مقاله پژوهشی

به‌کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری اصلاح‌شده جهت زمان‌بندی بهینه مرکز هاب انرژی با درنظر گرفتن مترو و منابع انرژی نو

محمدجعفر نافه فشان[۱]، بهمن بهمنی‌فیروزی*[۲]، مهدی نفر[۳]

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، amin.nafehfeshan@gmail.com

*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، ba.bahmani@iau.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، mehdi.nafar@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۰

چکیده: در این مقاله مشارکت بهینه هاب‌های انرژی متصل به شبکه در بازارهای انرژی روز-بعد و زمان واقعی ارائه می‌شود. طرح شبکه هوشمند پیشنهادی، از یک سیستم توزیع برق، یک سیستم انرژی حرارتی، یک سیستم آب، یک حمل و نقل خصوصی و یک سیستم حمل و نقل عمومی تشکیل شده است. علاوه بر این، چندین فناوری جدید مانند پیکربندی مجدد، انرژی ترمز احیا کننده مترو و غیره نیز در نظر گرفته شده است. سیستم توزیع برق پیشنهادی یک ریزشبکه هیبریدی متصل به شبکه است. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته برای جستجوی بهترین راه‌حل برای زمان‌بندی سیستم موردنظر برای روز بعد مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، طرح تبدیل بدون بو (unscented) کاهش یافته برای ثبت عدم قطعیت در سیستم استفاده شد. طرح پیشنهادی برای نشان‌دادن کارایی روش پیشنهادی بر روی یک سیستم تست ۳۳ باس IEEE در نرم افزار متلب پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می دهد که هزینه ها و آلودگی محیط زیست کاهش می‌یابد. با مقایسه شبکه هوشمند پیشنهادی با نتایج سایر مطالعات و سیستم‌های مشابه، کامل بودن شبکه پیشنهادی و کارایی سیستم مورد نظر نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بازار انرژی روز-بعد و زمان واقعی، سیستم مدیریت انرژی ، هاب انرژی متصل به شبکه، الگوریتم گرگ خاکستری اصلاح‌شده.

۱- مقدمه

به منظور کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت‌های فسیلی و جلوگیری از اتمام زود هنگام این نوع سوخت، دولت‌ها و سازمان‌های مختلفی مشتریان مصرف‌کننده انرژی‌های مختلف مانند الکتریکی، گازی و حرارتی را به استفاده از تکنولوژی‌های با آلودگی زیست محیطی و راندمان بالا تشویق می‌کنند. به عنوان مثال، یکی از راه‌کارهای استفاده شده برای این منظور، استفاده از سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت[۱] (CHP) در محل مصرف است، زیرا که این سیستم با قرارگیری در محل مصرف دو انرژی الکتریکی و حرارتی[۲] را با استفاده از انرژی گازی[۳]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

تأمین می‌کند. این امر علاوه بر مزیت افزایش راندمان تولید انرژی موجب کاهش تلفات سیستم قدرت[۴] ناشی از انتقال انرژی از مناطق تولید انرژی متمرکز به سمت مناطق مصرف خواهد شد. علاوه بر این، این منابع آلودگی بسیار پایین‌تری نسبت به نیروگاه‌های تولید برق[۵] را دارا می‌باشند. علاوه بر CHPها منابع انرژی تجدیدپذیر[۶] و خودروهای الکتریکی[۷] از تکنولوژی‌های دیگر هستند که می‌توانند آلودگی محیط زیست را کاهش دهند. در کنار این موضوع استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی[۸] (ES) و طرح‌های پاسخ‌گویی بار[۹] (DRP) (قادرند پیک‌سایی داشته باشند) نیز می‌توانند در راستای هدف پیشنهادی قدم بردارند. این هدف در صورت اجرای مدیریت انرژی مناسب این عناصر برقرار خواهد که برای اجرای این هدف بهتر است که این عناصر به صورت مجتمع در قالب هاب انرژی[۱۰] (EH)، نیروگاه مجازی برق[۱۱] (VPP) و ... باشند.

امروزه به منظور کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف‌کنترل نشده سوخت فسیلی، استفاده از فناوری‌های با آلودگی پایین مانند خودروهای الکتریکی[۱۲] (EVها) و منابع انرژی تجدیدپذیر[۱۳] (RESها)، سیستم‌های تولید انرژی با راندمان بالا مانند CHP، طرح‌های مناسب برای مدیریت انرژی[۱۴] مانند ذخیره‌سازهای انرژی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مورد توجه مصرف‌کنندگان انرژی و سازمان‌های مختلف شده است. از اینرو پیش‌بینی می‌شود که تعداد این منابع و بارهای اکتیو[۱۵] (خودروهای الکتریکی، طرح‌های پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌سازهای انرژی) در آینده‌ای نزدیک پشرفت و استفاده چشم‌گیری در سیستم قدرت به خصوص شبکه توزیع داشته باشد. از آنجا شبکه توزیع فعلی قادر به کنترل و مدیریت شبکه‌ای با تعداد بالای این عناصر نیست، لذا براساس تئوری شبکه‌توزیع هوشمند، بهتر است که این منابع و بارهای اکتیو به‌صورت چندین واحد مجتمع در طرح‌های ریزشبکه[۱۶]، نیروگاه مجازی برق و هاب انرژی در نظر گرفته شوند. علاوه بر این موضوع توجه شود که به علت وابستگی انرژی‌های مختلف به یکدیگر نیز بهتر است که مدیریت همزمان چندین نوع انرژی به‌صورت همزمان مورد ارزیابی قرار گیرد. به عنوان مثال، برای مدل‌سازی CHP نیاز است که مدل هر سه بخش آن یعنی بخش‌های الکتریکی، گازی و حرارتی درنظر گرفته شود. از اینرو براساس موضوع‌های اشاره شده، انتخاب قالب هاب انرژی برای بارهای اکتیو، منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مناسب خواهد بود که آن نیز قادر است راندمان انرژی را نسبت به مدیریت انرژی تکی انرژی‌های مختلف بهبود دهد. در نهایت توجه شود هاب انرژی به‌صورت «قالبی مجتمع که حامل‌های انرژی مختلف را به یکدیگر ارتباط می‌دهد و در آن انواع مختلف حامل‌های انرژی از قبیل انرژی الکتریکی، گاز، گرما و ... قابل تبدیل، ذخیره‌سازی و انتقال هستند» تعریف می‌گردد.

علاوه بر موضوع اشاره شده، هاب انرژی دارای عدم قطعیت‌های[۱۷] مختلف بار مصرفی[۱۸]، قیمت انرژی[۱۹]، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای توان خودروهای الکتریکی است. لذا مدل‌های تصادفی[۲۰]، احتمالاتی[۲۱] و استوار[۲۲] برای مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت پیشنهاد می‌شوند.

در زمینه مسائل هاب انرژی در سیستم قدرت تحقیقات نتفاوتی صورت گرفته است. در [۱] مدل پخش توان بهینه[۲۳] (OPF) برای سیستم چند حاملی انرژی[۲۴] (MCE) شامل شبکه‌های الکتریکی، گازی و حرارتی در حضور هاب‌های انرژی بیان شده است. قابل توجه است در این طرح هماهنگی مستقیم مابین عناصر هاب انرژی و اپراتورهای شبکه‌های انرژی[۲۵] (ENOs) مختلف وجود دارد. از آنجا که مدل بدست آمده دارای چارچوبی غیرخطی ناشی از معادلات پخش توان شبکه‌های مختلف است، لذا حجم مسأله بزرگ و چارچوب آن غیرخطی است. لذا در [۱] به منظور دستیابی به راه‌حل بهینه، آن طرح پیشنهادی را به OPF چند حاملی[۲۶] تجزیه می‌کند که برای هر شبکه انرژی، OPF آن به‌صورت مجزا حل خواهد شد. لذا با توجه به موارد اشاره شده در این طرح وابستگی انرژی‌های مختلف به یکدیگر در نظر گرفته نشده است. بنابراین این طرح برای مواردی مناسب است که در هاب انرژی عنصر که با چندین نوع انرژی در ارتباط است (مانند میکرو توربین، CHP و بویلر)، موجود نباشد. در [۲] مدلی همانند [۱] در نظر گرفته شده است که اثر سیستم‌های بادی را نیز در نظر گرفته است. از آنجا که توان تولیدی این سیستم‌ها دارای عدم قطعیت است، لذا مدل مسأله استفاده شده در این مرجع به‌صورت مدل احتمالاتی[۲۷] است. همچنین در این طرح برای دستیابی به راه‌حل بهینه از الگوریتم ژنتیک[۲۸] (GA) استفاده شده است. قابل توجه است که الگوریتم از نوع الگوریتم‌های تکاملی سنتی[۲۹] است که برای دستیابی به پاسخی مطمئن برای مسأله با حجم بالا مانند بهره‌برداری سیستم MCE نیاز به اتخاذ پارامترهای تنظیم مناسب است. لذا این امکان نیز وجود دارد که با تغییر داده‌های مسأله، نیاز باشد میزان پارامترهای تنظیم نیز تغییر کند.

در [۳] یک مدل عمومی و بهینه برای مدیریت هاب انرژی متناسب با تقاضای توان الکتریکی، حرارتی و سرمایشی بیان شده است. همچنین در [۴] بهره‌برداری چند هدفه هاب انرژی توزیع شده[۳۰] (DEH) در شبکه‌های مختلف انرژی بیان شده است. در [۵] مدل مسأله مدیریت انرژی هاب انرژی در دوره مطالعاتی میان مدت در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته بیان شده است. این مسأله دارای عدم قطعیت‌های قیمت انرژی و توان تولیدی سیستم‌های بادی است. از اینرو برای مدل‌سازی این پارامترها، طرح پیشنهادی مدل تصادفی را اتخاذ کرده است. در [۶] یک مدل دو سطحی برای عملکرد هاب انرژی در بازار انرژی درنظر گرفته شده است، بطوری که بیشینه‌سازی سود هاب‌های انرژی در بازارهای انرژی الکتریکی و گرمایشی در مسأله سطح بالا دیده شده است. همچنین در مسأله سطح پایین، کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری عناصر هاب انرژی مقید به مدل هاب انرژی بیان شده است. در ادامه برای دستیابی به راه‌حل بهینه، طرح پیشنهادی توسط روش کان تاکر[۳۱] (KKT) به مسأله تک سطحی تبدیل شده و سپس توسط حل کننده‌های مرسوم حل شده است. علاوه بر این در [۷] هاب انرژی برپایه سیستم‌های بادی بیان شده است. در این مرجع برای در نظر گرفتن

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

پارامترهای عدم قطعیت، از مدل ترکیبی تصادفی و روش تئوری تصمیم-گیری شکاف اطلاعاتی[۳۲] (IGDT) استفاده شده است. قابل توجه است که در روش IGDT حداکثر شعاع عدم قطعیت پارامترهای عدم قطعیت به ازای پاسخ بهینه مسأله بدست می‌آید. همچنین، در [۸] مدل مسأله بهره‌برداری هاب انرژی مسکونی بر پایه منابع انرژی تجدیدپذیر[۳۳] مورد بررسی قرار گرفته است که این مرجع نیز از برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های توان تجدیدپذیر و بارهای مختلف الکتریکی و گرمایشی استفاده کرده است.

در [۹] یک مدل مسأله زمان‌بندی اقتصادی تعاونی برای هاب انرژی درنظر گرفته شده است، که در آن، هر هاب انرژی به‌صورت یک مرکز تعاونی انرژی مد نظر قرار گرفته‌اند. در [۱۰] نیز مدل مسأله بهینه-سازی فرصت محدود[۳۴] برای سیستم MCE متشکل از هاب انرژی ارزیابی شده است. علاوه بر این توجه شود که مسأله بهره‌بردرای هاب انرژی یک مسأله غیرخطی با حجم بزرگ است که عموم تحقیقات مانند [۲، ۱۴-۱۱] از الگوریتم‌های تکاملی برای حل آن استفاده کرده‌اند. در [۲] از الگوریتم ژنتیک برای این هدف استفاده شده است، در [۱۴-۱۱] از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری اصلاح‌شده (MTLBO) برای حل مسأله بهره‌بردرای‌ها انرژی استفاده شده است.

