Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 16, No. 4, 2026
pp. 99-130
Research Paper

Distributed Energy Management in Networked Microgrids with Self-Healing Capability Based on Robust Adaptive Shuffled Complex Evolution Algorithm

Peyman Bayat [1], Pezhman Bayat [2]

[1] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

Abstract:

Today, networked microgrids (NMGs) have emerged as a key solution for enhancing the flexibility, reliability, and stability of distribution networks. However, optimal energy management in these decentralized structures faces fundamental challenges due to variable renewable generation, unforeseen faults, and multiple actors with occasionally conflicting objectives. This research presents a distributed, multi-agent framework for optimal control of NMG networks. The core of this framework is an integrated mathematical model that combines normal operation and the post-fault self-healing state within a multi-variable objective function featuring dynamic weighting coefficients. To solve this complex optimization problem, a novel robust adaptive shuffled complex evolution (RA-SCE) algorithm is proposed. The key innovations of this algorithm include an adaptive multi-strategy architecture for intelligent operator selection, a dynamic knowledge transfer network for inter-complex learning, a health monitoring mechanism to detect and mitigate premature convergence, and a dynamic weighted allocation of computational resources based on complex performance. By fostering a collaborative structure, these mechanisms establish an optimal balance between solution accuracy and computational efficiency, ensuring fast and reliable convergence through an intelligent hybrid stopping criterion. Simulation results on a modified test network demonstrate that the proposed framework, compared to conventional methods, yields significant improvements in reliability indices and voltage profiles, particularly under fault conditions. In summary, the provided solution offers a self-tuning and efficient framework for comprehensive interactive management among independent microgrids, thereby enhancing system resilience against disturbances.

Keywords: Optimization, Robust Adaptive Shuffled Complex Evolution (RA-SCE), Networked Microgrids (NMG), Distributed Energy Resources, Multi-Agent Systems.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

https://doi.org/10.22108/isee.2026.147802.1777

مقاله پژوهشی

مدیریت انرژی توزیع‌شده در ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته با قابلیت خودترمیمی مبتنی بر الگوریتم تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شدهٔ تطبیقی مقاوم

پیمان بیات [۱*]، پژمان بیات [۲]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران
peyman.bayat@hut.ac.ir
۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران
pezhman.bayat@hut.ac.ir

چکیده: امروزه ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته (NMG) به عنوان راهکاری کلیدی برای ارتقای انعطاف‌پذیری، قابلیت اطمینان و پایداری شبکه‌های توزیع مطرح شده‌اند. با این حال، مدیریت بهینهٔ انرژی در این ساختارهای غیرمتمرکز به دلیل ماهیت متغیر تولید تجدیدپذیر، رخداد خطاهای پیش‌بینی‌نشده و تعدد بازیگران با اهداف گاه متضاد، با چالش‌های اساسی مواجه است. این پژوهش یک چارچوب توزیع‌شده مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی برای کنترل بهینهٔ شبکه‌های NMG ارائه می‌دهد. هستهٔ اصلی این چارچوب یک مدل ریاضی یکپارچه است که عملکرد عادی و حالت خودترمیمی پس از خطا را در قالب یک تابع هدف چندمتغیره با ضرایب وزنی پویا ترکیب می‌کند. برای حل این مسئلهٔ بهینه‌سازی پیچیده، الگوریتم نوین تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شدهٔ تطبیقی مقاوم (RA-SCE) پیشنهاد شده است. نوآوری‌های کلیدی این الگوریتم شامل معماری چندراهبردی تطبیقی برای انتخاب هوشمند عملگرها، شبکهٔ انتقال دانش پویا برای یادگیری بین‌مجتمعی، مکانیسم نظارت سلامت برای تشخیص و برطرف‌کردن همگرایی زودرس، و تقسیم‌بندی وزنی پویای منابع محاسباتی بر اساس عملکرد مجتمع‌هاست. این مکانیسم‌ها با ایجاد یک ساختار همکارانه، تعادلی بهینه میان دقت جواب و کارایی محاسباتی برقرار و از طریق یک معیار توقف ترکیبی هوشمند، همگرایی سریع و مطمئن را تضمین می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکهٔ آزمون اصلاح‌شده نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم، بهبودی قابل ملاحظه در شاخص‌های قابلیت اطمینان و پروفایل ولتاژ، به ویژه در شرایط خطا، ایجاد می‌کند. در مجموع، راه‌حل ارائه‌شده چارچوبی خودتنظیم و کارآمد برای مدیریت تعاملی جامع میان ریزشبکه‌های مستقل فراهم می‌آورد و تاب‌آوری سیستم را در برابر اختلالات افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شدهٔ تطبیقی مقاوم (RA-SCE)، ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته (NMG)، منابع انرژی پراکنده، سیستم‌های چندعاملی.

۱- مقدمه

۱-۱- اهداف پژوهش

در پاسخ به چالش‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی و نیاز فوری به کاهش انتشار کربن، تلاش‌هایی بالقوه برای اتخاذ راه‌حل‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست در بخش انرژی صورت گرفته است. مفهوم ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته (NMGs)[۱] به عنوان یک راه‌حل عملی برای سیستم‌های انرژی مطرح شده است که ماهیت فوری این مسئله را مورد توجه قرار می‌دهد [۱]. در حالی که ریزشبکه‌های سنتی معمولاً به صورت منزوی و با تعامل حداقلی با سایر ریزشبکه‌ها و شبکهٔ اصلی بهره‌برداری می‌شوند، NMGها استفادهٔ مشترک از منابع انرژی تجدیدپذیر (RESs)[۲] و تجارت محلی انرژی را تسهیل می‌کنند. این ویژگی منحصربه‌فرد به یک شبکهٔ مبتنی بر

[۱] تاریخ ارسال مقاله : ۱٤۰٤/۰۹/۲٦
تاریخ پذیرش مقاله : ۱٤۰۵/۰۷/۰۸
نام نویسنده مسئول : پیمان بیات

نشانی نویسنده مسئول : ایران، همدان، دانشگاه صنعتی همدان، گروه مهندسی برق

NMG این امکان را می‌دهد تا انعطاف‌پذیری سیستم را بهبود بخشد، هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و به میزانی قابل ملاحظه انتشار کربن را قطع کند. در سال‌های اخیر، امکان اشتراک‌گذاری محلی توان الکتریکی بین ریزشبکه‌ها به واقعیت تبدیل شده است که شیوه‌های مدیریت انرژی را متحول کرده است [۲]. این رویکرد به هر ریزشبکه اجازه می‌دهد تا در تجارت محلی انرژی مشارکت و توان الکتریکی را درون شبکه‌های به‌هم‌پیوستهٔ خود خریدوفروش کند. مدیریت انرژی در ساختار شبکه‌های مبتنی بر NMGs در ادبیات اخیر توجهی قابل ملاحظه را به خود جلب کرده است که طیفی از چالش‌های بهینه‌سازی، کنترل و روش‌های یادگیری را مورد توجه قرار می‌دهد [۳]. پژوهش حاضر با معرفی یک سیستم مدیریت انرژی بهینه، گامی مؤثر در راستای بهبود بهره‌برداری از شبکه‌های مبتنی بر NMG برمی‌دارد و چارچوبی یکپارچه برای پاسخ‌گویی به نیازهای متنوع انرژی این سیستم‌ها ارائه می‌دهد. در ادامه، به منظور تبیین دانش در زمینهٔ پژوهش حاضر، پژوهش‌های مرتبط و مزایا و کمبودهای موجود در هر یک بررسی شده است.

۱-۲- مروری بر ادبیات پیشین

هدف از نگارش این بخش ارائهٔ مروری ساختاریافته بر برخی از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهشی اخیر در حوزهٔ پژوهش حاضر و نیز تحلیل نقاط قوت و ضعف آنها با تأکید ویژه بر چالش‌های کلیدی سیستم است. این بررسی به دو حوزهٔ اصلی اختصاص دارد: ۱) سیستم‌های مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته و ۲) فناوری‌ها و راهکارهای خودترمیمی[۳] در شبکه‌های توزیع. این ساختار دوگانه مسیر را برای شناسایی شکاف‌های پژوهشی و ارائهٔ راهکار نوین در ادامهٔ مقاله هموار می‌کند.

۱-۲-۱- مدیریت انرژی در NMGها

در حوزهٔ مدیریت انرژی سیستم‌های چندبخشی، پژوهشگران در مرجع [٤] یک تحلیل گسترده از سیستم‌های مدیریت انرژی را برای ریزشبکه‌ها انجام دادند که عموماً شامل خودروهای برقی و ذخیره‌سازهای انرژی توزیع‌شده است. هدف اصلی این ریزشبکه‌ها تأمین انرژی پایدار، مقرون‌به‌صرفه و قابل اطمینان بیان شده است. این مرور جنبه‌هایی متعدد از مدیریت ریزشبکه از جمله پایداری انرژی، تاکتیک‌های پاسخ‌گویی بار، سیستم‌های کنترل و تکنیک‌های بهینه‌سازی متعدد استفاده‌شده برای بهبود عملیات ریزشبکه را تحلیل کرده است.

