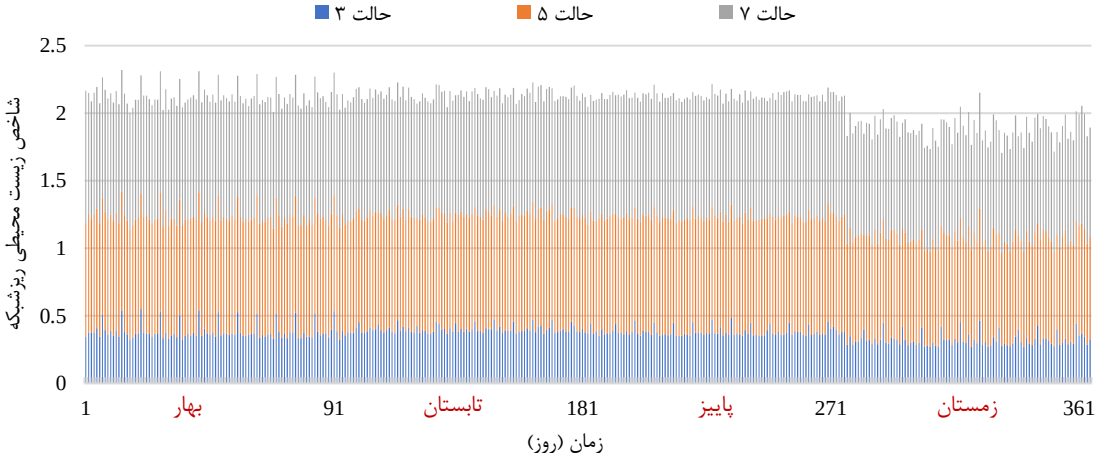
حالت بهره برداری	شاخص زیست‌محیطی ریزشبکه				
	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سال
۱	–	–	–	–	–
۲	۰/۶۶۸۳	۰/۸۰۳۲	۰/۸۹۶۶	۰/۹۱۴۸	۰/۸۱۹۱
۳	۰/۳۸۳۹	۰/۳۹۹۴	۰/۳۸۱۲	۰/۳۲۲۳	۰/۳۷۲۲
۴	۰/۷۰۶۳	۰/۸۶۹۲	۰/۹۶۰۷	۰/۹۶۸۹	۰/۸۷۴۶
۵	۰/۸۵۴۴	۰/۸۴۸۷	۰/۸۵۳۲	۰/۷۵۸۵	۰/۸۲۹۳
۶	۰/۸۱۶۱	۰/۹۲۴۵	۰/۹۸۱۱	۰/۹۷۹۹	۰/۹۲۴۳
۷	۰/۸۸۸۱	۰/۸۸۵۹	۰/۸۹۲۲	۰/۸۰۶۷	۰/۸۶۸۷

شکل (۱۳) وضعیت شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه را در شرایط مختلف بهره‌برداری نمایش می‌دهد. میزان انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادستی، که عموماً منبعی غیرتجدیدپذیر است، معمولاً کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل، روش پیشنهادی موجب بهبود عملکرد روزانه، فصلی و سالانه ریزشبکه بر مبنای این شاخص زیست‌محیطی می‌شود. نرخ بهبود سالانه شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه 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 ریزشبکه در طول سال می‌تواند با استفاده از منابع تجدیدپذیر تأمین گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

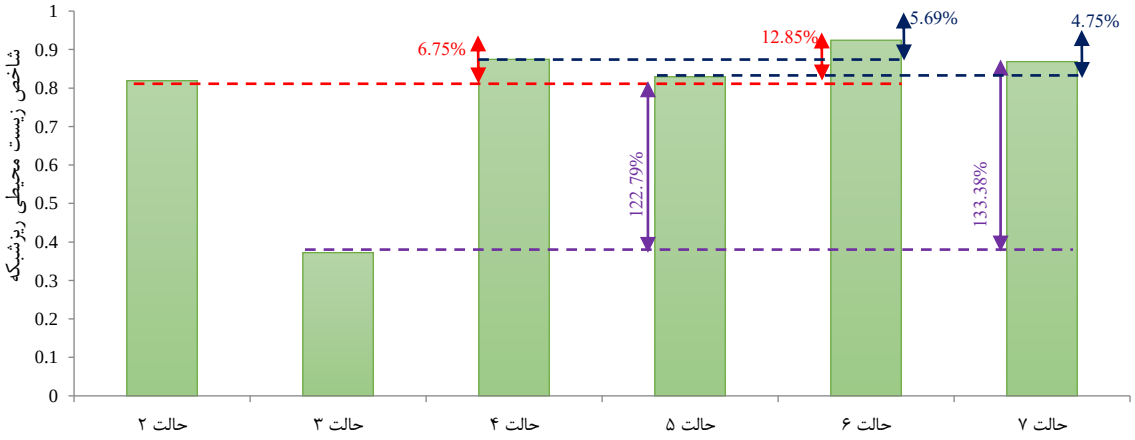


الف) شاخص زیست محیطی ریزشبکه در حالت های بهره برداری با حضور توربین بادی



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

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



شکل (۱۴): میزان بهبود شاخص زیست‌محیطی ریزشبکه هوشمند در حالت‌های مختلف بهره‌برداری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

مشابه شاخص اقتصادی، تأثیر سیستم ذخیره‌ساز انرژی همراه با منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه هنگامی که از پنل خورشیدی در ریزشبکه استفاده می‌شود، قابل توجه است. برای مثال، در حالت‌های ۴ و ۶، شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه 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 باطری، روش پیشنهادی شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه 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، تاثیر توربین بادی نسبت به پنل خورشیدی بیشتر است؛ به‌نحوی که شاخص انرژی الکتریکی پاک ریزشبکه 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 ریزشبکه عملکرد مناسبی را ارائه می‌دهد. این روش با مدیریت مؤثر تجهیزات ریزشبکه نه‌تنها شاخص اقتصادی و زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد، بلکه امکان بیشترین استفاده از تجهیزات موجود در ریزشبکه را نیز فراهم می‌کند. به بیان دیگر، بهره‌وری ریزشبکه با این روش به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه جهت مدیریت انرژی سالیانه یک ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه را ارتقا می‌بخشد. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که میزان وابستگی ریزشبکه 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، ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه بر اساس روش پیشنهادی، سود کلی ریزشبکه نسبت به مدیریت روزانه حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نوع منبع تولید پراکنده، بهره‌وری اقتصادی ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه 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 ریزشبکه بر جای گذاشته و با اعمال مدیریت بهینه تجهیزات در یک دوره زمانی سالیانه، بهبود قابل توجهی در بهره‌وری کلی ریزشبکه ایجاد می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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. Sadeghkhani, "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. Ahmadiahangar, 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. Prabaharan, "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. Wójtowicz, K. Księżyk, C. Wenge, S. Balischewski, 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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/

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]