در [۱۵ و ۱۶] مدل پخش توان اقتصادی[۳۵] هاب انرژی مدل‌سازی شده است. به عبارتی در این مرجع مدل پخش توان بهینه شبکه‌های مختلف انرژی در حضور هاب انرژی مدل‌سازی شده است، به‌طوری که تابع هدف آن اشاره به هزینه بهره‌برداری عناصر هاب انرژی دارد. این مسأله نیز یک مسأله غیرخطی با حجم بزرگ است که [۱۵ و ۱۶] استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۳۶] (PSO) برای حل مسأله را پیشنهاد داده‌اند. در [۱۷] یک مدل جدید از هاب انرژی ارائه شده است که می‌تواند باعث افزایش استفاده از انرژی پاک و بهره‌وری انرژی و دستیابی به هدف مصرف انرژی محلی شود. ثانیا، بر اساس چارچوب هاب انرژی بهم‌پیوسته، اقدام به تماس در اینترنت انرژی انجام می‌شود. سپس، یک استراتژی مدیریت توزیع انرژی برای هاب انرژی با استفاده از تئوری سازگاری طراحی شده است. در نهایت مطالعات موردی نشان می‌دهد که مکانیسم تنظیم قیمت با بیش از ۵۰۰ هاب انرژی پایدار است و تنظیم قیمت پس از ۱۵ بار به یک مقدار ثابت گرایش می‌یابد. همچنین در [۱۸] یک مدیریت انرژی مقید به ریسک برای هاب انرژی متشکل از فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده[۳۷] (CAES) و طرح پاسخ‌گویی بار[۳۸] (DRP) بیان شده است. در این مسأله از برنامه-ریزی تصادفی برای مدل‌سازی پارمترهای عدم قطعیت فتوولتائیک‌ها و بارها استفاده شده است. همچنین ذخیره‌ساز انرژی و پاسخ‌گویی بار به منظور افزایش انعطاف‌پذیری هاب انرژی در حضور منابع فتوولتائیک استفاده شده‌اند. در مقاله [۱۹] از منابع انرژی تجدیدپذیر در یک ریز-شبکه هیبرید AC-DC جهت رسیدن به مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه جهت کاهش هزینه‌های تولید، انتقال و توزیع برق و همچنین کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی استفاده شده است. همچنین در این مقاله عملکرد سیستم تحت حملات سایبری مورد بررسی قرار گرفته شده است و در انتها از تکنولوژی بلاکچن جهت ایمن‌سازی داده‌های مبادله شده در ریزشبکه استفاده شده است. در [۲۰]، مسئله پخش بار اقتصادی در سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم جستجو و نجات، بمنظور بهینه سازی کل هزینه تولیدی واحد ها حل و بررسی شده است.

در این مطالعه، الگوریتم گرگ خاکستری اصلاح شده برای بهینه سازی عملکرد یک هاب انرژی در نظر گرفته شده است. هاب انرژی شامل یک سیستم توزیع برق، یک سیستم انرژی حرارتی، یک سیستم آب، یک سیستم حمل و نقل خصوصی و یک سیستم حمل و نقل عمومی است که شامل اتصال بین وسیله نقلیه الکتریکی و سیستم مترو توسط یک باتری در ایستگاه مترو است، جایی که انرژی حاصل از ترمز احیا کننده مترو در باتری ذخیره می‌شود. این انرژی را می توان بین خودروهای برقی و مترو استفاده کرد. سیستم توزیع برق یک ریزشبکه AC-DC هیبریدی متصل به شبکه است که مجهز به مبدل AC-DC دو جهته است. فرض بر این است که انرژی ترمز احیا کننده مترو و انرژی ذخیره شده در خودروهای الکتریکی می‌تواند برای تامین نیازهای الکتریکی از طریق برنامه های V2G و V2S استفاده شود. روش بهینه‌سازی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی MTs، FCs، HPs، DUs، ESSs، مبدل‌های AC-DC دو جهته، خرید انرژی از شبکه بالادستی و منابع انرژی توزیع شده (DER) طراحی شده است. همچنین یک سیستم HP برای تامین انرژی حرارتی که از راندمان بالایی برخوردار است برای تامین انرژی حرارتی توسط سیستم گازی خریداری‌شده از شبکه درنظر گرفته شده است. همچنین در این مطالعه، یک سیستم تصفیه آب دریا به دلیل محدودیت احتمالی در مصرف آب در آینده در نظر گرفته شده است. طرح تبدیل بدون کاهش یافته (RUT) برای ثبت عدم قطعیت قیمت انرژی استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی وا اصلاح شده برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. طرح پیشنهادی بر روی یک شبکه آزمایشی ۳۳ باس IEEE اصلاح شده پیاده‌سازی شده است.

بخش‌های بعدی مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش ۲ فرمول ریاضی مسئله بهینه‌سازی را برای بهینه‌سازی هاب انرژی بیان شده است. بخش ۳ ساختار بهینه‌سازی تصادفی را برای برنامه‌ریزی بهینه هاب انرژی توضیح داده شده است. سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه سازی در بخش ۴ توضیح داده شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری نهایی در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی

یک مسئله بهینه‌سازی در این بخش برای بهینه سازی عملکرد سیستم هاب انرژی فرمول سازی شده است. اپراتور سیستم می‌تواند منابع انرژی تولید پراکنده‌های موجود را برنامه‌ریزی کند و با استفاده از روش پیشنهادی، روز بعد انرژی را با شبکه بالادستی خرید و فروش کند. انواع مختلفی از بارهای الکتریکی مانند بارهای مسکونی، پمپ های حرارتی،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$$min\ F = \sum_{i\in DER}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}\begin{pmatrix}u_{i,j,t}P_{i,j,t}\lambda_{i,j,t} + \lambda_{i,j}^{ON}\ max(\ 0, u_{i,j,t} \\ -u_{i,j,t-1}) + \lambda_{i,j}^{OFF}\ max(\ 0, u_{i,j,t-1} - u_{i,j,t})\end{pmatrix} + \sum_{t=1}^{T} P_t^G \lambda_t^G + \sum_{t=1}^{T} P_t^{T\square ermal}\lambda_t^{Heat} + \sum_{t=1}^{T} W_t^G \lambda_t^{Water} + \lambda_{deg}^{EV} \quad (۱)$$

واحدهای نمک زدایی و سیستم های حمل و نقل الکتریکی به باس‌های سیستم متصل می‌شوند. تقاضای برق، گرما و آب می‌تواند توسط شبکه بالادستی و منابع تولید پراکنده مانند پانل‌های فتوولتاییک، توربین بادی، میکروتوربین، فیوسل، سیستم های ذخیره ساز انرژی و ... تامین شود. در مورد سیستم‌های حمل و نقل عمومی، به ویژه مترو، انرژی ترمز احیا کننده می‌تواند به شبکه بازگردد تا مستقیماً به مشتریان خدمات رسانی کند یا در باتری‌های خودرو برقی یا سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی ذخیره شود.

۲-۱- تابع هزینه

تابع هدف مسئله پیشنهادی در معادله (۱) نشان داده شده است، که منابع انرژی شامل پانل های فتوولتاییک، توربین بادی، سیستم ذخیره-ساز انرژی، پیل سوختی، میکروتوربین، پمپ‌های حرارتی، واحد نمک زدایی، ایستگاه‌های پارکینگ خودرو برقی و مترو را نشان می‌دهد. معادله (۱) از پنج بخش تشکیل شده است. بخش اول هزینه انرژی منابع انرژی تولید پراکنده را ارائه می‌دهد. بخش‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب هزینه انرژی شبکه‌های برق، حرارت و آب خریداری‌شده از شبکه‌های بالادستی یا منابع انرژی تولید پراکنده‌های مربوطه را نشان می‌دهند. بخش پنجم هزینه تخریب باتری خودروهای الکتریکی است. بخش اول شامل هزینه خرید انرژی از منابع تولید پراکنده، هزینه‌های راه اندازی و خاموشی منابع تولید پراکنده است. در معادله (۱)، قابل توجه است که توان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، پارک خودروهای برقی و مترو دارای علامت منفی هستند که به شبکه بالادست و پارامترها تزریق می‌شوند. درغیر این صورت علامت مثبت دارد. تابع هدف مسئله پیشنهادی برای به حداقل رساندن عملکرد هاب انرژی در شبکه هوشمند حل شده است. مسئله پیشنهادی دارای چندین محدودیت عملیاتی است که در ادامه معرفی می‌شوند.

۲-۲- قیود تعادل توان

محدودیت‌های تعادل توان باید در هر دو ریزشبکه AC و DC برآورده شود. معادله (۲) تعادل توان را در زیرشبکه AC نشان می‌دهد. در معادله (۲)، $P_t^{loss,AC}$ تلفات برق در شبکه AC را نشان می‌دهد. معادله (۴) و معادله (۵) به ترتیب نشان‌دهنده جریان توان اکتیو و راکتیو سیستم هستند. معادله تعادل توان در ریزشبکه DC در معادله (۶) نشان داده شده است.

$$\sum_{i\in DER^{AC}}\sum_{j=1}^{N_i^{AC}} P_{i,j,t} + P_t^G = \sum_{k=1}^{K^{AC}} P_{k,t}^L + P_t^{loss,AC} \quad (۲)$$

$$P_t^{loss,AC} = \sum_{i=1}^{N_{branc\square}} R_i \times \left|I_{i,t}\right|^2 \quad (۳)$$

$$P_t^{inj,AC} = \sum_{k=1}^{K^{AC}}\sum_{k'=1}^{K^{AC}} V_{k,t}V_{k',t}Y_{k,k'}\cos(\theta_{k,k'} + \delta_{k,t} - \delta_{k',t}) \quad (۴)$$

$$Q_t^{inj,AC} = \sum_{k=1}^{K^{AC}}\sum_{k'=1}^{K^{AC}} V_{k,t}V_{k',t}Y_{k,k'}\sin(\theta_{k,k'} + \delta_{k,t} - \delta_{k',t}) \quad (۵)$$

$$\sum_{i\in DER^{DC}}\sum_{j=1}^{N_i^{DC}} P_{i,j,t} + P_t^C = \sum_{k=1}^{K^{DC}} P_{k,t}^L + P_t^{loss,DC} \quad (۶)$$

معادله (۶) نشان می‌دهد که مجموع تولیدات الکتریکی باید با کل بارهای الکتریکی و تلفات برق در هر زیرشبکه برابر شود.

۲-۳- قیود ظرفیت

معادله (۷) محدودیت توان خرید/فروش با شبکه بالادستی را در هر مرحله زمانی نشان می‌دهد. محدودیت توان منابع تولید پراکنده توسط معادله (۸) نشان داده شده است. علاوه بر این، معادله (۹) محدودیت توانی را که توسط مبدل دو جهته منتقل می‌شود را نشان می‌دهد.

$$P^{G,min}P_t^G \le P^{G,max} \quad (۷)$$

$$P^{minP_{i,j,t}} \le P^{max} \quad (۸)$$

$$P^{C,min}{P_t}^C \le P^{C,max} \quad (۹)$$

۲-۴- قیود ظرفیت خط

مقدار توانی که از طریق خطوط مجاز منتقل می‌شود، توسط معادله (۱۰) مشخص شده است.

$$\left|P_{k,k'}^{Line}\right| \le P_{k,k'}^{Line,max} \quad (۱۰)$$

۲-۵- قیود شدت ولتاژ

محدوده مجاز برای ولتاژ باس ها با معادله (۱۱) تعیین می‌شود.

$$V_{k,t} \le V^{max} \quad (۱۱)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

۲-۶- قیود نرخ رمپ

معادله (۱۲) محدوده افزایش یا کاهش در توان منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد.

$$\left|P_{i,j,t} - P_{i,j,t-1}\right| \le RR_{i,j} \quad (۱۲)$$

۲-۷- قیود سیستم ذخیره‌ساز انرژی

وضعیت شارژ jامین EES را می توان با استفاده از معادله ۱۳ محاسبه کرد. توجه داشته باشید که وقتی اپراتور سیستم برق را از یک ESS دریافت می‌کند، توان دارای علامت مثبت است. در غیر این صورت علامت منفی دارد. محدوده مجاز وضعیت شارژ برای یک ESS توسط معادله (۱۴) تعیین می‌شود. معادله (۱۵) تضمین می‌کند که شارژ و تخلیه نمی‌توانند همزمان اتفاق بیفتند.