همچنین، ژونگ و همکاران در [۵] یک تکنیک مدیریت انرژی بهینه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی یک شبکه گسترده که مبتنی بر چند عدد ریزشبکه است را با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی پیشنهاد کردند. هدف اصلی کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار کربن از طریق درنظرگیری ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی بیان و در یک رویکرد دومرحله‌ای، شامل (۱) روز-پیش[٤] و (۲) میان‌روز[٥]، گنجانده شده است. رویکرد پیشنهادی در مواجهه با عدم قطعیت مرتبط با RESها و تقاضا موفق بوده است؛ با این حال، از عدم قطعیت‌های ناشی از خطا و مسائل مربوط به بهره‌برداری از شبکه مانند پایداری ولتاژ صرف‌نظر شده است.

جانی و همکاران در [٦] یک سیستم مدیریت انرژی چندمقیاس زمانی برای یک NMG معرفی کردند که بر برنامه‌ریزی هر دو زمان روز-پیش و بلادرنگ متمرکز است. این سیستم شامل دو فاز است: در فاز اول، از یک مدل تصادفی دولایه برای کاهش هزینه‌های عملیاتی در بازار روز-پیش استفاده شده است، در حالی که فاز بعدی برنامهٔ اولیه را به صورت بلادرنگ به‌روزرسانی می‌کند تا تغییرپذیری در انرژی تجدیدپذیر را مورد توجه قرار دهد و هزینهٔ ناشی از عدم تعادل و مدیریت تولید در محل را به حداقل برساند.

مقالهٔ [۷] با ارائهٔ یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات اصلاح‌شده برای ریزشبکه‌ها، توانسته است توازنی مناسب بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند. این پژوهش با معرفی یک مکانیسم به‌روزرسانی پویا برای پارامترهای الگوریتم، نرخ همگرایی را به طرزی محسوس بهبود بخشیده است. روش پیشنهادی با درنظرگیری قیود تبادل توان بین ریزشبکه‌ها و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر، راهکاری جامع برای هماهنگی بهینهٔ سیستم ارائه داده است. معماری کنترل سلسله‌مراتبی پیشنهادی در این پژوهش، امکان بهره‌برداری مستقل از هر ریزشبکه را در عین هماهنگی با کل سیستم فراهم می‌کند. با وجود این، مدل‌سازی

ناکافی عدم قطعیت‌های ناشی از خطاهای ارتباطی بین ریزشبکه‌ها از محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شود.

مقالهٔ [۸] با توسعهٔ یک الگوریتم ژنتیک چندهدفهٔ پیشرفته برای NMGها، گامی مؤثر در راستای یکپارچه‌سازی اهداف متعارض برداشته است. این پژوهش با طراحی مکانیسم انتخاب هوشمند و ساختار کدگذاری کارآمد، توانسته است تنوع جمعیت را در فرایند بهینه‌سازی حفظ کند. هرچند زمان همگرایی طولانی و عدم مدیریت بهینهٔ تعارضات در شرایط اضطراری از چالش‌های اساسی این روش به شمار می‌روند.

مقالهٔ [۹] با ارائهٔ یک چارچوب بهینه‌سازی مقاوم مبتنی بر سناریو برای شبکه‌های مبتنی بر NMG، سهمی ارزشمند در مدیریت عدم قطعیت‌های سیستم ایفا کرده است. این پژوهش با طراحی مکانیسم تخصیص منابع انعطاف‌پذیر و در نظرگیری تغییرات تولید منابع تجدیدپذیر، توانسته است قابلیت اطمینان سیستم را به طرزی معنادار بهبود بخشد. روش پیشنهادی با درنظرگیری هم‌زمان عدم قطعیت در تولید، مصرف و قیمت انرژی، راهکاری جامع برای مدیریت ریسک ارائه داده است. با این حال، این پژوهش در پوشش سناریوهای ترکیبی خطا محدودیت داشته و نتوانسته است سناریوهای خودترمیمی را به طور کامل پوشش دهد.

پژوهشگران در [۱۰] با توسعهٔ یک الگوریتم بهینه‌سازی اتفاقی چندمرحله‌ای برای NMGها، رویکردی واقع‌بینانه برای مدیریت عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. این پژوهش با توسعهٔ روش‌های نمونه‌برداری کارآمد و الگوریتم‌های کاهش واریانس، توانسته است دقت محاسبات را افزایش دهد. با وجود این، پیچیدگی محاسباتی این روش برای سیستم‌های با ابعاد بزرگ چالش‌برانگیز است.

فنگ و همکاران در [۱۱] بهینه‌سازی بهره‌برداری در یک شبکهٔ NMG را با در نظرگیری چندانرژی توزیع‌شده پیشنهاد داده و یک چارچوب مدیریت انرژی غیرمتمرکز و مقاوم را برای این شبکه‌ها ارائه کرده‌اند. نقطه قوت اصلی پژوهش یکپارچه‌سازی هم‌زمان سیستم‌های تبدیل توان الکتریکی به گاز و جذب کربن در کنار یک ساختار همکاری چندمحوره شامل توربین‌های گازی، دیگ‌های گازسوز، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، ذخیره‌ساز و الکترولایزرهاست. این رویکرد جامع انعطاف‌پذیری عملیاتی و مسیرهایی جدید برای کاهش کربن فراهم می‌آورد. اگرچه مدل پیشنهادی مقاوم و محافظه‌کارانه است، عمدتاً بر عدم قطعیت قیمت متمرکز شده است و عدم قطعیت‌های فنی و رخدادهای خطای هم‌زمان در اجزای سیستم چندانرژی به طور عمیق بررسی نشده‌اند.

وِن و همکاران در [۱۲] یک راهبرد بهینه‌سازی بهره‌برداری از ذخیره‌سازهای انرژی اشتراکی را بین چندین ریزشبکهٔ مبتنی بر نظریهٔ بازی پیشنهاد کرده‌اند. این پژوهش با تشخیص درست چالش کلیدی توازن منافع بین ذی‌نفعان متعدد در اشتراک‌گذاری ذخیره‌سازها، یک چارچوب هوشمندانه ارائه داده است. ترکیب مدل بازی استکلبرگ[۶] و مدل چانه‌زنی نش[۷] تعمیم‌یافته با مکانیسم جبران برای ریزشبکه‌ها، امکان مدل‌سازی سلسله‌مراتبی قدرت و همچنین همکاری افقی بین ریزشبکه‌ها را فراهم می‌کند. اگرچه مدل ارائه‌شده برای توزیع منافع عادلانه مناسب است، حل آن برای مسائل در مقیاس بزرگ ممکن است از نظر محاسباتی زمان‌بر باشد.

علی‌میر و همکاران در [۱۳] بهینه‌سازی تصادفی چندلایه با ذخیره‌سازهای هیدروژن و پاسخ‌گویی بار را پیشنهاد دادند. نتایج کاهش ۱۱/۱۳ درصدی در هزینه‌های عملیاتی را نشان داد، اما پیچیدگی محاسباتی و عدم توجه به رخداد خطا در اجزای حیاتی از محدودیت‌های آن بود.

پَن و یانگ نیز در [۱۴] بهینه‌سازی توزیع‌شده برای ذخیره‌سازهای هیدروژن اشتراکی را با حفظ حریم خصوصی ارائه دادند؛ هرچند سرعت همگرایی آن برای مسائل غیرمحدب ممکن است کاهش یابد.

همچنین، پژوهشگران در [۱۵] مدیریت انرژی برای خوشه‌ای از NMGها در جوامع خارج از شبکه را با تمرکز بر کاهش هزینه و مصرف سوخت پیشنهاد کردند، اما معیارهای چندمتغیرهٔ مهمی مانند تاب‌آوری شبکه لحاظ نشده‌اند.

پژوهشگران در مقالهٔ [۱۶] بهینه‌سازی غیرمتمرکز سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری (BESSs)[۸] را برای شبکه‌های NMG با درنظرگیری جامع عدم قطعیت تولید و مصرف و چرخهٔ عمر، پیشنهاد کرده‌اند. استفاده از روش مبتنی بر اجماع[۹] برای هماهنگی عملیات شبکهٔ توزیع و ریزشبکه‌ها، ضمن حفظ حریم خصوصی، راه‌حلی عملی برای سیستم‌های غیرمتمرکز است. فرمول‌بندی مسئله در این پژوهش، به عنوان یک مسئلهٔ برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح[۱۰] و حل آن

با حل‌کننده‌هایی مانند گوروبی[۱۱]، اگرچه دقیق است، برای مسائل بلادرنگ یا با فضای جست‌وجوی بسیار بزرگ ممکن است از نظر زمانی بهینه نباشد.

در نهایت، لی و همکاران در [۱۷] بهینه‌سازی هماهنگ تجارت توان به صورت نظیربه‌نظیر (P2P)[۱۲] و عملیات شبکه را پیشنهاد کردند، اما آثار احتمالی تجارت P2P بر نوسانات ولتاژ محلی و پاسخ سیستم به خطاهای شبکه به صورت پویا وارد تابع هدف نشده است.

۱-۲-۲- خودترمیمی در شبکه‌های توزیع و NMG

هم‌زمان با پیشرفت‌های چشمگیر در حوزهٔ مدیریت انرژی، مفهوم خودترمیمی به عنوان یکی از ارکان اساسی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت مدرن و شبکه‌های هوشمند مورد توجه فزاینده قرار گرفته است. خودترمیمی به تولنایی ذاتی شبکه در بازیابی سریع و هوشمندانه از رویدادهای نامطلوب و خطاها، با کمترین مداخلهٔ انسانی اطلاق می‌شود. در ادامه، به طور عمیق، مهم‌ترین و به‌روزترین پژوهش‌های این حوزه تحلیل و نقد می‌شوند.

لیو و همکاران در [۱۸] یک روش ابتکاری برای خودترمیمی نرم در شبکه‌های توزیع چندشاخه بر پایهٔ فناوری اندازه‌گیری بسامد فرکانس معرفی کرده‌اند. نقطه قوت اصلی این پژوهش استفاده از تزریق سیگنال‌های فرکانس بالا و تحلیل دقیق ویژگی‌های تضعیف آنها برای مکان‌یابی سریع و دقیق خطاست. نتایج تجربی بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان را تأیید می‌کنند. با وجود این نوآوری، پژوهش یادشده عمدتاً بر روی شبکه‌های توزیع با توپولوژی ساده و خطی متمرکز شده است. کارایی این روش در ساختار پیچیده و پویای NMGها که شامل چندین ریزشبکه با تولیدات پراکنده و امکان تبادل توان دوطرفه است، بررسی نشده است. همچنین، این پژوهش مرحلهٔ حیاتی بازیابی توان پس از تشخیص خطا و ارائهٔ یک برنامهٔ بهینه برای تخصیص منابع در نواحی جزیره‌شدهٔ اجباری را مدنظر قرار نداده است.

وانگ و همکاران در [۱۹] نیز با بهره‌گیری از ساختار خطوط توان و پدیدهٔ تضعیف بسامد فرکانس، یک فناوری جدید خودترمیمی سریع برای شبکه‌های توزیع توسعه داده‌اند. نوآوری این کار در تلفیق مدل‌سازی ساختار معادل با یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای بازآرایی شبکه است. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکهٔ ۳۳ شین IEEE عملکرد مطلوب روش را با نرخ بازیابی خودترمیمی بیش از ۹۰ درصد و کاهش تلفات نشان می‌دهد. با این حال، این مدل بهینه‌سازی عمدتاً بر بازآرایی فیدرها متمرکز بوده و از پتانسیل قابل ملاحظهٔ منابع انرژی پراکنده در فرایند بازیابی غفلت کرده است.

حمدین و همکاران در [۲۰] یک مقالهٔ مروری جامع منتشر کرده‌اند که تکنیک‌های خودترمیمی مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی در شبکه‌های توزیع را بررسی می‌کند. سهم اصلی این کار دسته‌بندی سیستماتیک چارچوب‌های مختلف این سیستم‌ها، تحلیل نقش ارتباط P2P بین عامل‌ها در تسریع فرایندهای تشخیص و ایزوله‌سازی خطا، و شناسایی چالش‌های کلیدی مانند تأخیرهای ارتباطی و تهدیدات سایبری است. با وجود پوشش گسترده، این مقاله صرفاً به مرور ادبیات توجه دارد و فاقد یک پیشنهاد عملیاتی یا الگوریتم بهینه‌سازی مشخص برای اجرای خودترمیمی درNMGهاست. همچنین، نحوهٔ مدیریت تعارض بین اهداف اقتصادی و قابلیت اطمینان در شرایط اضطراری در چارچوب‌های چنین سیستم‌هایی بررسی نشده است.

جوبان و همکاران در [۲۱] یک سیستم مدیریت انرژی خودمختار با قابلیت‌های خودترمیمی برای ریزشبکه‌های DC با کاربرد در ساختمان‌های سبز بر پایهٔ سیستم‌های چندعاملی اجرا کرده‌اند. نوآوری آنها در ارائهٔ یک الگوریتم سلسله‌مراتبی خودترمیمی است که تعامل بین عامل‌ها را کنترل و قابلیت اطمینان سیستم کنترلی را در شرایط خطا تضمین می‌کند. با این حال، تمرکز این پژوهش بر ریزشبکه‌های کوچک‌مقیاس است و کارایی آن درNMGهای با مقیاس بزرگ. پیچیدگی‌های پخش بار راکتیو و تنوع بارها نیازمند بررسی و توسعهٔ بیشتر است.

احمدی و همکاران در [۲۲] یک رویکرد برنامه‌ریزی روز-پیش با قابلیت خودترمیمی شبکه را برای سیستم‌های NMG جزیره‌ای ارائه کرده‌اند. مدل دوسطحی انعطاف‌پذیر آنها عملکرد عادی و حالت خطا را پوشش می‌دهد و با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی، عدم قطعیت‌ها را مدیریت می‌کند. نقطه قوت این کار تقسیم‌بندی هوشمندانهٔ ریزشبکهٔ خطادیده

به دو ناحیهٔ متصل و جزیره‌شده و اعمال راهبردهای متفاوت برای هر یک است. با وجود این، تابع هدف عمدتاً بر کاهش هزینه‌های عملیاتی متمرکز است و معیارهای فنی حیاتی مانند پایداری ولتاژ و فرکانس در حین فرایند بازیابی، به صورت یک تابع هدف بهینه‌سازی لحاظ نشده‌اند.

نوریان و کاظمی در [۲۳] یک تکنیک بهینه‌سازی دومرحله‌ای برای خودترمیمی سیستم‌های توزیع با بهره‌گیری از ظرفیت مشتریان هوشمند شامل مراکز داده، ایستگاه‌های شارژ هوشمند و واحدهای توان مبتنی بر هیدروژن و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی ارائه داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد مشارکت این منابع می‌تواند بازیابی بارهای بحرانی را تا ۷/۸۶ درصد بهبود بخشد. ارزش این پژوهش در واردکردن انعطاف‌پذیری سمت تقاضا به فرایند خودترمیمی است. با این حال، مدل‌سازی آنها عمدتاً قطعی است و عدم قطعیت‌های ذاتی در رفتار مشتریان هوشمند و همچنین عدم قطعیت در پیش‌بینی توان قابل عرضه توسط واحدهای مبتنی بر هیدروژن به طور کامل مدل‌سازی نشده‌اند. پیچیدگی محاسباتی مدل دومرحله‌ای نیز می‌تواند چالشی برای کاربردهای بلادرنگ باشد.

ژانگ و همکاران در [۲۴] یک چارچوب بهینه‌سازی مقاوم و غیرمتمرکز مبتنی بر روش جهت متناوب ضرایب (ADMM)[۱۳] برای برنامه‌ریزی خودترمیمی شبکه‌های هوشمند با حضور مصرف‌کننده‌های فعال پیشنهاد داده‌اند. کاهش ۳۲/۰۴ درصدی در خاموشی اجباری بار و کاهش ۱۷/۴۸ درصدی در هزینه‌های خودترمیمی از دستاوردهای این پژوهش است. استفاده از روش ADMM برای حفظ حریم خصوصی اطلاعات بازیگران و دست‌یابی به همگرایی در یک چارچوب غیرمتمرکز یک نوآوری کلیدی محسوب می‌شود. با وجود این مزایا، عملکرد این روش به‌شدت به تنظیم دقیق پارامترهای الگوریتم وابسته است و کارایی آن در شرایط خطاهای شدید و ناگهانی (مانند بلایای طبیعی) که نیاز به تصمیم‌گیری آنی دارند، ارزیابی نشده است.

الصافی و همکاران در [۲۵] الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات خودتنظیم مخروطی[۱۴] را برای برنامه‌ریزی احتمالاتی ریزشبکه‌ها با هدف بهبود تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری شبکه معرفی کرده‌اند. عملکرد برتر این الگوریتم بر روی توابع هدف متفاوت نشان‌دهندهٔ قدرت جست‌وجوی زیاد آن است. با این حال، این پژوهش عمدتاً بر جنبه‌های برنامه‌ریزی و اقتصادی (کاهش هزینه) و کاهش شاخص بی‌باری متمرکز است و مکانیسم عملیاتی خودترمیمی برای پاسخ به خطاهای لحظه‌ای و بلادرنگ را در بر نمی‌گیرد.

لو و همکاران در [۲۶] یک روش نوآورانه برای ارزیابی عملکرد خودترمیمی شبکهٔ توزیع فعال مبتنی بر طرح‌های یکنواخت ارائه کرده‌اند. نوآوری این کار در معرفی سه شاخصِ نرخ خودترمیمی، سرعت خودترمیمی و پیچیدگی عملیات خودترمیمی و همچنین، کاهش چشمگیر زمان محاسبات با استفاده از نمونه‌برداری یکنواخت است. با وجود این، شاخص‌های پیشنهادی عمدتاً بر جنبه‌های ساختاری و عملیاتی شبکه متمرکز هستند و معیارهای اقتصادی یا تأثیر بلندمدت بر قابلیت اطمینان مشترکین را بررسی نمی‌کنند.