$$S_{j,t}^{EES} = S_{j,t-1}^{EES} - (B_{j,t}^{C,ESS} P_{i,j,t} \eta^{C,ESS} + B_{j,t}^{D,ESS} \frac{P_{i,j,t}}{\eta^{D,ESS})\Delta t} \quad (۱۳)$$

$$S^{EES,min}{}_{j,t}^{EES} S^{EES,max} \quad (۱۴)$$

$$B_{j,t}^{C,ESS} + B_{j,t}^{D,ESS} \le 1 \quad (۱۵)$$

۲-۸- قیود پارک خودرو برقی

مجموع انرژی ذخیره‌شده در وسایل نقلیه الکتریکی که در j امین پارکینگ خودروهای الکتریکی پارک شده‌اند را می‌توان با معادله (۱۶) محاسبه کرد. معادله (۱۶) از پنج عبارت تشکیل شده است. عبارت اول میزان انرژی ذخیره‌شده در وسایل نقلیه الکتریکی موجود در پارکینگ را در مرحله زمانی قبلی نشان می‌دهد. عبارت دوم که با ۱ نشان داده می‌شود، نشان‌دهنده تعامل بین پارکینگ خودروی الکتریکی و شبکه است. عبارت سوم نشان‌دهنده جمع حالت اولیه شارژ وسایل نقلیه الکتریکی است که در مرحله زمانی فعلی به پارکینگ خودروی الکتریکی متصل هستند. اصطلاح چهارم جمع حالت شارژ وسایل نقلیه الکتریکی است که در مرحله زمانی فعلی از پارکینگ خودروی برقی جدا شده‌اند. جمله پنجم که با ۲ نشان داده شده است، تعامل بین پارکینگ خودروی الکتریکی و مترو را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که هنگامی که اپراتور سیستم برق را از پارکینگ خودروی الکتریکی دریافت می‌کند، قدرت دارای علامت مثبت است، در غیر این صورت علامت منفی دارد.

$$S_{j,t}^{EV} = S_{j,t-1}^{EV} - \underbrace{(B_{j,t}^{C,EV} P_{i,j,t} \eta^{C,EV} + B_{j,t}^{D,EV} \frac{P_{i,j,t}}{\eta^{D,EV})\Delta t}}_{1} + S_{j,t}^{EV,Arr} - S_{j,t}^{EV,Dep} + \underbrace{(P_{j,t}^{Metro-EV} \eta^{C,EV} - \frac{P_{j,t}^{EV-Metro}}{\eta^{D,EV})\Delta t}}_{2} \quad (۱۶)$$

محدوده مجاز برای وضعیت شارژ j امین پارکینگ خودروی الکتریکی با معادلات (۱۷) و (۱۸) تعیین می‌شود. تبادل توان مجاز بین پارکینگ خودروی الکتریکی و مترو توسط معادلات (۱۹) و (۲۰) محدود شده است. معادله (۲۱) تضمین می‌کند که تبادل توان بین پارکینگ خودروهای الکتریکی و مترو در هر دو جهت به طور همزمان انجام نمی-شود.

$$S_{j,t}^{EV} \le S^{Ind,min}{}_{j,t}^{EV} \quad (۱۷)$$

$$S_{j,t}^{EV} \ge \sum_{v=1}^{N_{j,t}^{EV}} BC_v \quad (۱۸)$$

$$0 \le P_{j,t}^{Metro-EV} \le P^{Metro-EV,max}{}_{j,t}^{Metro-EV} \quad (۱۹)$$

$$0 \le P_{j,t}^{EV-Metro} \le P^{EV-Metro,max}{}_{j,t}^{EV-Metro} \quad (۲۰)$$

$$B_{j,t}^{EV-Metro} + B_{j,t}^{Metro-EV} \le 1 \quad (۲۱)$$

۲-۹- قیود مترو

در اینجا فرض شده است که انرژی احیا کننده مترو می‌تواند برای شارژ وسایل نقلیه الکتریکی در یک پارکینگ یا برای تامین قطارها استفاده شود. قابل توجه است که توان انتقالی از مترو به پارکینگ خودروهای الکتریکی با $P^{Metro-EV,max}$ محدود می‌شود که به انرژی احیا کننده موجود بستگی دارد. علاوه بر این، توان را می توان از پارکینگ خودروی برقی به مترو منتقل کرد. با در نظر گرفتن این موضوع، توان انتقالی از شبکه به مترو را می توان با معادله (۲۲) محاسبه کرد.

$$P_{i,j,t} = P_{j,t}^{MetroAct} - P_{j,t}^{Bra} - P_{j,t}^{EV-Metro} \quad i \in \{Metro\} \quad \forall j,t \quad (۲۲)$$

۲-۱۰- قیود تعادل گرما

تقاضای گرما می‌تواند توسط پمپ های حرارتی و سیستم انرژی حرارتی تامین شود. از این رو، محدودیت تعادل حرارتی به عنوان معادله (۲۳) نشان داده شده است.

$$P_t^{T\square ermal} = \sum_{\square=1}^{H} P_{\square,t}^{Heat} - \sum_{i}\sum_{j=1}^{N_i} P_{i,j,t} \quad (۲۳)$$

۲-۱۱- قیود سیستم آب

سیستم مکمل تقاضای آب از یک واحد نمک‌زدایی، یک مخزن اولیه و یک مخزن آب شیرین تشکیل شده است. واحد آب شیرین کن از طریق آب دریا و برق تامین می‌شود. سپس آب شیرین شده به مخزن ثانویه منتقل می‌شود. مخزن آب شیرین به مخزن اولیه و همچنین شبکه آب متصل شده است. آب مورد نیاز، به عنوان مثال، نیاز آب مترو و ساختمان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 1- Spring 2024

ها، توسط مخزن آب شیرین تامین می‌شود. در معادلات زیر مدل سیستم آب فرموله شده است. مقدار آب ذخیره شده در مخزن اولیه را می‌توان با معادله (۲۴) محاسبه کرد. حجم آب مخزن آب شیرین در مرحله زمانی t توسط معادله (۲۵) ارائه شده است. محدوده مجاز آب ذخیره شده در مخزن اولیه و مخزن آب شیرین به ترتیب با معادله (۲۶) و معادله (۲۷) تعیین می‌شود. در نهایت توان مصرفی واحد نمک زدایی را می توان با معادله (۲۸) محاسبه کرد.

$$U_t^{PT} = U_{t-1}^{PT} + W_t^{DU,in} - W_t^{DU,out} \quad (۲۴)$$

$$U_t^{FWT} = U_{t-1}^{FWT} + W_t^{DU,out} + W_t^{G} - W_t^{demand} \quad (۲۵)$$

$$0 \le U_t^{PT} \le U^{PT,max} \quad (۲۶)$$

$$U^{FWT,min}{}_t^{FWT} {}^{FWT,max} \quad (۲۷)$$

$$P_{i,j,t} = W_t^{DU,in} CF^{DU} \quad (۲۸)$$

۲-۱۲- هزینه تخریب باتری‌های خودرو برقی

تخریب باتری به دلیل چرخه های شارژ/دشارژ باتری اتفاق می‌افتد .عمق دشارژ به دست آمده توسط منحنی Wöhler، تعداد چرخه هایی را نشان می‌دهد که باتری قادر به شارژ و دشارژ شدن است [۲۱] معادله (۲۹) فرمول منحنی Wöhler را تعریف می‌کند، که در آن ثابت‌های مربوط به نوع باتری را تعریف می‌کند و n_{Cycle} تعداد چرخه‌های ممکن را با توجه به مقدار [۲۱] نشان می‌دهد. برای باتری های لیتیوم یون تولید شده در شرکت سافت، متغیرها و به دست آمده است [۲۲].

هزینه کاهش تخلیه باتری از حالت شارژ کامل، یعنی عمق تخلیه برابر با صفر، تا یک سطح شارژ تعیین‌شده، یعنی عمق تخلیه برابر با DoD_{spec} است که در معادله ۳۰ محاسبه شده است، که در آن E^{EVBat} انرژی باتری (کیلووات ساعت) قابل استفاده را تعریف می‌کند.

$$n_{cycle}(DoD) = a.DoD^b \quad (۲۹)$$

$$\lambda_{\deg}(0, DoD_{spec}) = \frac{\lambda_{ins}^{EVBat} * DoD_{spec} * E^{EVBat}}{n_{cycle}(DoD_{spec})} \quad (۳۰)$$

هزینه تخریب چرخه تخلیه از $DoD_{initial}$ به DoD_{final} از طریق معادله ۳۱ محاسبه می‌شود. در نهایت، در معادله ۳۲، کل هزینه تخریب ارائه شده است که کل هزینه تخریب بیش از تعداد تخلیه است.

$$\lambda_{\deg}(DoD_{initial}, DoD_{final}) = \lambda_{\deg}(0, DoD_{final}) - \lambda_{\deg}(0, DoD_{initial}) \quad (۳۱)$$

$$\lambda_{\deg}^{EV} = \sum_{n_{dis}} \lambda_{\deg,n}(DoD_{initial}, DoD_{final}) \quad (۳۲)$$

۳- چارچوب بهینه‌سازی تصادفی برای زمان‌بندی بهینه ریزشبکه هیبرید

در این بخش، یک چارچوب بهینه‌سازی تصادفی برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه می‌شود. با توجه به حجم بالای محاسبات ناشی از سیستم پیشنهادی، نیاز به روش های قدرتمند و سریع برای مقابله با عدم قطعیت و حل مسئله احساس می شود. با استفاده از روش تبدیل unscented کاهش‌یافته (RUT)، سرعت حل مسائل با عدم قطعیت افزایش یافته است (سرعت حل مسائل دو برابر شده است). از این رو، از تکنیک RUT برای مدل سازی عدم قطعیت در مورد قیمت بازار استفاده شده است. علاوه بر این، از الگوریتم گرگ خاکستری برای جستجوی بهترین راه حل در مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده شده است.

۳-۱- تبدیل unscented کاهش یافته(RUT)

سه روش اصلی برای مدل‌سازی عدم قطعیت وجود دارد، از جمله شبیه‌سازی مونت کارلو، تکنیک‌های تحلیلی و تکنیک‌های تقریبی[۲۳] شبیه سازی مونت کارلو روشی شناخته شده برای بررسی رفتار نامشخص متغیرهای تصادفی در یک مسئله است. برای رسیدن به این هدف، سناریوهای متعددی تولید می‌شود و با توجه به هر سناریوی تولید شده، مشکل حل می‌شود. سپس ویژگی‌های آماری، به عنوان مثال، مقدار میانگین، متغیرهای تصمیم و تابع هدف را می‌توان محاسبه کرد. اگرچه شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند به نتایج دقیقی برسد، اما نیازمند هزینه محاسباتی بالایی است. از این رو برای کارهای برنامه ریزی کوتاه مدت توصیه نمی‌شود. در مقابل، تکنیک‌های تحلیلی از نظر محاسباتی کارآمدتر هستند اما با برخی از فرضیات ریاضی مسئله را ساده می‌کنند [۲۴]. روش های تقریبی، یعنی روش تبدیل unscented بر این کاستی ها غلبه کرده‌اند.

برای مسئله غیرخطی $y = f(x)$، ورودی تصادفی است که طول آن برابر با تعداد پارامترهای مجهول است. علاوه بر این، تابع غیرخطی و بردار خروجی را به ترتیب تعریف کنید. علاوه بر این، μ نشان‌دهنده مقدار میانگین و P_{xx} نشان دهنده کوواریانس است. مانند روش تخمین دو نقطه ای، مسئله $2m+1$ بار برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در روش تبدیل unscented حل می‌شود. در مقابل، مشکل m+2 بار در تبدیل unscented کاهش یافته حل می‌شود. از این رو، تکنیک RUT سریعتر از روش UT است. در نتیجه، مسئله بهینه‌سازی تصادفی پیچیده را می‌توان سریعتر و آسانتر حل کرد. در ادامه، شرح گام به گام طرح RUT برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها ارائه شده است [۲۵].