کایف و همکاران در [۲۷] یک معماری جامع چندلایه برای کاهش خطا و خودترمیمی تطبیقی در نیروگاه‌های مجازی مبتنی بر فناوری بلاکچین معرفی کرده‌اند. قابلیت تشخیص و کاهش ناهنجاری‌های داده و خطاهای ارتباطی و استفاده از بلاکچین برای افزایش امنیت و شفافیت از نقاط قوت این پژوهش هستند. با این حال، چالش‌های عملی مهمی مانند تأخیر زیاد تراکنش‌ها در شبکه‌های بلاکچین عمومی، مقیاس‌پذیری این راهکار برای NMGهای بزرگ با چندین سنسور و دستگاه در این پژوهش به طور عمیق بررسی نشده‌اند.

بدخشان و همکاران در [۲۸] از یادگیری تقویتی مبتنی بر گراف برای جزیره‌سازی کنترل‌شدهٔ شبکه به عنوان یک راهبرد خودترمیمی در برابر بلایای طبیعی بهره گرفته‌اند. توجه به دینامیک ژنراتورها و رفتار بار در مدل یادگیری و ارائهٔ یک راهبرد کلیدزنی بهینه برای جداسازی مناطق آسیب‌دیده از ویژگی‌های برجستهٔ این کار هستند. با وجود این، وابستگی شدید این روش به داده‌های آموزشی و عدم تعمیم‌پذیری آن به سناریوهای خطای دیده‌نشده و پیچیده، همچنین پیچیدگی زیاد محاسباتی در فاز آموزش عامل یادگیری تقویتی، از چالش‌های اساسی آن محسوب می‌شوند.

۱-۳- جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر

با در نظر گرفتن شکاف‌های پژوهشی یادشده، پژوهش حاضر به ارائه و توسعهٔ یک چارچوب توزیع‌شدهٔ نوآورانه برای سیستم‌های چندعاملی به منظور کنترل بهینهٔ شبکه‌های مبتنی بر NMG اختصاص دارد. هستهٔ اصلی این چارچوب یک فرمول‌بندی ریاضی جامع است که حالت‌های بهره‌برداری عادی و عملیات خودترمیمی پس از وقوع خرابی را در قالب یک تابع هدف وزنی چندمتغیره یکپارچه می‌کند. حل عملی و به‌موقع این مسئلهٔ پیچیده که مستلزم بهینه‌سازی هم‌زمان چندین متغیر تصمیم است، نیازمند الگوریتم‌هایی با همگرایی سریع و قابلیت فرار از بهینه‌های محلی است. در پاسخ به این ضرورت، پژوهش حاضر الگوریتم تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شدهٔ تطبیقی مقاوم (RA-SCE)[۱۵] را در قالب یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی با یادگیری تطبیقی به عنوان روشی تقویت‌شده از روش‌های بهینه‌سازی مرسوم پیشنهاد می‌دهد. در معماریِ الگوریتم پیشنهادی، ساختار یادگیری بین‌مجتمعی، الگوریتم را از یک ساختار موازی صرفاً مستقل به یک ابرساختار همکارانه ارتقا می‌دهد و از طریق جریان اطلاعاتی هوشمند، بهره‌وری ارزیابی تابع هدف را حداکثر می‌کند. در مجموع، چارچوب و الگوریتم پیشنهادی راه‌حلی جامع، خودتنظیم و کارآمد برای مسئلهٔ کنترل چند ریزشبکه ارائه می‌دهد که هم‌زمان قابلیت اطمینان در شرایط عادی و تاب‌آوری در حالت‌های اضطراری را تضمین می‌کند. به طور خلاصه، نوآوری‌های کلیدی پژوهش حاضر برای مدیریت انرژی شبکه‌های مبتنی بر NMG عبارت‌اند از:

■ **فرمول‌بندی ریاضی یکپارچه:** ارائهٔ یک مدل جامع ریاضی که حالت‌های بهره‌برداری عادی و خودترمیمی را در قالب یک تابع هدف وزنی چندمتغیره ادغام می‌کند و چارچوبی منسجم برای کنترل بهینه فراهم می‌آورد؛

■ **معماری چندراهبردی تطبیقی:** انتخاب خودکار بهترین راهبرد بهینه‌سازی بر اساس تاریخچهٔ عملکرد، برای انطباق پویا با ویژگی‌های مسئله و افزایش کارایی جست‌وجو؛

■ **شبکهٔ انتقال دانش پویا:** ایجاد جریان هوشمند اطلاعات بین زیرجمعیت‌های موازی برای تسریع همگرایی و جلوگیری از محاسبات تکرار؛

■ **مکانیسم نظارت سلامت:** تشخیص فعال همگرایی زودرس و اعمال اقدامات اصلاحی خودکار برای حفظ تنوع و بازیابی کارایی جست‌وجو؛

■ **تقسیم‌بندی وزنی پویا:** تخصیص منابع محاسباتی بر اساس عملکرد لحظه‌ای هر زیرجمعیت (ریزشبکه‌ها)، برای تمرکز بهینه بر نواحی امیدبخش؛

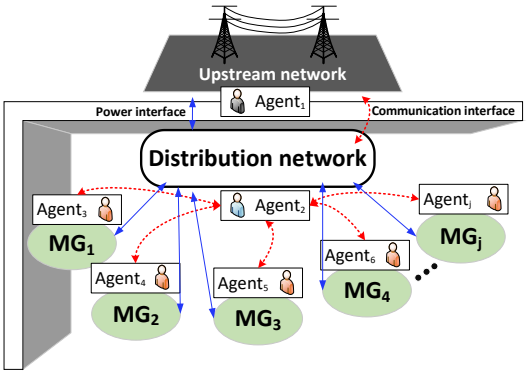
■ **یادگیری بین‌مجتمعی و توقف هوشمند:** ارتقا به یک ساختار همکارانه و توقف خودکار با معیار ترکیبی، برای بهینه‌سازی نهایی دقت و کارایی.

در ادامه، بخش ۲، در ابتدا سیستم چندعاملی تحت مطالعه را تشریح می‌کند؛ سپس، فرمول‌نویسی مسئله برای ریزشبکه‌ها ارائه شده و در انتهای این بخش، فرمول‌بندی مسئله برای DN هدف قرار گرفته است. در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی (RA-SCE) و مراحل اجرای آن هدف قرار گرفته است. در بخش ٤، نتایج شبیه‌سازی تحلیل و بررسی شده است. و در نهایت، بخش ۵ پژوهش حاضر را نتیجه‌گیری کرده است.

۲- سیستم چندعاملی تحت مطالعه

سیستم چند عاملی مورد مطالعه متشکل از DN است که می‌تواند تجارت دوسویهٔ انرژی با شبکهٔ بالادستی (UN)[۱۶] ایزوله و تعداد N ریزشبکه را اجرا کند؛ به طوری که در این سیستم $MG_i = \{MG_1, MG_2, \dots, MG_N\}$ است. سیستم چندعاملی پیشنهادی کاملاً به صورت غیرمتمرکز مدیریت می‌شود؛ بنابراین، هر بخش به طور جداگانه توسط عامل مربوط به خود اداره می‌شود. بر اساس مقادیر عددی به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه، تمامی ریزشبکه‌ها از ظرفیت تولید کافی برای تأمین تقریبی بارهای خود برخوردار و همچنین به یکدیگر متصل هستند و می‌توانند با شبکهٔ DN تبادل انرژی داشته باشند. ریزشبکه‌ها از نظر جغرافیایی به هم نزدیک هستند و هر یک شامل منابع انرژی تجدیدپذیر پراکندهٔ غیرقابل کنترل (مانند سیستم‌های فتوولتائیک (PV)[۱۷] و توربین‌های بادی (WTs)[۱۸])، منابع انرژی پراکندهٔ قابل کنترل (مانند ریزتوربین (MT)[۱۹])، سیستم‌های BESS و خودروهای