مرحله ۱. انتخاب پارامتر آزاد W_0 در محدوده$0] ، [1$

مرحله ۲. انتخاب توالی وزن با استفاده از : $W_i = \frac{1-W_0}{m+1}$

مرحله ۳. مقداردهی اولیه دنباله برداری با استفاده از:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 1- Spring 2024

$$x_0^1 = [0],\ x_1^1 = \left[\frac{-1}{\sqrt{2W_1}}\right],\ x_2^1 = \left[\frac{1}{\sqrt{2W_1}}\right] \quad (۳۳)$$

مرحله ۴. گسترش دنباله‌برداری در مجموعه j با استفاده از:

$$x_i^j = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_0^{j-1} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \left[\begin{matrix} x_i^{j-1} \\ -1 \end{matrix} \over \sqrt{j(j+1)W_1}\right],\ i = 1,\dots,j \\ \left[\begin{matrix} 0_{j-1} \\ j \end{matrix} \over \sqrt{j(j+1)W_1}\right],\ i = j+1 \end{cases} \quad (۳۴)$$

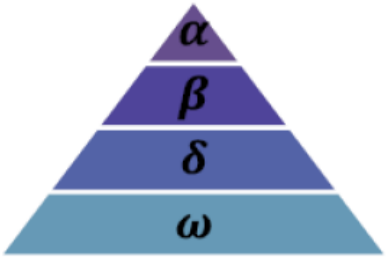
مرحله ۵. دادن $m+2$ نقاط سیگمای ورودی به تابع غیرخطی و گرفتن نمونه های خروجی با استفاده از: $Y^i = f(x^j)$

مرحله ۶. محاسبه میانگین و ماتریس کوواریانس خروجی Y با استفاده از: $\mu_j = \sum_{i=0}^{P} W_i y_i$ و $P_{yy} = \sum_{i=0}^{P} W_i (y_i - \mu_i)(y_i - \mu_i)^T$.

۳-۲- الگوریتم گرگ خاکستری بهبودیافته

الگوریتم ابتکاری گرگ خاکستری با الهام گرفتن از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری ارائه شده است. الگوریتم گرگ‌های خاکستری فرآیند شکار گرگ خاکستری طبقه‌بندی نحوی شکارچیان گرگ خاکستری الهام گرفته شده است. در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، سه مرحله اصلی در فرآیند هر شکار وجود دارد.

هر دو جستجو، محاصره و حمله با رفتار گرگ‌های خاکستری شبیه سازی شده‌اند. در استراتژی پیشنهادی الگوریتم ابداعی گرگ خاکستری، نحوه رتبه‌بندی گرگ‌ها در گله، با تعریف چهار نوع مختلف گله گرگ یعنی گرگ‌های آلفا، بتا، دلتا و امگا شبیه‌سازی شده است. گرگ الفبا عنوان رهبر شناسایی رفتار گرگ‌ها در فرآیندهای جستجو، احاطه و حمله به شکار است که باید توسط سایر گرگ‌ها انجام شود. نحوه رتبه-بندی گرگ‌ها در دسته مشابه (۲) است.

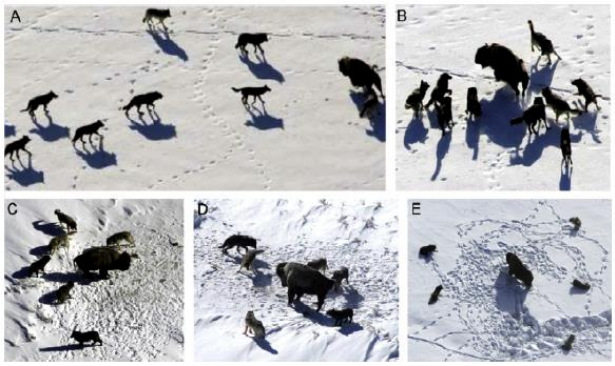


شکل (۱): هرم رتبه‌بندی رهبری گله گرگ‌ها.

علاوه بر رتبه‌بندی گرگها در گله، در الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری فرآیند شکار گروهی گرگ‌ها شبیه‌سازی شده است که مراحل آن به صورت زیر است:

- جستجوی هدف شکار
- حرکت دسته جمعی به سوی هدف شکار
- حمله به سمت هدف شکار

که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): مراحل شکار دسته جمعی گرگ‌های خاکستری.

۳-۲-۱- مدل‌سازی ریاضیاتی الگوریتم فراابتکاری گرگ‌های خاکستری

در این بخش مدل‌های ریاضیاتی رتبه‌بندی گرگ‌های خاکستری در گله و نحوهی شکار دسته- جمعی آنها ارائه می‌شود.

۳-۲-۱-۱- رتبه‌بندی گرگ‌های خاکستری در گله

به‌منظور مدل‌سازی رتبه‌بندی گرگ‌های خاکستری در گله در الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری، ابتدا پاسخ‌ها براساس مقدار تابع هدف از کم به زیاد مرتب می‌شوند، بهینه‌ترین پاسخ از لحاظ مقدار تابع هدف (پاسخ اول در پاسخ‌های مرتب شده) به عنوان گرگ آلفا، پاسخهای ردیف دوم و سوم به ترتیب به عنوان گرگ‌های بتا و دلتا و مابقی پاسخ‌ها به‌عنوان گرگ امگا در نظر گرفته می‌شوند.

۳-۲-۱-۲- مدل‌سازی نحوه‌ی شکار گرگ‌های خاکستری به‌صورت دسته جمعی

در الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری، فرآیند شکار بوسیله‌ی گرگ-های آلفا، بتا و دلتا رهبر می‌شود. و سایر گرگ‌های گله یعنی گرگ‌های نوع امگا از آنها پیروی می‌کنند. در مدل‌سازی ریاضی این فرآیند با توجه به اینکه پاسخ بهینه‌ی سراسری نامشخص است از پاسخ‌های مرتبط با گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا که در مدل‌سازی رتبه‌بندی گرگ‌های تعیین شدند، برای سوق دادن سایر گرگ‌های گله یعنی گرگ‌های نوع آلفا به سمت جواب بهینه‌ی سراسری در فضای جستجوی مسأله استفاده می-شود.

معادلات (۳۵)-(۴۲) نشان‌دهنده‌ی الگوریتم گرگ خاکستری می-باشند. فرآید احاطه کردن[۳۹] با معادلات (۳۵)-(۳۹) مدل شده است که در آن، W_i نشان‌دهنده‌ی مکان یک گرگ، و X_i^p نشان دهنده‌ی مکان طعمه در تکرار iام می‌باشند. علاوه بر این $rand_1$ و $rand_2$ بردارهایی تصادفی هستند که مقدار آن‌ها بین صفر و یک می‌باشد. در این مرحله،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

تمامی گرگ‌ها ملزم به دنبال کردن سه جواب برتر (α ،β و γ) می‌شوند. این رفتار شکار، توسط معادلات (۴۰)-(۴۲) مدل‌سازی شده است که در آن، $C_2(1)$، $C_2(2)$، و $C_2(3)$ با استفاده از معادله‌ی (۳۸) محاسبه شده‌اند، و همچنین N_w نیز بیانگر جمعیت گرگ‌ها می‌باشد.

$$C_1 = \left|C_2 \times X_i^p - W_i\right| \quad (۳۵)$$

$$W_{i+1} = X_i^p - C_3 \times C_1 \quad (۳۶)$$

$$C_3 = 2 \times C_3 \times rand_1 - A_i \quad (۳۷)$$

$$C_2 = 2 \times rand_2 \quad (۳۸)$$

$$A_i = 2 - (2 * i)/i_{max} \quad (۳۹)$$

$$\begin{aligned} C_1^\alpha &= |C_2(1) \times W^\alpha - W_i| \\ C_1^\beta &= \left|C_2(2) \times W^\beta - W_i\right| \\ C_1^\gamma &= |C_2(3) \times W^\gamma - W_i| \end{aligned} \quad (۴۰)$$

$$\begin{aligned} W_i^n(1) &= W_i^\alpha - C_3^n(1) \times C_{1,i}^\alpha \\ W_i^n(2) &= W_i^\beta - C_3^n(2) \times C_{1,i}^\beta \\ W_i^n(3) &= W_i^\gamma - C_3^n(3) \times C_{1,i}^\gamma \ \ \forall n \in [1, N_w] \end{aligned} \quad (۴۱)$$

$$W_{i+1}^{n-GW} = \frac{W_i^n(1) + W_i^n(2) + W_i^n(3)}{3} \forall n \in [1, N_w] \quad (۴۲)$$

در الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته[۴۰] که برای حل مسئله در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌است، چند قدم برای پوشش دادن ضعف‌های الگوریتم گرگ خاکستری به آن اضافه شده است. این ضعف‌ها عبارتند از: رسیدن به پاسخ بهینه‌ی محلی با تکیه به سه جواب برتر، و تنوع پایین جمعیت در این الگوریتم. با افزودن مراحل جدید به الگوریتم، استراتژی جستجو بر اساس همسایگان هر گرگ جایگزین روش قبل می‌شود. معادله‌ی (۴۳)، با استفاده از فاصله‌ی بین موقعیت کنونی گرگ nام و موقعیت محاسبه شده در (۴۲)، شعاع را به دست می‌آورد. سپس معادله‌ی (۴۴) برای ساختن مجموعه‌ی همسایگان مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن، D^n فاصله‌ی بین گرگ‌های nام و mام می‌باشد. همچنین، بعد dام جواب در استراتژی جستجوی جدید در معادله‌ی (۴۵) محاسبه شده‌است. در این معادله از بعد dام از یک گرگ تصادفی در میان همسایگان $(W_i^{b,d})$ بعد dام از یک گرگ تصادفی در جمعیت $(W_i^{r,d})$ استفاده شده است.

در آخر معادله‌ی (۴۶) برای انتخاب بهترین پاسخ با مقایسه‌ی پاسخ استراتژی‌های مختلف استفاده شده است. مراحل الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته بصورت زیر ارائه شده است.

$$R_i^n = \left|\left|W_i^n - W_{i+1}^{n-GW}\right|\right| \quad (۴۳)$$

$$N_i^n = \{W_i^m | D^n(W_i^n, W_i^M) \le R_i^n, W_i^m \in pop\} \quad (۴۴)$$

$$W_{i+1}^{n-iGW,d} = W_i^{n,d} + rand \times (W_i^{b,d} - W_i^{r,d}) \quad (۴۵)$$

$$W_{i+1}^n = \begin{cases} W_{i+1}^{n-GW} & \text{if } f(W^{n-GW}) \le f(W^{n-iGW}) \\ W_{i+1}^{n-iGW} & \text{O.W} \end{cases} \quad (۴۶)$$

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

کارایی و کاربرد طرح پیشنهادی در این بخش نشان داده شده است. طرح ارائه شده بر روی یک سیستم تست بهبود یافته ارائه شده در [۲۶] انجام شده است. سیستم در نظر گرفته شده در [۲۶] یک شبکه مسیر ۳۳ باس IEEE اصلاح شده است. سیستم‌های گرما، آب و حمل‌ونقل عمومی و همچنین پارکینگ‌های خودرو برقی و سوئیچ‌های مانور به آن سیستم اضافه شده‌اند تا مدل کامل‌تری را در این رساله نشان دهند. شکل (۳) سیستم تست پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۴-۱- پارامترها و فرضیات

سیستم آزمایشی شامل یک پمپ حرارتی(HP) ، یک ESS سیستم ذخیره‌ساز انرژی (ESS)، دو میکروتوربین (MT)، یک پیل سوختی (FC)، چهار ایستگاه پارکینگ خودرو برقی (EV)، و یک راه‌آهن مترو که شامل چهار پست برق، یک وحد نمک زدایی، یک مبدل AC-DC و پنج سوئیچ مانور است. مشخصات MTها، FC، ESS و مبدل و همچنین داده‌های سیستم الکتریکی و قیمت بازار همان مقادیر فرض شده در [۲۶] است. شبکه‌های فرعی AC و DC به ترتیب دارای سطوح ولتاژ ۱۲,۶ کیلوولت و ۱ کیلو ولت هستند. لازم به ذکر است که منابع انرژی تجدیدپذیر، یعنی پنل‌های PV و WT ها به عنوان واحدهای غیر قابل توزیع مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای سادگی، مقاومت خط در زیرشبکه DC درنظر گرفته نشده است. داده‌های ایستگاه‌های پارکینگ EV، مترو، HPو سیستم حرارتی از [۲۷] گرفته شده است. همچنین تقریبا ۹۵ درصد انرژی حرارتی توسط واحد HP تامین می‌شود. در اینجا، دو نوع متنوع از کاربران EV مانند کاربر محلی و کاربر مسافر بررسی شده است. پارکینگ‌های کاربران محلی شب‌ها هنگام بازگشت به خانه‌های خود مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که کاربران مسافر در روزی که کاربران محلی رفته‌اند از پارکینگ استفاده می‌کنند. برای افزایش عمر باتری، فرض بر این است که حداکثر و حداقل حالت‌های شارژ خودروهای برقی پارک شده به ترتیب ۸۰٪ و ۲۰٪ در هنگام خروج EVها است [۲۸]. انرژی مورد نیاز برای سفر ۴۰ درصد از حداکثر حجم تعریف شده است، به این معنی که EV با حالت شارژ ۴۰ درصد وارد منطقه پارکینگ می‌شود. شکل (۴) حداقل نیازهای حالت شارژ و زمان استفاده (TOU) کاربران EV را نشان داده است. لازم به ذکر است که حالت شارژ خودروهای برقی مجاز به صفر نمی‌باشد و مقدار صفر حالت شارژ نشان داده شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که EV مربوطه در پارکینگ موجود نیست.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

جدول (۱): سناریوهای شبیه‌سازی شده.