برقی (EV)[۲۰] می‌شوند. همچنین، سمت تقاضا از انواع مختلف بار (مانند مسکونی، کشاورزی، تجاری و صنعتی کوچک) تشکیل شده است که شامل بارهای قطع‌نشدنی و قطع‌شدنی هستند. BESSها و EVها در هر ریزشبکه می‌توانند برای ذخیرهٔ انرژی مازاد تولیدشده توسط واحدهای تولید غیرقابل کنترل در ساعات کم‌باری استفاده شوند و سپس در ساعات اوج بار یا اضطراری، انرژی مورد نیاز بارها را تأمین کنند. ساختار این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است. از دیدگاه نظریهٔ بازی‌های همکارانه و بهینه‌سازی توزیع‌شده، دست‌یابی به نقطهٔ بهینهٔ سراسری در سیستم‌های چندعاملیِ مبتنی بر NMG صرفاً در سایهٔ تعامل پویا و تبادل هدفمند میان عامل‌ها میسر است؛ در غیر این صورت، اگر هر عامل صرفاً بر مبنای داده‌های محلی و با رویکردی کاملاً منفعلانه و غیرهمکارانه اقدام به بهینه‌سازی توابع هدف مستقل خود کند، نه فقط قادر به بهره‌برداری از مزایای تجارت محلی انرژی، ظرفیت‌های اشتراکی ذخیره‌سازها و انعطاف‌پذیری ناشی از هم‌پوشانی منابع در ریزشبکه‌های مجاور نخواهد بود، بلکه در شرایط وقوع خطا یا نوسانات شدید تولید–مصرف، با کاهش چشمگیر قابلیت اطمینان، افزایش هزینه‌های عملیاتی و حتی بی‌ثباتی ولتاژ در محدودهٔ تحت کنترل خود مواجه خواهد شد. به عبارت دیگر، نادیده‌گرفتن وابستگی‌های متقابل و خودداری از هماهنگی، عامل‌ها را در دام بهینه‌های محلیِ ناپایدار گرفتار می‌کند و در بلندمدت به افت قابل ملاحظهٔ سود عملیاتی و کاهش تاب‌آوری کل سیستم منجر می‌شود. در این راستا، فرمول‌بندی مسئله در قالب یک تابع چندهدفه با وزن‌های پویا نه فقط محدودیت‌های فنی و اقتصادی را به صورت هم‌زمان پوشش می‌دهد، بلکه با ایجاد بستری برای اولویت‌بندی هوشمند اهداف در شرایط مختلف بهره‌برداری، زمینهٔ تعامل خودمختار و در عین حال، هم‌سو با منافع جمعی را برای همهٔ عامل‌ها فراهم می‌آورد. این ساختار ریاضی، عامل‌ها را قادر می‌کند تا از طریق یادگیری تعاملی و کشف فرصت‌های مبادلهٔ بهینه، ضمن حفظ استقلال تصمیم‌گیری، در مسیر دست‌یابی به بیشترین سود بهره‌برداری و بهبود شاخص‌های پایداری گام بردارند.



شکل (۱): پیکربندی فیزیکی سیستم چندعاملی تحت مطالعه

به دلیل نرخ خرابی و زمان تعمیر اجزای اصلی، انواع مختلف خطاها (با مکان و مدت زمان مختلف) ممکن است در سیستم‌های NMG رخ دهند که موقعیت‌هایی متفاوت در هر سمت سیستم ایجاد می‌کنند. در چارچوب کلی، موقعیت‌های موجود را می‌توان به صورت زیر فهرست کرد:

■ **عملکرد عادی**: در این حالت، سیستم هیچ وضعیت اضطراری را تجربه نمی‌کند. از آنجا که در این مقاله، مدیریت انرژی به صورت غیرمتمرکز است، ریزشبکه‌ها تحت مالکیت‌ها و راهبردهای مختلف مدیریت و بهره‌برداری می‌شوند و می‌توانند به اختیار خود انتخاب کنند که به سیستم NMG بپیوندند یا خیر؛ بنابراین، هر طرح مدیریتی مرتبط با چنین سیستمی باید منافع تمام عامل‌ها را در نظر بگیرد و نباید استقلال عمل آنها را محدود کند. علاوه بر این، عامل شبکهٔ DN مسئول بهره‌برداری از برخی منابع انرژی پراکنده در شبکهٔ توزیع است و مسئولیت کامل مدیریت و کنترل آنها را به عهده دارد. برای دست‌یابی به هدف بهینهٔ سراسری، هنگامی که تولید ریزشبکه با کمبود مواجه است، DN جریان توان را به سمت ریزشبکه‌ها ارسال می‌کند؛ در غیر این صورت، ریزشبکه‌ها توان مازاد خود را به DN انتقال می‌دهند تا پایداری و قابلیت اطمینان شبکه توزیع حفظ شود. در انجام این کار، تصمیم‌های بهینه توسط عامل DN با توجه به وضعیت شبکهٔ خود و توان کمبود/مازاد ریزشبکه‌ها که از بازهٔ زمانی قبلی اعلام شده است (Δt در این مطالعه ۱ ساعت در نظر گرفته شده است)، تنظیم می‌شوند.

■ **عملکرد تحت خطا**: هنگامی که یک خطا در محیط ریزشبکه‌ها رخ می‌دهد، از دستگاه‌های اتصال مرتبط برای

ایزوله‌کردن بخش معیوب استفاده می‌شود. در این شرایط، برخی از بخش‌ها ممکن است بتوانند توان مورد نیاز خود را از DN وارد یا توان مازاد خود را به آن ارسال کنند. با این حال، برخی از بخش‌ها به طور جزئی از سایر مناطق جدا (ایزله) می‌شوند؛ بنابراین، ممکن است نتوانند توان مورد نیاز خود را از DN وارد کنند؛ در نتیجه، عامل مرتبط ریزشبکه باید طرح توزیع مؤثر منابع در دسترس خود در بخش ایزوله‌شده را تعیین کند.

در خلاصهٔ بحث قبلی، تعادل بین انرژی الکتریکی تولیدشده و مصرف‌شده در بخش‌های ایزوله ممکن است برقرار نماند؛ بنابراین، برای عامل‌های موجود ضروری است تا این مسئله را در مدیریت بهینهٔ انرژی خود در نظر بگیرند. برای این منظور، اهداف محلی باید توسط عوامل ریزشبکه‌ها اولویت‌بندی شوند. برای مثال، هنگامی که خطا در یک شاخهٔ خاص رخ می‌دهد و توان نمی‌تولند از آن عبور کند، مسائل اقتصادی (مانند کمینه‌سازی هزینه) اهمیت کمتری نسبت به مسائل شبکه (مانند خاموشی‌های کنترل‌نشدهٔ بار و پایداری ولتاژ) پیدا می‌کنند؛ بنابراین، عوامل مرتبط می‌توانند منابع شبکهٔ خود را مدیریت کنند و وزن تابع هدف را بسته به شرایط اضطراری تغییر دهند. از سوی دیگر، در حین عملکرد عادی و با در نظر گرفتن امکان خرید توان از UN، احتمال خاموشی کاهش می‌یابد. در این وضعیت، مسائل اقتصادی یک اولویت اصلی برای عامل‌ها محسوب می‌شوند و به همین دلیل، در فرمول‌بندی مسئلهٔ پیشنهادی، اهداف توسط عامل‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. برای دست‌یابی به این هدف، عامل هر ریزشبکهٔ مشارکت‌کننده یک راه‌حل بهینه برای مدیریت انرژی سیستم با استفاده از تابع چندهدفهٔ وزنی متغیر استخراج می‌کند. از آنجا که روش پیشنهادی بر اساس معماری غیرمتمرکز است، توابع هدف برای ریزشبکه‌ها و DN به صورت جداگانه و به شرح زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

۲-۱ فرمول‌نویسی مسئله برای ریزشبکه‌ها

در پژوهش حاضر، هر ریزشبکه می‌کوشد با در نظر گرفتن احتمال خرابی تجهیزات و امکان انجام مبادلهٔ انرژی دوسویه با DN، منافع خود را به حداکثر برساند؛ در نتیجه، برای هر ریزشبکه، بیشینه‌سازی بارهای تغذیه‌شده (OF_1)، کمینه‌سازی مجموع تغییرات ولتاژ (OF_2) و بیشینه‌سازی سود کلی بهره‌برداری (OF_3) به عنوان توابع هدف تعریف می‌شوند که باید هم‌زمان با قیود برابری و نابرابری بهینه‌سازی شوند. هدف آن است که این سه تابع هدف با استفاده از ضرایب وزنی متغیر، در قالب یک تابع واحد ادغام شوند. به صورت ریاضی، تابع چندهدفه برای حالات مختلف بهره‌برداری ریزشبکه‌ها به صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

$$max\{OF_t\} = max\{\omega_{i1}OF_1 - \omega_{i2}OF_2 - \omega_{i3}OF_3\} \quad (۱)$$

$$OF_1 = \sum_{m\in M}\sum_{t=1}^{n_t}\{\sum_{j=1}^{n_{LP}}\delta^{j,m}y^{j,m}P_{NID}^{j,m}(t) + \sum_{j=1}^{n_{ID}}P_{ID}^{j,m}(t)\} \quad (۲)$$

$$OF_2 = \sum_{m\in M}\sum_{t=1}^{n_t}\sum_{j=1}^{n_{LP}}|1 - v^{j,m}(t)| \quad (۳)$$