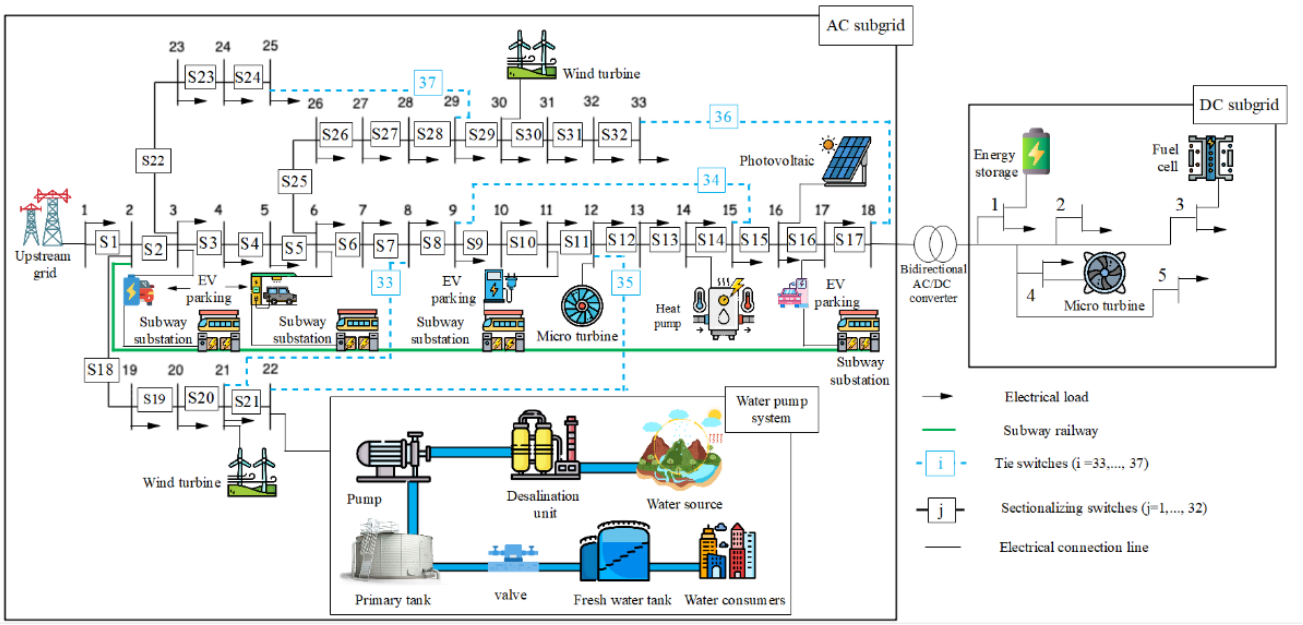
سناریو	فن‌آوری‌های تولید پراکنده ازجمله HP، EES، MT، FC، و غیره	انرژی ترمز احیاکننده	پیکربندی مجدد شبکه
سناریو-۱	✓	✓	✓
سناریو-۲	✓	✓	×
سناریو-۳	✓	×	✓

داده‌های واحدهای نمک زدایی، سیستم آب و تقاضای آن از [۲۹] مشتق شده است. فرض بر این است که یک واحد نمک‌زدایی با مصرف ۲٫۵ کیلووات برق ۱ لیتر آب شیرین تولید می‌کند. سه مورد در جدول (۱) برای نشان‌دادن اثربخشی طرح پیشنهادی طراحی شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، انواع مختلفی از فناوری ها مانند ESS، MT، FC، HP، و غیره و همچنین انرژی ترمز احیاکننده و پیکربندی مجدد شبکه در سناریو-۱ درنظر گرفته شده است. در سناریو-۲، انرژی ترمز احیاکننده و انواع مختلفی از فناوری‌ها در نظر گرفته شده است. اما در سناریو-۳ ، انرژی ترمز احیاکننده در نظر گرفته نشده است و تنها پیکربندی مجدد شبکه با انواع مختلف فناوری بررسی شده است. مشخصات سیستم تریل مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر این، جدول (۳) توان خروجی نرمال شده منابع انرژی توزیع شده و قیمت‌های بازار و مترو را به همراه AC-MG و ضریب بار حرارتی نشان می‌دهد.

جدول (۴) هزینه عملیات و هزینه تحمیل شده به اپراتور را به دلیل تلفات توان مربوط به هر مورد نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، کمترین هزینه عملیات مربوط به سناریو-۱ است. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی فناوری انرژی ترمز احیاکننده و پیکربندی مجدد شبکه در هزینه کل سیستم است. علاوه بر این، جدول (۴) نشان می‌دهد که کل تلفات توان سناریو-۲ بیشتر از سناریو-۱ است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هزینه تلفات توان سناریو-۱ در حدود ۶۰٫۱۸٪ در مقایسه با سناریو-۲ کاهش یافته است. این نشان‌دهنده تأثیر بالای پیکربندی مجدد شبکه بر اتلاف کل توان است.

جدول (۲): مشخصات سیستم مورد مطالعه.

نوع	حداقل توان (kW)	حد اکثر توان (kW)	هزینه ($/$kWh$)	راهاندازی/خاموشی ($)	موقعیت
MT_2	۰	۲۰۰۰	۰٫۶۷۵	۷۵	۱۲
WT_1	۰	۲۵۰	۱٫۰۷۳	۰	۳۰
WT_2	۰	۵۵۰	۱٫۰۷۳	۰	۲۱
PV	۰	۴۰۰	۲٫۵۸۴	۰	۱۶
HP	۰	۴۰۰	Market -price	۰	۱۴
FC	۰	۷۰۰	۰٫۳۹۴	۳۸٫۵	DC-MG
MT_1	۰	۳۵۰	۰٫۴۸	۶۸	DC-MG
دخیره ساز انرژی	-۳۵۰	۳۵۰	۰٫۳۱۸	۰	DC-MG
AC/DC کانورتر	-۱۵۰۰	۱۵۰۰	۰	۰	DC-MG

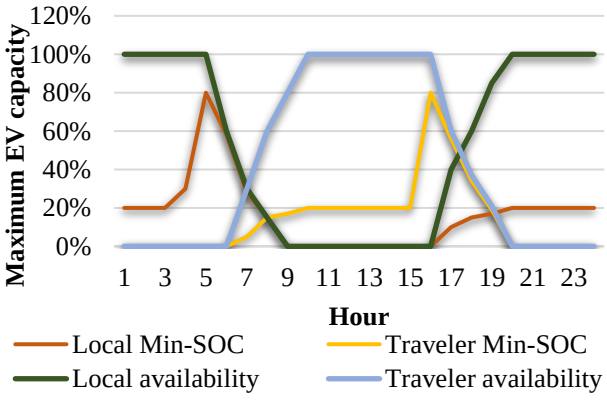


شکل (۳): سیستم مورد آزمایش [۲۶].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 1- Spring 2024

جدول (۳): توان خروجی نرمال‌شده منابع تولیدپراکنده، قیمت‌های بازار و مترو و ضریب بارAC-MG

ساعت	قیمت بازار ($/kWh)	قیمت مترو ($/kWh)	ضریب بار (AC MG)	WT (p.u)	PV (p.u)	تقاضای انرژی حرارتی (p.u)
۱	۰,۲۳	۰,۳۶	۰,۶	۰,۱۱۹	۰	۰,۲۲
۲	۰,۱۹	۰,۳۶	۰,۶۵	۰,۱۱۹	۰	۰,۱۳
۳	۰,۱۴	۰,۳۶	۰,۵۹	۰,۱۱۹	۰	۰,۱۴
۴	۰,۱۲	۰,۳۶	۰,۶۲	۰,۱۱۹	۰	۰,۱۴
۵	۰,۱۲	۰,۳۶	۰,۷	۰,۱۱۹	۰	۰,۱۵
۶	۰,۲	۳	۰,۶۹۸	۰,۰۶۱	۰	۰,۱۸
۷	۰,۲	۰,۳۶	۰,۷۱	۰,۱۱۹	۰	۰,۲۴
۸	۰,۲	۰,۳۶	۰,۷۹	۰,۰۸۷	۰,۰۸	۰,۴۵
۹	۱,۵	۲	۰,۸۶	۰,۱۱۹	۰,۱۵	۰,۶
۱۰	۴	۲	۰,۹	۰,۲۰۶	۰,۳۰۱	۰,۷
۱۱	۴	۳,۳	۰,۹۸	۰,۵۸۵	۰,۴۱۸	۰,۶
۱۲	۴	۳,۳	۱	۰,۶۹۴	۰,۴۷۸	۰,۵۲
۱۳	۱,۵	۳,۳	۰,۹۹	۰,۲۶۱	۰,۹۵۶	۰,۵۱
۱۴	۴	۳,۳	۱	۰,۱۵۸	۰,۸۴۲	۰,۴۹
۱۵	۲	۳,۳	۰,۹۷	۰,۱۱۹	۰,۳۱۵	۰,۴۸
۱۶	۱,۹۵	۳,۳	۰,۹۵۸	۰,۰۸۷	۰,۱۶۹	۰,۵
۱۷	۰,۶	۲	۰,۹۳۵	۰,۱۱۹	۰,۰۲۲	۰,۵۵
۱۸	۰,۴۱	۲	۰,۸۶	۰,۱۱۹	۰	۰,۵۸
۱۹	۰,۳۵	۲	۰,۸۸	۰,۸۶۸	۰	۰,۵۶
۲۰	۰,۶۳	۲	۰,۹۱	۰,۱۱۹	۰	۰,۵۳
۲۱	۱,۱۷	۲	۰,۹۲۷	۰,۸۶۸	۰	۰,۵۱
۲۲	۰,۶۴	۲	۰,۸۸۷	۰,۸۶۸	۰	۰,۵
۲۳	۰,۳	۲	۰,۷۸	۰,۰۶۱	۰	۰,۴۷
۲۴	۰,۲۶	۲	۰,۷	۰,۰۴۱	۰	۰,۳۸



شکل (۴): زمان استفاده کاربران وسایل نقلیه الکتریکی و حداقل وضعیت شارژ مورد نیاز.

علاوه بر این، جدول (۴) نقش حیاتی انرژی ترمز احیاکننده مترو را در کاهش هزینه کل سیستم به دلیل انتقال انرژی ترمز به مترو و ایستگاه-های پارک خودروهای برقی نشان می دهد. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، هزینه عملیات سناریو-۱ در مقایسه با سناریو-۳ حدود ۸,۰۰٪ کاهش یافته است. در ادامه به نتایج مطالعات سناریوها پرداخته شده است.