در این روابط، ω_{i1}، ω_{i2} و ω_{i3} به ترتیب ضرایب وزنی توابع هدف OF_1، OF_2 و OF_3 هستند. این ضرایب با توجه به درجهٔ اهمیت توابع هدف و با در نظر گرفتن وضعیت سیستم (دوره‌های عادی یا وقوع خطا) تنظیم می‌شوند. گفتنی است، در OF_1، هر عامل در ریزشبکه‌ها می‌کوشد بارهای تغذیه‌شده را بر اساس ضریب اولویت به حداکثر برساند. برای تحقق این امر، ضریب اولویت به هر بار غیرقابل قطع در محدودهٔ ریزشبکه‌ها اختصاص داده می‌شود (بارهای حیاتی از اولویت بیشتری برخوردار هستند). همچنین، با در نظر گرفتن این ضریب اولویت و وضعیت سیستم، عامل دودویی $y^{j,m}$ تعیین می‌کند آیا هر بار در بازهٔ زمانی بعدی تغذیه می‌شود یا خیر [۱۷]:

$$\begin{aligned} OF_3 = \sum_{m\in M}\sum_{t=1}^{n_t}\{ & \left(C_{BESS}(t)\times\sum_{j=1}^{n_{ess}}S_{BESS}^{j,m}(t)\,P_{BESS}^{j,m}(t)\right) \\ & + \left(C_{EV}(t)\sum_{j=1}^{n_{ev}}S_{EV}^{j,m}(t)\,P_{EV}^{j,m}(t)\right) \\ & + \left(C_{DG,M}(t)\sum_{j=1}^{n_{DG}}P_{DG,M}^{j,m}(t)\right) \\ & + \left(C_{cut}(t)\sum_{j=1}^{n_{ID}}P_{cut}^{j,m}(t)\right) \\ & + (C_{Ex}^{m}(t)\beta_{Ex}^{m}(t)P_{Ex}^{m}(t)) \\ & + C_{NID}(t)\sum_{j=1}^{n_{cu}}(y^{j,m}P_{NID}^{j,m}(t)) \\ & + C_{ID}(t)\sum_{j=1}^{n_{ID}}P_{ID}^{j,m}(t)\} \end{aligned} \quad (٤)$$

با الهام از مباحث مطرح‌شده در بخش قبل، با انجام آنالیز حساسیت، در این پژوهش مقادیر وزنی توابع ω_{i1}، ω_{i2} و ω_{i3} به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- (۰، ۰/٤، ۰/٦) برای بخش‌های جزئی/کامل مجبور به جزیره‌شدن اجباری ناشی از خطا؛
- (۰/۳، ۰/۲۵، ۰/٤۵) برای حالت‌های عملیاتی جزیره‌ای اختیاری بر اساس تصمیم عامل هر ریزشبکه؛
- (۱، ۰، ۰) برای حالت‌های متصل به DN.

در پژوهش حاضر، این وزن‌ها با استفاده از تحلیل آنالیز حساسیت به منظور کاهش عدم قطعیت و رتبه‌بندی توابع بر اساس اثرات مشارکتشان در شرایط متنوع بهره‌برداری تعیین شده‌اند. با توجه به پیکربندی‌های متنوع در سیستم ریزشبکه‌ها و NMGها و راهبردهای مختلف بهره‌برداری، لپرلتورها می‌توانند وزن‌هایی متفاوت را برای دست‌یابی به اهداف خود انتخاب کنند.

همراه با توابع هدف، بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها باید از تعدادی قیود شبکه تبعیت کند تا راه‌حل‌های عملی ممکن را تضمین کند. قید اولیه در سیستم‌های ریزشبکه تعادل بین بار و تولید است؛ از این نظر، در هر بازهٔ زمانی بهره‌برداری، تراز انرژی در هر ریزشبکه باید برقرار شود؛ بنابراین، مجموع توان خریداری‌شده از DN، کل توان تولیدشده توسط منابع محلی، توان شارژ یا دشارژ BESSها و EVها، همچنین بارهای قطع‌شده در ریزشبکهٔ iام، باید با تقاضای محلی متعادل شوند؛ در نتیجه، برای هر ریزشبکه در هر بازهٔ زمانی، تراز انرژی را می‌توان به صورت رابطهٔ (۵) در نظر گرفت:

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{n_{ess}} S_{BESS}^{j,m}(t)\,P_{BESS}^{j,m}(t) + \sum_{j=1}^{n_{ev}} S_{EV}^{j,m}(t)\,P_{EV}^{j,m}(t) \\ + \sum_{j=1}^{n_{DG}} P_{DG,M}^{j,m}(t) + \sum_{j=1}^{n_R} P_R^{j,m} \\ + \sum_{j=1}^{n_e} \beta_{Ex}^{m}(t) P_{Ex}^{j,m}(t) \\ = \sum_{j=1}^{n_{Cu}} y^{j,m} P_{NID}^{j,m}(t) \\ - \sum_{j=1}^{n_{ID}} P_{ID}^{j,m}(t), \forall\, j,m,t\end{aligned} \qquad (۵)$$

جلب توجه است که اگر تولید در بخش‌های جزیره‌ای متأثر از خطای ریزشبکه‌ها بیشتر از مصرف باشد، عامل ریزشبکه می‌تواند مقداری از تولید خود را کاهش دهد تا تعادل را حفظ کند.

توان اکتیو در نقاط اتصال مشترک بین هر ریزشبکه و DN باید محدود شود تا شرایط عملیاتی واقعی را فراهم کند. در این چارچوب، قید مبادلهٔ توان بین هر ریزشبکه و DN به صورت رابطهٔ (٦) بیان شده است:

$$P_{Ex}^{m,min} \le P_{Ex}^{m}(t) \le P_{Ex}^{m,max}, \forall\, m,t \qquad (٦)$$

برای هر ریزشبکه، توان خروجی واحدهای تولید پراکندهٔ قابل برنامه‌ریزی در هر بازهٔ زمانی باید قید معادلات (۷) و (۸) را برآورد کند و بین بیشینه و کمینهٔ توان اکتیو و راکتیو محدود شود:

$$P_{DG,M}^{j,m,min} \le P_{DG,M}^{j,m}(t) \le P_{DG,M}^{j,m,max}, \forall\, j,m,t \qquad (۷)$$

$$Q_{DG,M}^{j,m,min} \le Q_{DG,M}^{j,m}(t) \le Q_{DG,M}^{j,m,max}, \forall\, j,m,t \qquad (۸)$$

نرخ افزایش و کاهش توان واحدهای تولید پراکندهٔ قابل برنامه‌ریزی در هر بازهٔ زمانی نیز باید قید روابط (۹) و (۱۰) را تحت عنوان تابع رامپ[۲۱] برآورده کند. این قیود بیان می‌کنند در یک بازهٔ زمانی مشخص، برای تغییر میزان تولید این واحدها محدودیت فنی وجود دارد:

$$P_{DG,M}^{j,m}(t) - P_{DG,M}^{j,m}(t-1) \le C_U \Delta t, \forall\, j,m,t \qquad (۹)$$

$$P_{DG,M}^{j,m}(t-1) - P_{DG,M}^{j,m}(t) \le C_D \Delta t, \forall\, j,m,t \qquad (۱۰)$$

به علاوه، مقدار توان جذب‌شده توسط هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر باید توسط حداکثر توان قابل دسترس، مطابق روابط (۱۱) و (۱۲)، محدود شود:

$$0 \le P_R^{j,m}(t) \le P_R^{j,m,max}, \forall\, j,m,t \qquad (۱۱)$$

$$0 \le Q_R^{j,m}(t) \le Q_R^{j,m,max}, \forall\, j,m,t \qquad (۱۲)$$

در هر بخش، در صورت عدم تأمین تقاضای توان، کاهش بیشتری در ولتاژ باس رخ می‌دهد و این امر به ایجاد شرایط نامطلوب در مناطق مجاور منجر می‌شود؛ از این رو، حفظ پروفیل ولتاژ در محدودهٔ مجاز امری ضروری است. بر این اساس، با استناد به معادلات پخش بار، محدودیت میزان ولتاژ برای هر بازهٔ زمانی بهره‌برداری، مطابق رابطهٔ (۱۳) در نظر

گرفته می‌شود:

$$V_i^{min} \le V_i(t) \le V_i^{max}, \forall\, i,t \qquad (۱۳)$$

برای بهره‌برداری از واحدهای ذخیره‌ساز، محدودیت‌هایی اعمال شده است. مراجع توان برنامه‌ریزی‌شده برای ظرفیت توان‌های BESS و EVها در هر بازهٔ زمانی (t)، باید کمتر یا مساوی حداکثر توانی باشد که آنها می‌توانند تأمین کنند؛ بنابراین، محدودیت‌های توان شارژ و دشارژ در روابط (۱٤) و (۱۵) نشان داده شده است:

$$0 \le P_{BESS/EV}^{j,m,ch}(t) \le \kappa_{BESS/EV}^{j,m,ch}(t) P_{BESS/EV}^{j,m,ch,max}, \forall\, j,m,t \qquad (۱٤)$$

$$0 \le P_{BESS/EV}^{j,m,dch}(t) \le \kappa_{BESS/EV}^{j,m,dch}(t) P_{BESS/EV}^{j,m,dch,max}, \ \forall\, j,m,t \qquad (۱۵)$$