۴-۲- سناریو مطالعاتی ۱ و ۲

جدول (۵) توان خروجی بهینه MT ها، ESS، FC، HP، مبدل-AC DC، DU و همچنین انرژی ترمز انتقال یافته از مترو به ایستگاه‌های پارک خودروهای برقی، توان خریداری‌شده از شبکه بالادست، انرژی موجود ایستگاه‌های پارکینگEV، و حجم مخزن اولیه سناریو-۱ را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج پیکربندی مجدد شبکه در ستون دوم جدول (۵) ارائه شده است. ستون دوم سوئیچ‌هایی را نشان می‌دهد که در طول ساعت مشخص شده باز می‌شوند. با توجه به قیمت مفروض بازار، قیمت بازار برای ساعات غیر اوج بار، یعنی ساعات بین ۱ تا ۸، ساعات اوج مصرف، یعنی دوره ۹ تا ۱۶، و ساعات اواسط اوج مصرف، یعنی دوره ۱۷ تا ۲۴، پایین است. طبق جدول (۵)، بیشتر بارها از طریق شبکه بالادست

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 1- Spring 2024

در ساعات کم بار تغذیه می‌شوند. علاوه بر این، ESS در طول دوره کم مصرف برای کاهش هزینه عملیات شارژ می‌شود.

همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، تلاش‌هایی برای افزایش حجم مخزن آب اولیه در طول دوره کم پیک انجام شده است. خاطرنشان می‌شود که شبکه فرعی AC در ساعات کم مصرف برق به شبکه فرعی DC تزریق می‌شود تا با خرید برق ارزان از شبکه بالادست، باتری را شارژ کرده و بارهای موجود در زیرشبکه DC را تامین کند. به‌طور خلاصه، برای کاهش هزینه بهره برداری، تلاش شده است تا بارها توسط شبکه بالادست در ساعات کم بار تامین شود. علاوه بر این، نشان داده شده است که در ساعات اوج مصرف، زمانی که قیمت بازار بالا است، کل DERها نزدیک به حداکثر حجم تولید خود کار کرده‌اند تا از خرید برق پرهزینه از شبکه بالادستی جلوگیری شود. قابل توجه است که انرژی ترمز احیاکننده به قطارها در ساعاتی با قیمت بالا اتفاق می‌افتد تا هزینه انرژی مترو را کاهش دهد.

در [۲۶] که تحقیقات مشابهی است، قیمت در صورت بهینه‌سازی حدود ۶۲ درصد بهبود یافته است. در اینجا، قیمت در مقایسه با حالت پایه که در آن هیچ طرح زمان‌بندی بهینه استفاده نمی‌شود، حدود ۶۹ درصد بهبود یافته است. این نشان‌دهنده برتری طرح پیشنهادی هنگام ترکیب حمل و نقل هوشمند و پیکربندی مجدد شبکه است.

برای سناریو-۲، توان خروجی بهینه DERها، مبدلAC-DC، DU و انرژی ترمز احیاکننده مانند سناریو-۱ است. تنها تفاوت اینجا این است که هیچ یک از سوئیچ ها کار نمی‌کنند. از این رو، هیچ پیکربندی مجدد شبکه وجود ندارد که باعث تفاوت در هزینه تلفات برق طبق جدول (۴) شود.

جدول (۴): هزینه‌ها در سناریوهای آزمایشی.

سناریو	هزینه بهره‌برداری کل ($)	هزینه تلفات توان ($)
سناریو-۱	۶۰۰۴۲,۳۵	۳۰۵۴,۴۳
سناریو-۲	۶۴۳۹۵,۰۵	۷۶۷۰,۱۸
سناریو-۳	۶۴۹۸۲,۵۸	۲۹۱۱,۸۴

۴-۳- سناریو مطالعاتی ۳

جدول (۶) خروجی بهینه را برای سناریو-۳ نشان می‌دهد. در حالت سوم، جایی که انرژی ترمز احیاکننده از مترو به خودروهای برقی وجود ندارد، می‌توان دید که توان خریداری شده از شبکه بالادستی در دوره های کم پیک و اواسط پیک بالا است. علاوه‌براین، می‌توان مشاهده کرد که توان خریداری شده بیشتر از سناریوهای قبلی است. دلیل آن این است که انرژی ترمز احیاکننده‌ای که برای تامین خود سیستم مترو به همراه شارژ خودروهای برقی استفاده می‌شود، در این حالت در دسترس نیست، بنابراین نیروی مورد نیاز برای سیستم مترو و خودروهای برقی باید از شبکه بالادستی و DERها خریداری شود. این امر باعث شده است که کل هزینه عملیات سناریو-۳ بیشتر از موارد قبلی باشد. مشابه موارد قبلی، ESS در دوره های کم پیک و اواسط پیک زمانی که قیمت برق پایین است شارژ می‌شود و در ساعات اوج مصرف زمانی که قیمت برق بالا است تخلیه می‌شود. علاوه بر این، همه DERها در ساعات اوج مصرف نزدیک به حداکثر خود کار می‌کنند تا هزینه‌های عملیات را کاهش دهند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک ساختار بهینه‌سازی تصادفی برای بهینه‌سازی عملکرد یک شبکه هاب انرژی در نظر گرفته شده است. شبکه پیشنهادی شامل یک سیستم توزیع برق، یک سیستم انرژی حرارتی، یک سیستم آب، یک سیستم حمل و نقل خصوصی و یک سیستم حمل و نقل عمومی است که شامل اتصال بین وسیله نقلیه الکتریکی و سیستم مترو توسط یک باتری در ایستگاه مترو است، جایی که انرژی حاصل از ترمز احیاکننده مترو در باتری ذخیره می‌شود. این انرژی را می‌توان بین خودروهای برقی و مترو استفاده کرد. سیستم توزیع برق یک ریز شبکه AC-DC هیبریدی متصل به شبکه است که مجهز به مبدل AC-DC دو جهته است. فرض بر این است که انرژی ترمز احیاکننده مترو و انرژی ذخیره شده در خودروهای الکتریکی می‌تواند برای تامین نیازهای الکتریکی از طریق برنامه‌های خودرو به شبکه و خودرو به سیستم استفاده شود. روش بهینه سازی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی سیستم ذخیره‌ساز انرژی، واحدهای نمک‌زای، پمپ‌های حرارتی، پیل های سوختی، میکروتوربین ها، مبدل‌های AC-DC دو جهته، قدرت خرید از شبکه بالادستی و منابع انرژی توزیع‌شده به‌عنوان انتقال توان بین ایستگاه‌های پارکینگ خودرو برقی و مترو برای روز بعد طراحی شده است. همچنین یک سیستم پمپ حرارتی برای تامین انرژی حرارتی که از راندمان بالایی برخوردار است برای تامین انرژی حرارتی توسط سیستم گازی خریداری‌شده از شبکه درنظر گرفته شده است. در این مشکل یک سیستم تصفیه آب دریا به دلیل محدودیت احتمالی در مصرف آب در آینده درنظر گرفته شده است. طرح تبدیل unscented کاهش‌یافته برای ثبت عدم قطعیت قیمت انرژی استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری اصلاح شده برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شده است. مسئله پیشنهادی روی یک شبکه ۳۳ باسه IEEE اصلاح شده بررسی شده است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشاهده می شود، از طریق سه مطالعه موردی نشان‌داده شده است که انرژی ترمز احیاکننده همراه با پیکربندی مجدد سیستم می‌تواند هزینه عملیات مدل جامع شبکه هاب انرژی را کاهش دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

جدول (۵): برنامه‌ریزی بهینه سناریو-۱ و سناریو-۲.

اندازه تانک اولیه (لیتر)	SOC پارکینگ خودرو-۲ (kW)	SOC پارکینگ خودرو-۱ (kWh)	شبکه بالادست (kW)	مترو به پارکینگ EV (kW)	DU (kW)	کانورتر AC-DC (kW)	HP (kW)	FC (kW)	ESS (kW)	MT 2 (kW)	MT 1 (kW)	سوئیچ باز	ساعت
۱۳	۰	۱۴۶۹	۴۲۳۱	۰	۸۳	۳۵۹	۱۲۱	۰	-۳۴۵	۰	۰	۷،۸،۱۴،۱۷،۲۴	۱
۲۳	۰	۱۵۱۷	۲۷۱۲	۰	۸۱	۳۶۱	۶۹	۰	-۳۴۸	۰	۰	۷،۱۰،۱۳،۲۴۳۲	۲
۳۶	۰	۱۵۷۲	۲۵۱۸	۰	۷۶	۳۵۱	۸۱	۰	-۳۳۴	۰	۰	۷،۱۰،۱۲،۲۴۳۲	۳
۳۷	۰	۱۵۹۲	۱۵۹۲	۰	۶۱	۳۶۸	۸۰	۰	-۳۵۰	۰	۰	۶،۹،۱۳،۲۴،۳۱	۴
۵۸	۰	۱۶۸۲	۳۱۱۸	۰	۱۱۲	۳۶۷	۷۹	۰	-۳۳۹	۰	۰	۶،۹،۱۴،۲۴،۳۲	۵
۶۹	۰	۱۲۱۴	۳۵۱۲	۰	۱۲۱	۳۶۹	۱۰۲	۰	-۳۴۰	۰	۰	۶،۹،۱۲،۲۴،۳۲	۶
۸۲	۷۱۲	۶۷۳	۴۱۱۹	۱	۹۸	۲۹۰	۱۴۱	۱۰۲	-۳۵۰	۲۱	۵	۶،۱۰،۱۳،۲۴،۳۲	۷
۹۴	۱۲۹۷	۳۱۲	۴۹۳۶	۰	۱۱۷	۳۹۹	۲۶۷	۰	-۳۵۰	۰	۰	۷،۱۳،۲۱،۲۴،۳۲	۸
۹۴	۱۷۲۷	۰	۹۶۱	۰	۹۴	-۱۳۶۲	۳۴۱	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۳۵۰	۶،۸،۱۲،۱۷،۲۴	۹
۸۲	۱۸۴۹	۰	۵۱۲	۰	۴۰	-۱۴۷۸	۳۶۹	۷۰۰	۳۵۰	۱۹۹۳	۳۵۰	۶،۸،۱۴،۱۶،۲۴	۱۰
۶۴	۱۸۹۳	۱۵	۴۸۴	۸۷	۳۷	-۱۵۰۰	۳۴۲	۷۰۰	۳۴۰	۱۹۷۷	۳۳۹	۶،۸،۱۴،۱۵،۲۴	۱۱
۳۹	۱۸۹۷	۰	۴۷۲	۰	۴۱	-۱۵۰۰	۳۰۴	۶۸۷	۳۰۱	۱۷۵۴	۳۰۴	۷،۱۰،۱۴،۱۷،۲۴	۱۲
۱۸	۱۹۰۰	۰	۴۷۱	۹	۱۰۸	-۱۵۰۰	۲۶۵	۷۰۰	۳۳۲	۲۰۰۰	۳۱۲	۶،۱۰،۱۳،۱۷،۲۴	۱۳
۲	۱۸۲۱	۰	۵۸۴	۰	۸۶	-۱۵۰۰	۲۷۱	۶۸۸	۳۵۰	۲۰۰۰	۳۵۰	۷،۱۱،۱۴،۱۶،۲۴	۱۴
۱	۱۷۹۲	۷۳	۹۳۳	۵	۱۱۴	-۱۳۸۷	۲۴۹	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۳۵۰	۶،۸،۱۴،۱۷،۲۴	۱۵
۴	۱۷۲۱	۰	۹۶۹	۰	۸۲	-۱۴۲۱	۲۸۱	۷۰۰	۳۳۹	۲۰۰۰	۳۴۴	۶،۸،۱۲،۱۶،۲۴	۱۶
۲	۱۰۳۱	۸۲۳	۲۶۰۴	۲۵	۸۳	-۱۳۲۹	۳۰۴	۶۹۱	-۲۸۰	۷۰۵	۲۴۵	۶،۱۴،۲۱،۲۴،۳۰	۱۷
۵	۶۹۰	۱۲۴۶	۳۶۶۸	۰	۲۷	-۴۱۶	۳۲۱	۶۷۲	-۳۱۱	۵	۲۰	۷،۱۳،۱۹،۲۴،۳۰	۱۸
۸	۴۰۲	۱۸۳۲	۴۱۵۵	۳۴	۵۱	-۱۰۷	۲۹۸	۳۹۰	۳۵۰	۵۲	۰	۶،۹،۱۳،۲۴،۳۱	۱۹
۲۱	۰	۱۹۸۵	۲۱۹۰	۰	۴۹	-۱۳۳۱	۲۸۰	۶۴۰	۳۳۲	۷۶۸	۳۵۰	۶،۱۰،۱۴،۲۴،۳۰	۲۰
۱۸	۰	۱۹۱۲	۷۸۷	۰	۸	-۱۳۲۸	۲۹۹	۷۰۰	۲۹۹	۲۰۰۰	۳۵۰	۶،۸،۱۴،۱۶،۲۴	۲۱
۰	۰	۱۹۰۲	۱۹۳۶	۰	۵۳	-۱۱۰۴	۲۷۸	۷۰۰	۵	۹۱۱	۳۵۰	۶،۱۰،۱۴،۱۵،۲۴	۲۲
۰	۰	۱۹۳۵	۲۹۷۳	۴	۴۲	-۵۸	۲۳۱	۱۰۲	-۴۷	۰	۱۲	۶،۱۱،۱۴،۲۴،۳۱	۲۳
۰	۰	۱۸۸۴	۳۱۴۸	۰	۱۷	۴۰۲	۲۴۲	۰	-۳۵۰	۴۳	۰	۷،۱۰،۱۴،۲۴،۳۱	۲۴

جدول (۶): برنامه‌ریزی بهینه سناریو-۳.