علاوه بر این، وضعیت شارژ که به سطح انرژی ذخیره‌شده در هر زمان t مربوط می‌شود، مطابق رابطهٔ (۱٦) مدل‌سازی شده است. همچنین، وضعیت شارژ در هر زمان t، مطابق رابطهٔ (۱۷) باید در محدودهٔ مجاز خود باقی بماند:

$$SOC_{BESS/EV}^{j,m,}(t) = SOC_{BESS/EV}^{j,m,}(t-1) + \eta_{BESS/EV}^{ch} \times P_{BESS/EV}^{j,m,ch}(t)\Delta t - \frac{1}{\eta_{BESS/EV}^{dch}} P_{BESS/EV}^{j,m,dch}(t)\Delta t \quad \forall\, j,m,t \qquad (۱٦)$$

$$SOC_{BESS/EV}^{j,m,min}(t) \le SOC_{BESS/EV}^{j,m}(t) \le SOC_{BESS/EV}^{j,m,max}(t), \forall\, j,m,t \qquad (۱۷)$$

از سوی دیگر، از آنجا که عمر باتری به چرخه‌های شارژ و دشارژ وابسته است، تعداد سیکل‌های تغییر حالت بین شارژ و دشارژ باید مطابق رابطهٔ (۱۸) محدود شود. برای هر ریزشبکه، میزان بار قطع‌شدنی باید کمتر از حداکثر توان کاهش بار باشد (رابطهٔ ۱۹):

$$\left|\kappa_{BESS/EV}^{j,m,ch}(t) - \kappa_{BESS/EV}^{j,m,ch}(t-1)\right| \le N_{BESS/EV}^{state} \quad \forall\, j,m,t \qquad (۱۸)$$

$$0 \le P_{ID}^{j,m}(t) \le P_{ID}^{j,max}, \ \forall\, j,m,t \qbreak (۱۹)$$

۲-۲ فرمول‌بندی مسئله برای شبکهٔ توزیع (DN)

مسئلهٔ مدیریت بهره‌برداری شبکهٔ توزیع را می‌توان در قالب یک روال بهینه‌سازی فرمول‌بندی کرد که هدف آن بیشینه‌سازی سود عملیاتی کلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی شبکه است. تابع هدف برای مدیریت انرژی DN در ادامه آورده شده است:

$$OF: Min \sum_{t=1}^{n_t}\Bigg[\left(\sum_{k=1}^{n_{MG}} C_{Ex}^{k}(t)\,\beta_{Ex}^{K}(t) P_{Ex}^{K}(t)\right) + \left(\sum_{k=1}^{n_{DG}} C_{DG,D}^{k}(t)\,P_{DG,D}^{k}(t)\right) + \left(C_{UN}(t) P_{UN}(t) A_{UN}(t)\right) + C_{Cu,D}(t)\sum_{k=1}^{n_{Cu}}\left(P_{Cu,D}^{k}(t)\right)\Bigg], \forall\, k,t \qquad (۲۰)$$

در این رابطه، هزینهٔ بهره‌برداری شبکهٔ توزیع از اجزای زیر تشکیل شده است: هزینهٔ تبادل توان بین هر ریزشبکه و شبکهٔ توزیع، هزینهٔ تبادل توان بین DN و UN، هزینهٔ تولید توان توسط واحدهای تولید پراکنده واقع در محدودهٔ تحت پوشش خود DN. همچنین، درآمد کل از طریق فروش توان به هر ریزشبکه و همچنین مصرف‌کنندگان داخلی خود شبکه به دست می‌آید. در حل این تابع هدف، قید مربوط به تعادل توان در رابطهٔ (۲۱) آورده شده است. در این رابطه، کمبود/مازاد توان DN می‌تواند از طریق جابجایی توان با ریزشبکه‌ها و شبکه UN صورت پذیرد. به علاوه، مدیریت منابع پراکندهٔ موجود در این شبکه به تعادل توان بسیار کمک می‌کند:

$$\sum_{k=1}^{n_{DG}} P_{DG,D}^{k}(t) + \sum_{k=1}^{n_{MG}} \beta_{Ex}^{K}(t) P_{Ex}^{k}(t) + P_{UN}(t) = \sum_{k=1}^{n_{Cu}} P_{Cu,D}^{k}(t), \forall\, k,t \qquad (۲۱)$$

روابط (۲۲) و (۲۳) به عنوان قیود مربوط به کنترل جابجایی توان بین DN و UN در نظر گرفته شده است:

$$P_{UN}^{min} \le P_{UN}(t) \le P_{UN}^{max}, \forall t \qquad (۲۲)$$

$$Q_{UN}^{min} \le Q_{UN}(t) \le Q_{UN}^{max}, \forall t \qquad (۲۳)$$

همچنین، محدودیت‌های تولید واحدهای پراکندهٔ قابل برنامه‌ریزی (مشابه روابط (۷) و (۸))، محدودیت‌های پاسخ رمپ واحدهای تولید پراکندهٔ قابل برنامه‌ریزی (مشابه روابط (۹) و (۱۰))، محدودیت توان مبادله‌شده بین ریزشبکه‌ها و DN (مشابه رابطهٔ (٦)) و محدودیت‌های دامنهٔ ولتاژ (مشابه

رابطهٔ (۱۳)) در هر مرحله لحاظ می‌شود.

۳- الگوریتم تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شدهٔ تطبیقی مقاوم (RA-SCE)

الگوریتم SCE یک روش نسبتاً هوشمندِ بهینه‌سازی با قابلیت زیاد برای حل توابع چندهدفهٔ متشکل از تعداد زیادی متغیر است که برخلاف روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی، نیازی به محاسبهٔ اطلاعات اضافی مانند شیب یا مشتقات جزئی ندارد [۲۹]. با توجه به ویژگی‌های مثبت، امروزه این الگوریتم برای حل مسائل مختلف در انواع زمینه‌ها مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است [۳۰] و [۳۱].

این الگوریتم یک روش جست‌وجوی سراسری است که شامل دو سطح جمعیت اولیه و مجتمع‌ها[۲۲] است. در ابتدا، این روش با تعدادی جمعیت اولیهٔ توزیع‌شده و منتخب از یک فضای جست‌وجوی ممکن شروع می‌شود و سپس، این جمعیت به صورت مساوی در تعدادی مجتمع از پیش تعیین‌شده تقسیم می‌شوند. در مرحلهٔ بعدی، تمامی مجتمع‌ها به صورت مجزا با استفاده از روش تکامل مجتمع رقابتی (CCE)[۲۳]، شروع به تکامل می‌کنند و اجزای جمعیت خود را بهبود می‌بخشند. در واقع، روش CCE به منظور جایگزین‌کردن بدترین عضو جمعیت استفاده می‌شود و جست‌وجو را به سمت بهترین راه‌حل هدایت می‌کند (مرحلهٔ تکامل)[۲۴]. در انجام این کار، نسخهٔ تطبیق‌یافتهٔ روشِ نلدر–مید سیمپلکس[۲۵] استفاده می‌شود که در هر مرحله، با استفاده از مفهوم فرایندهای انعکاس و انقباض، برای پیداکردن عضوی بهتر از جمعیت در فضای جست‌وجوی از پیش تعیین‌شده، جست‌وجو می‌کند. گفتنی است، اگر بعد از این مرحله، جواب‌های پیداشده در فضای جست‌وجو نباشند یا مطلوب‌تر از جواب قبل نباشند، یک عمل دیگر به عنوان جهش برای یافتن یک جوابِ جایگزین به صورت رندوم در فضای جست‌وجوی مسئله صورت می‌گیرد. بعد از تعدادی مشخص از تکامل نسل‌ها، تمامی مجتمع‌ها با هم مخلوط می‌شوند و یک مجتمع بزرگ متشکل از به اشتراک گذاشتن ویژگی تمام عضوهای جمعیت مجتمع‌ها ایجاد خواهد شد (مرحلهٔ مخلوط‌شدن)[۲۶]؛ بنابراین، چنین استنباط می‌شود که این الگوریتم قابلیت زیادی برای جست‌وجوی سراسری دارد. این دو مرحله در تعدادی چرخهٔ از پیش تعیین‌شده تکرار می‌شوند تا بهترین جواب در محدودهٔ فضای حل مسئله تعیین شود.

به عنوان جمع‌بندی، برخلاف سایر الگوریتم‌های مرسوم مانند الگوریتم ژنتیک (GA)[۲۷] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[۲۸]، الگوریم SCE مزایای فرایندهای جست‌وجوی مستقیم قطعی و تکامل اتفاقی را با هم ترکیب می‌کند؛ در نتیجه، این الگوریتم یک مکانیسم قابل قبول را برای جست‌وجوی سراسری فراهم می‌کند. این مزایا مشخصات کلیدی هستند که نویسندهٔ مقالهٔ حاضر را برای استفاده از این الگوریتم و بهبود آن با هدف ایجاد یک الگوریتم بهینه‌سازیِ با درصد موفقیت زیاد و سرعت همگرایی خوب ترغیب کرده‌اند. با نگاهی به پژوهش‌های پیشین، می‌توان نتیجه گرفت در کنار سرعت همگرایی زیاد این الگوریتم، یک خلأ قابل ملاحظه وجود دارد؛ این مشکل زمانی اتفاق می‌افتد که در روند CCE شایسته‌ترین اعضای جمعیت به عنوان فرزندان انتخاب نشوند [۳۱]. در واقع، در این رویه، بهبود اعضای جمعیتِ با شایستگی کم، با استفاده از نقطهٔ مرکز ثقلی که میانگین سایر اعضای جمعیت است، انجام می‌شود و این در حالی است که برازندگی اعضای جمعیت روی این میانگین تأثیرگذار نیست. به همین منظور، الگوریتم SCE ممکن است برای جست‌وجو در فرایندهای انعکاس و انقباض بر اساس این مرکز ثقل راهکاری مناسب ارائه ندهد و در نتیجه، در فرایند آن، فرزندان با شایستگی زیاد تولید نشوند. به عبارت دیگر، فضای جست‌وجو در طول روند تکامل مجتمع‌ها محدود است و اعضای جمعیت با شایستگی زیاد شانس خود را برای انتخاب به عنوان فرزند از دست می‌دهند؛ از این رو، ممکن است جواب‌های نهایی بهینه‌ترین جواب‌های مسئله نباشند و الگوریتم دچار همگرایی زودرس و گیرافتادن در نقاط بهینهٔ محلی شود.