اندازه تانک اولیه (لیتر)	SOC پارکینگ خودرو-۲ (kW)	SOC پارکینگ خودرو-۱ (kWh)	شبکه بالادست (kW)	مترو به پارکینگ EV (kW)	DU (kW)	کانورتر AC-DC (kW)	HP (kW)	FC (kW)	ESS (kW)	MT 2 (kW)	MT 1 (kW)	سوئیچ باز	ساعت
۴۴	۰	۸۳۳	۳۹۴۶	۰	۱۶۲	۳۶۹	۱۱۹	۰	-۳۵۰	۰	۰	۷،۱۰،۱۲،۲۴،۳۱	۱
۴۳	۰	۹۲۷	۲۶۳۱	۰	۵۲	۳۶۴	۷۶	۰	-۳۵۰	۰	۰	۶،۹،۱۲،۲۴،۳۲	۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

اندازه تانک اولیه (لیتر)	SOC پارکینگ خودرو-۲ (kW)	SOC پارکینگ خودرو-۱ (kWh)	شبکه بالادست (kW)	مترو به پارکینگ EV (kW)	DU (kW)	کانورتر AC-DC (kW)	HP (kW)	FC (kW)	ESS (kW)	MT 2 (kW)	MT 1 (kW)	سوئیچ باز	ساعت
۶۶	۰	۱۲۹۸	۲۹۵۱	۰	۹۹	۳۶۹	۷۸	۰	-۳۵۰	۰	۰	۷،۹،۱۲،۲۴،۳۲	۳
۵۳	۰	۱۶۷۱	۲۸۳۶	۰	۲۵	۳۷۰	۸۰	۰	-۳۳۸	۰	۰	۶،۱۱،۱۴،۲۴،۳۱	۴
۴۲	۰	۱۷۲۱	۳۰۶۳	۰	۹	۳۸۷	۸۰	۰	-۳۵۰	۰	۰	۶،۱۰،۱۴،۲۴،۳۱	۵
۵۵	۰	۱۲۷۵	۳۴۶۰	۰	۱۰۸	۳۸۹	۱۰۲	۰	-۳۵۰	۰	۰	۶،۹،۱۳،۲۴،۳۱	۶
۶۴	۲۴۱	۶۱۲	۳۹۱۸	۰	۱۴۲	۴۲۷	۱۵۲	۰	-۳۵۰	۰	۰	۶،۹،۱۳،۲۴،۳۰	۷
۶۹	۱۰۰۵	۴۰۳	۴۹۷۱	۰	۸۶	۴۲۸	۲۴۱	۰	-۳۲۸	۰	۰	۷،۱۱،۱۴،۲۴،۳۲	۸
۶۹	۱۱۳۹	۳۶	۱۰۲۶	۰	۷۵	-۱۳۱۲	۳۱۸	۶۹۱	۲۹۰	۱۸۵۳	۳۵۰	۶،۸،۱۳،۱۶،۲۴	۹
۴۶	۱۰۰۹	۰	۷۱۰	۰	۳۲	-۱۲۳۸	۳۹۴	۶۹۳	۳۵۰	۱۹۴۲	۱۰۲	۷،۸،۱۳،۱۶،۲۴	۱۰
۰	۹۲۷	۰	۵۳	۰	۱۱	-۱۵۰۰	۳۴۸	۶۷۲	۳۵۰	۱۹۱۸	۳۴۱	۶،۹،۱۴،۱۶،۲۴	۱۱
۰	۹۰۴	۰	۲۴۹	۰	۶۸	-۱۵۰۰	۳۰۴	۶۸۲	۲۲۷	۱۸۳۸	۳۵۰	۶،۸،۱۴،۱۶،۲۴	۱۲
۴۲	۱۱۲۷	۰	۵۹۳	۰	۲۱۶	-۱۵۰۰	۲۸۳	۷۰۰	۲۹۳	۲۰۰۰	۳۵۰	۶،۸،۱۳،۱۷،۲۴	۱۳
۸	۱۱۵۳	۰	۴۵۱	۰	۸۱	-۱۵۰۰	۲۶۸	۷۰۰	۳۴۱	۲۰۰۰	۳۳۱	۶،۱۰،۱۳،۱۶،۲۴	۱۴
۳۱	۱۱۹۵	۰	۷۷۳	۰	۱۴۹	-۱۴۶۷	۲۶۹	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۳۴۸	۶،۸،۱۳،۱۶،۲۴	۱۵
۳	۱۶۱۲	۰	۷۹۲	۰	۳۴	-۱۴۰۳	۲۹۱	۷۰۰	۳۴۹	۲۰۰۰	۳۵۰	۶،۱۰،۱۴،۱۶،۲۴	۱۶
۲۴	۱۰۲۴	۲۹۰	۲۱۴۸	۰	۱۴۹	-۱۳۲۵	۳۱۲	۷۰۰	۳۰۵	۸۱۴	۳۵۰	۶،۱۰،۱۳،۲۴،۳۰	۱۷
۴۹	۸۰۵	۷۴۲	۳۷۱۲	۰	۱۱۸	-۶۰۱	۳۱۴	۶۷۳	-۲۹۱	۱۲	۷۳	۶،۱۱،۱۳،۲۴،۳۰	۱۸
۳۸	۴۲۶	۱۰۴۷	۴۰۲۸	۰	۰	-۱۲۴	۳۱۱	۳۲۹	-۱۴۴	۰	۳۸	۶،۱۱،۱۴،۳۰،۲۴	۱۹
۶۴	۰	۱۱۷۴	۱۶۰۸	۰	۱۳۸	-۱۳۶۷	۳۰۲	۷۰۰	۳۵۰	۱۱۲۸	۳۰۲	۷،۱۳،۹،۱۵،۲۴	۲۰
۵۲	۰	۹۸۴	۴۹۸	۰	۳	-۱۴۷۲	۲۶۸	۷۰۰	۳۵۰	۱۹۸۹	۳۵۰	۶،۸،۱۴،۱۷،۲۴	۲۱
۳۸	۰	۱۰۶۸	۱۳۲۲	۰	۵۱	-۱۰۹۸	۲۷۲	۷۰۰	۱۰۶	۱۳۳۲	۳۵۰	۶،۱۰،۱۴،۱۷،۲۴	۲۲
۳۱	۰	۱۰۷۲	۳۲۶۳	۰	۱۹	-۳۲۵	۲۶۴	۵۹	-۳۲۴	۰	۰	۶،۱۱،۱۴،۲۴،۳۱	۲۳
۲۴	۰	۱۰۶۴	۲۹۴۶	۰	۰	۳۷۲	۲۳۵	۰	-۳۰۶	۱۹	۰	۷،۱۱،۱۳،۲۴،۳۱	۲۴

ضمایم

متغیرها و ثابت ها	
تعداد منابع انرژی توزیع‌شده	N
تعداد منابع انرژی توزیع‌شده در بخش AC	N^{AC}
تعداد منابع انرژی توزیع‌شده در بخش DC	N^{DC}
تعداد خودروهای برقی تکی موجود در یک پارکینگ	N^{EV}
تعداد باس‌ها در بخش AC	K^{AC}
تعداد باس‌ها در بخش DC	K^{DC}
تعداد گام‌های زمانی در روز	T

تعداد گره‌ها در شبکه انرژی حرارتی	H
توان بار بر حسب کیلووات	P^{L}
تقاضای گرما برحسب کیلووات	P^{Heat}
تقاضای آب به لیتر	W^{demand}
فاز امپدانس خط	θ
اندازه ظرفیت خط	Y
راندمان شارژ برای EES و پارکینگ‌های EV	$\eta^{C,ESS/EV}$
راندمان تخلیه برای EES و پارکینگ‌های EV	$\eta^{D,ESS/EV}$
حداقل سطح SOC یک خودرو برقی	$S^{Ind,min}$
ظرفیت باتری یکEV بر حسب کیلووات ساعت	BC

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$P^{Metro\ Act}$	مقدار واقعی توان مصرفی مترو بر حسب کیلووات
CF^{DU}	ضریب انرژی مصرفی واحد نمک‌زدایی (DU) بر حسب کیلووات بر لیتر
λ	تعرفه خرید/فروش DER به دلار/کیلووات
λ^{G}	تعرفه خرید/فروش شبکه بالادستی به دلار/کیلووات
λ^{ON}	هزینه راه‌اندازی
λ^{OFF}	هزینه خاموشی
λ^{Heat}	تعرفه خرید انرژی حرارتی از شبکه به دلار/کیلووات
λ^{Water}	تعرفه خرید سیستم آب به دلار/لیتر
λ_{deg}^{EV}	هزینه تخریب باتری‌هایEV
Δt	مدت زمان هر پله زمانی

شاخص‌ها و مجموعه‌ها	
DER	مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع‌شده
DER^{AC}	مجموعه ای از منابع انرژی توزیع‌شده در بخش AC شبکه
DER^{DC}	مجموعه ای از منابع انرژی توزیع شده در بخش DC شبکه
t	مرحله زمانی
i	شاخص منابع انرژی توزیع‌شده
u	شاخص باینری منابع انرژی توزیع‌شده
P	توان خرید/فروش از/به DER به کیلووات
P^{G}	توان خرید/فروش از/به شبکه اصلی بر حسب کیلووات
P^{C}	توانی که توسط مبدل دوطرفه بر حسب کیلووات منتقل می‌شود
$P^{loss,AC}$	تلفات توان در ریزشبکه AC به کیلووات
$P^{loss,DC}$	تلفات توان در ریزشبکه DC بر حسب کیلووات
$P_t^{ing,AC}$	توان اکتیو تزریقی در ریزشبکه AC بر حسب کیلووات
$Q_t^{ing,AC}$	توان راکتیو تزریقی در ریزشبکه AC بر حسب کیلووات
P^{Line}	توان انتقالی از طریق خط به کیلووات
$P^{Metro-EV}$	انتقال توان از مترو به پارکینگ EV
$P^{EV-Metro}$	انتقال توان از پارکینگEV به مترو
P^{Termal}	گرمای خریداری‌شده از سیستم انرژی حرارتی بر حسب کیلووات
$S^{ESS/EV}$	انرژی ذخیره‌شده در یک EES یا پارکینگ EV به کیلووات ساعت
$S^{EV,Arr}$	انرژی ذخیره‌شده در خودروهای برقی در زمان رسیدن
$S^{EV,Dep}$	انرژی ذخیره‌شده در خودروهای برقی در زمان حرکت
U^{PT}	حجم مخزن اولیه بر حسب متر مربع
U^{FWT}	حجم مخزن آب شیرین بر حسب متر مربع

$W^{DU,in}$	آب ورودی DU برحسب لیتر
$W^{DU,out}$	آب خروجی DU برحسب لیتر
W^{G}	آب خریداری‌شده از شبکه آب به لیتر
V	اندازه ولتاژ
δ	فاز ولتاژ
$B^{C,ESS/EV}$	نشانگر باینری شارژ برای ESS یا پارکینگ-های EV
$B^{D,ESS/EV}$	نشانگر باینری تخلیه برای ESS یا پارکینگ-های EV
$B^{Metro-EV/EV-Metro}$	نشانگر باینری برای تعامل بین پارکینگ مترو-EV/ پارکینگ-مترو
P^{Bra}	مقدار توان ترمزی که به سیستم مترو پشتیبان می‌شود بر حسب کیلووات
min, max	حداقل و حداکثر
j	شاخص DERها با نوع i
k	شاخص باس‌ها
v	شاخص خودروهای برقی فردی
h	شاخص گره‌ها در شبکه انرژی حرارتی

مراجع

[1] Byko v D, Efimov D. Power Flow Optimization Problems for Multi-Energy Systems. InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 289, p. 03001). EDP Sciences.

[2] Eladl AA, El-Afifi MI, El-Saadawi MM, Sedhom BE. Distributed optimal dispatch of smart multi-agent energy hubs based on consensus algorithm considering lossy communication network and uncertainty. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2023 Sep 8.

[3] Shahrabi E, Hakimi SM, Hasankhani A, Derakhshan G, Abdi B. Developing optimal energy management of energy hub in the presence of stochastic renewable energy resources. Sustainable Energy, Grids and Networks. 2021 Jun 1;26:100428.

[4] M. La Scala, A. Vaccaro, A.F. Zobaa, "A goal programming methodology for multi-objective optimization of distributed energy hubs operation," Applied Thermal Engineering, vol. 71, pp. 658-666, 10/22/ 2014.

[5] Elmogy MM, Sedhom BE, Eladl AA. Medium-Term Optimal Operation of Energy Hub in the Presence of an Energy Storage System Under Uncertainty of Electricity Price and Wind Speed. In2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON) 2023 Dec 19 (pp. 1-7). IEEE.

[6] Ahmadi SE, Sadeghi D, Marzband M, Abusorrah A, Sedraoui K. Decentralized bi-level stochastic optimization approach for multi-agent multi-energy networked micro-grids with multi-energy storage technologies. Energy. 2022 Apr 15;245:123223.

[7] Jadidbonab M, Mohammadi-Ivatloo B, Marzband M, Siano P. Short-term self-scheduling of virtual

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

energy hub plant within thermal energy market. IEEE Transactions on industrial electronics. 2020 Mar 11;68(4):3124-36.
[8] Lu Q, Lü S, Leng Y, Zhang Z. Optimal household energy management based on smart residential energy hub considering uncertain behaviors. Energy. 2020 Mar 15;195:117052.
[9] Huang Y, Xu J, Gao S, Lee KY, Wang D, Wang B. Incomplete information oriented optimal scheduling of multi-energy hub systems with thermal energy storage. Journal of Energy Storage. 2021 Oct 1;42:103062.
[10] Hou W, Liu Z, Ma L, Wang L. A real-time rolling horizon chance constrained optimization model for energy hub scheduling. Sustainable Cities and Society. 2020 Nov 1;62:102417.
[11] Sulaiman MH, Mustaffa Z, Rashid MI. An application of teaching–learning-based optimization for solving the optimal power flow problem with stochastic wind and solar power generators. Results in Control and Optimization. 2023 Mar 1;10:100187.
[12] Jin L, Kazemi M, Comodi G, Papadimitriou C. Assessing battery degradation as a key performance indicator for multi-objective optimization of multi-carrier energy systems. Applied Energy. 2024 May 1;361:122925.
[13] Nasiri T, Moeini-Aghtaie M, Foroughi M, Azimi M. Energy optimization of multi-carrier energy systems to achieve a low carbon community. Journal of Cleaner Production. 2023 Mar 1;390:136154.
[14] Li X, Gui D, Zhao Z, Li X, Wu X, Hua Y, Guo P, Zhong H. Operation optimization of electrical-heating integrated energy system based on concentrating solar power plant hybridized with combined heat and power plant. Journal of Cleaner Production. 2021 Mar 20;289:125712.
[15] Dehghani M, Mardaneh M, Malik OP, Guerrero JM, Sotelo C, Sotelo D, Nazari-Heris M, Al-Haddad K, Ramirez-Mendoza RA. Genetic algorithm for energy commitment in a power system supplied by multiple energy carriers. Sustainability. 2020 Dec 2;12(23):10053.
[16] Güvenç U, Battal O. Coyote optimization algorithm to solve energy hub economic dispatch problem. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi. 2020;12(1):20-6.
[17] Shahrabi E, Hakimi SM, Hasankhani A, Derakhshan G, Abdi B. Developing optimal energy management of energy hub in the presence of stochastic renewable energy resources. Sustainable Energy, Grids and Networks. 2021 Jun 1;26:100428.
[18] Yang C, Wu Z, Li X, Fars A. Risk-constrained stochastic scheduling for energy hub: Integrating renewables, demand response, and electric vehicles. Energy. 2024 Feb 1;288:129680.
[19] Shojaeiyan S, Niknam T, Nafar M. Secure Energy Management in Hybrid Microgrids Based on Blockchain Technology. تحقیقات نوین در سیستمهای قدرت هوشمند ۲۰۲٤; ۱۲ (٤) :٤٧-۳۷
[20] Khodadadi M, Lashkar Ara A. Economic Dispatch in Power Systems Using Search and Rescue Optimization Algorithm. تحقیقات نوین در سیستمهای قدرت هوشمند ۲۰۲۳; ۱۲ (۳) :۱٤-۱
[21] Gupta S, Maulik A, Das D, Singh A. Coordinated stochastic optimal energy management of grid-connected microgrids considering demand response, plug-in hybrid electric vehicles, and smart transformers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022 Mar 1;155:111861.
[22] Manousakis NM, Karagiannopoulos PS, Tsekouras GJ, Kanellos FD. Integration of renewable energy and electric vehicles in power systems: a review. Processes. 2023 May 18;11(5):1544.
[23] Peres W. A probabilistic load flow for unbalanced three-phase islanded microgrids using Unscented Transformation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2024 Jan 1;155:109554.
[24] Gupta S, Maulik A, Das D, Singh A. Coordinated stochastic optimal energy management of grid-connected microgrids considering demand response, plug-in hybrid electric vehicles, and smart transformers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022 Mar 1;155:111861.
[25] Shalaby M, Cossette CC, Le Ny J, Forbes JR. Cascaded filtering using the sigma point transformation. IEEE Robotics and Automation Letters. 2021 Mar 24;6(3):4758-65.
[26] Shokri M, Niknam T, Mohammadi M, Dehghani M, Siano P, Ouahada K, Sarvarizade- Kouhpaye M. A novel stochastic framework for optimal scheduling of smart cities as an energy hub. IET Generation, Transmission & Distribution. 2024 Jul;18(14):2421-34.
[27] Sheikh M, Aghaei J, Chabok H, Roustaei M, Niknam T, Kavousi-Fard A, Shafie-Khah M, Catalão JP. Synergies between transportation systems, energy hub and the grid in smart cities. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021 Apr 2;23(7):7371-85.
[28] Koroma MS, Costa D, Philippot M, Cardellini G, Hosen MS, Coosemans T, Messagie M. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. Science of the Total Environment. 2022 Jul 20;831:154859.
[29] Roustaei M, Niknam T, Aghaei J, Sheikh M, Chabok H, Kavousi-Fard A, Vahidinasab V, Guerrero JM. Enhancing smart city operation management: Integrating energy systems with a subway synergism hub. Sustainable Cities and Society. 2024 Jul 15;107:105446.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

رزومه



محمد جعفر نافه فشـــان متولد ۱۳۵۳ در شیراز می باشد. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشـــناســـی مهندســـی برق-الکترونیک از دانشـــگاه شـــیراز (۱۳۷۸) ، کار شنا سی ار شد مهند سی برق-قدرت از دانشـــگاه آزاد اســـلامی واحد مرودشـــت (۱۳۹۷) و در حال حا ضر دان شجوی دکتری مهند سی برق-قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می باشد. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ای شان در زمینه مدیریت انرژی، ریز شبکه، تولیدات پراکنده، برنامه ریزی و بهره برداری از سیستمهای قدرت است.



بهمن بهمنی فیروزی متولـد ســـــال ۱۳۵۴در شهرستان مرودشت می باشد ، مدارک کار شنا سی، کار شنا سی ار شد و دکتری خود را در ر شته مهند سی برق-قدرت به ترتیب از دانشگاه شیراز(۱۳۷۸) ، دان شگاه صنعتی شریف(۱۳۸۱) و دان شگاه شیراز (۱۳۹۳) اخذ کرده اســت. تخصــص ایشــان مدیریت انرژی، ریزشــبکه، تولیدات پراکنده، برنامه ریزی ســیســتم قدرت، برنامه های کاربردی هوش محاسباتی و حفاظت از سیستم قدرت است. ایشان در حال حاضر استادیارگروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحدمرودشت می باشد.



مـهدی نفر متو لد ۱۳۵۸در شـــهرســـتان مرودشـــت می باشـــد ، مدارک کارشـــناســـی، کارشـــناســـی ارشـــد و دکتری خود در رشـــته مهند سی برق-قدرت را به ترتیب از دان شگاه صنعت آب و برق (۱۳۸۱) ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر(۱۳۸۳) و دانشـــاگاه آزاد اســـلامی واحد علوم و تحقیقات تهران(۱۳۹۰) اخذ کرده اســـت. تاکنون بیش از۱۰۰مقاله در مجله ها و کنفرانس های معتبر علمی از ایشان چاپ شده است. تخصص ایشـــان مدیریت انرژی، ریزشـــبکه، تولیدات پراکنده، برنامه ریزی و بهره برداری ، ترانســـفورماتورها ، فشـــارقوی و بهینه ســـازی در سیستمهای قدرت ا ست. ایشان در حال حا ضر ا ستادیارگروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Combined Heat and Power (CHP)
[2] Heat and electricity energies
[3] Gas energy
[4] Power system losses
[5] Electricity production plants
[6] Renewable energy sources
[7] Electric vehicles
[8] Energy storage (ES)
[9] Demand response program (DRP)
[10] Energy hub (EH)
[11] Virtual power plant (VPP)
[12] Electric vehicles (EVs)
[13] Renewable energy sources (RESs)
[14] Energy management
[15] Active loads
[16] Micro-grid
[17] Uncertainties
[18] Load
[19] Energy price
[20] Stochastic model
[21] Probablistic model
[22] Robust model
[23] Optimal power flow (OPF)
[24] Multi-carrier energy (MCE) systems
[25] Energy network operators (ENOs)
[26] Multi-carrier optimal power flow
[27] Probabilistic model
[28] Genetic algorithm (GA)
[29] Traditional evolutionary algorithm
[30] Distributed energy hub (DEH)
[31] Karush-Kuhn-Tucker (KKT) method
[32] Information gap decision theory (IGDT)
[33] Renewable-Based Residential Energy Hubs
[34] Chance-Constrained Optimization
[35] Economic dispatch
[36] Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm
[37] Compressed air energy storage (CAES)
[38] Demand response program (DRP)
[39] Encircling
[40] Improved Grey Wolf (iGW)

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 1- Spring 2024
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Research Article

Improved Gray Wolf Optimizer Based Optimized Scheduling of Energy Hub with Renewable Energy Resources and Metro

Mohammad Jafar Nafehfeshan[1], Bahman Bahmani-Firouzi[* 2], Mehdi Nafar[3]

1- PhD student, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

*2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Abstract: In this article, the optimal participation of energy hubs (EHs) connected to the grid in the day-to-day and real-time energy markets is presented. The proposed system consists of an electricity distribution network, a private transportation system, and a public transportation system, a water system, a thermal energy system. In addition, reconfiguration, and metro regenerative braking energy have been investigated. The proposed power distribution system is an on-grid hybrid microgrid. Improved gray wolf optimization algorithm for finding the best solution for scheduling the proposed system. Also, the reduced unscented transform scheme is applied to capture the uncertainty in the system. We demonstrate the effectiveness of the proposed method using a 33-bus IEEE test system in Matlab software package. Reductions in costs and pollution of the environment are demonstrated by the results. This study has demonstrated the completeness of the proposed smart network and the efficiency of the desired system by comparing it with the results of other studies and similar systems.

Keywords: Day-ahead and real-time energy market, energy management system, energy hub connected to the grid, improved gray wolf algorithm.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]