به منظور مقابله با این مشکل و افزایش انعطاف جست‌وجوی محلی، تعدادی از پژوهشگران سعی در بهبود این الگوریتم با اضافه‌کردن مراحل اضافی در رویهٔ CCE کرده‌اند [۳۰]. این مقاله به استفاده از فرایندهای بیشتری در کنار انعکاس و انقباض اشاره دارد (انبساط و انقباض خارجی). به علاوه، بعضی از پژوهشگران با هدف مقابله با نواقص این

الگوریتم، سعی در ترکیب آن با سایر الگوریتم‌ها کرده‌اند [۳۱]. با عنایت به مطالعات انجام‌شده در این زمینه، می‌توان بیان کرد اگرچه در مقاله‌های اشاره‌شده در بالا، راهکارهایی نوآورانه برای بهبود الگوریتم SCE ارائه شده‌لند و نتایجی قابل قبول نیز حاصل شده است، این رویکردها باعث پیچیدگی الگوریتم شده‌اند و ممکن است در حل مسائل چندهدفه با تعدادهای متغیرهای زیاد مانند مسائل مطرح در شبکه‌های مبتنی بر NMG، دچار مشکل و افزایش زمان همگرایی شویم؛ از این رو، در این بخش با هدف حفظ سادگی روند این الگوریتم و افزایش سرعت همگرایی، رویکردی نوآورانه ارائه شده است که الگوریتم را با انجام جست‌وجوهای هدفمند، از جست‌وجوهای کورکورانه مصون می‌کند. در روش RA-SCE پیشنهادی، فرایند یادگیری بین‌مجتمعی مدنظر قرار گرفته است که الگوریتم را از یک ساختار موازیِ صرفاً مستقل، به یک سوپرساختار همکارانه ارتقا می‌دهد. این کار با ایجاد یک جریان اطلاعاتی هوشمند محقق می‌شود که بر اساس عملکرد لحظه‌ای مجتمع‌ها هدایت می‌شود. در نهایت، این مکانیسم به تسریع همگرایی، کاهش خطر گیرافتادن در بهینه‌های محلی و استفادهٔ کارآمدتر از ارزیابی‌های تابع هدف منجر می‌شود. در مرحلهٔ نهایی از الگوریتم پیشنهادی، یکپارچه‌سازی هوشمندانهٔ نتایج مجتمع‌ها و استفاده از یک معیار توقف ترکیبی و قوی تضمین می‌کند الگوریتم: (۱) از تمام دانش کشف‌شده توسط مجتمع‌های موازی به بهترین شکل استفاده می‌کند، (۲) در تعادلی بهینه بین دقت جواب نهایی و کارایی محاسباتی عمل می‌کند و (۳) به صورت خودکار و بدون نیاز به تنظیم دستی، در مناسب‌ترین زمان ممکن متوقف می‌شود؛ در نتیجه، نوآوری‌های کلیدی روش RA-SCE پیشنهادی در مقایسه با روش SCE کلاسیک عبارت‌اند از:

۱. معماری چندراهبردی تطبیقی: انتخاب خودکار بهترین راهبرد بر اساس عملکرد تاریخی برای انطباق با ویژگی‌های مسئله و افزایش کارایی الگوریتم

۲. شبکهٔ انتقال دانش پویا: یادگیری تعاملی بین مجتمع‌ها و اشتراک‌گذاری اطلاعات مؤثر برای تسریع همگرایی و جلوگیری از تکرار محاسبات تکراری

۳. مکانیسم نظارت سلامت: تشخیص به‌موقع همگرایی زودرس و اعمال درمان‌های متناسب برای بازیابی کارایی و حفظ تنوع جمعیت

٤. تقسیم‌بندی وزنی پویا: تخصیص منابع محاسباتی بر اساس عملکرد لحظه‌ای هر مجتمع برای بهینه‌سازی استفاده از منابع و تمرکز بر نواحی امیدبخش

در ادامه، مراحل الگوریتم بهینه‌سازی RA-SCE پیشنهادی در ۷ مرحله به صورت زیر ارائه شده است:

- **مرحلهٔ ۱ (مقداردهی اولیه):**

این مرحله با تولید جمعیت اولیه با استفاده از توزیع نرمالِ قطع‌شده آغاز می‌شود تا اطمینان حاصل شود نقاط اولیه به طور یکنواخت در فضای جست‌وجو توزیع شده‌اند و از تمرکز در نواحی خاص جلوگیری شود. در این مرحله، با قطع‌کردن توزیع در بازهٔ [۰، ۱]، تولید نقاط خیلی نزدیک به کران پایین (LB)[۲۹] و کران بالا (UB)[۳۰] محدود و در نتیجه، از تولید نقاط افراطی جلوگیری می‌شود. برای این کار، فرمول‌نویسی جمعیت اولیه از طریق رابطهٔ (۲٤) صورت می‌پذیرد:

$$x_{i,j} = LB_j + \psi_{i,j} \cdot \left(UB_j - LB_j\right), i = 1, \dots, s, j = 1, \dots, n \quad (۲٤)$$

که در آن، $\psi_{i,j} \sim \mathcal{N}(0.5, 0.15)$. با انتخاب میانگین ۰/۵، بیشتر نقاط در مرکز فضای جست‌وجو تولید می‌شوند. همچنین، انحراف معیار ۰/۱۵ باعث می‌شود نقاط به طور متعادل در اطراف میانگین پراکنده شوند.

- **مرحلهٔ ۲ (ارزیابی و تحلیل ساختاری جمعیت):**

در این مرحله، ابتدا هر نقطهٔ x_i در جمعیت ارزیابی می‌شود تا مقدار تابع برازندگی F_i بر اساس رابطهٔ (۲۵) محاسبه شود:

$$F_i = OF(x_i), \quad i = 1, \dots, s \quad (۲۵)$$

پس از ارزیابی نقاط، هر مجتمع j به طور جداگانه تحلیل می‌شود. نقاط در هر مجتمع بر اساس مقادیر F_i رتبه‌بندی و مرتب می‌شوند (از بهترین به بدترین). سپس، شاخص کیفیت Q_j با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_j = \frac{\sum_{k=1}^{m} exp\left(-\frac{k-1}{\sigma}\right) \cdot F_{(k)}^{j}}{\sum_{k=1}^{m} F_{(k)}^{j}}, \forall j, m, k \quad (۲٦)$$

$$\sigma = max\left(1, \frac{m}{4}\right), \forall\, m \qquad (۲۷)$$

که در آن، صورت کسر یک مجموع وزن‌دار از مقادیر تابع هدف نقاط در مجتمع j است. وزن هر نقطه برابر $\exp\left(-\frac{k-1}{\sigma}\right)$ است که به صورت نمایی با افزایش k (یعنی بدترشدن رتبهٔ نقطه) کاهش می‌یابد. این وزن‌دهی باعث می‌شود نقاط بهتر (با k کوچک‌تر) تأثیر بیشتری در محاسبهٔ Q_j داشته باشند. پارامتر σ کنترل می‌کند که وزن‌ها چطور کاهش می‌یابند. اگر σ بزرگ باشد، وزن‌ها کندتر کاهش می‌یابند و نقاط بیشتری در محاسبه مشارکت می‌کنند. اگر σ کوچک باشد، وزن‌ها سریع کاهش می‌یابند و فقط نقاط بسیار خوب تأثیر زیاد دارند. مقدار σ وابسته به m است تا با اندازهٔ مجتمع سازگار شود. شاخص Q_j برای ارزیابی عملکرد هر مجتمع استفاده می‌شود و در مراحل بعدی الگوریتم نقش کلیدی دارد؛ به نحوی که مجتمع‌های با Q_j پایین‌تر (یعنی کیفیت بهتر) در تخصیص منابع اولویت می‌گیرند. در روش پیشنهادی، این شاخص به انتقال دانش بین مجتمع‌ها کمک می‌کند؛ زیرا مجتمع‌های باکیفیت متفاوت می‌توانند از یکدیگر یاد بگیرند.

- **مرحلهٔ ۳ (تقسیم‌بندی پویا و وزنی):**

در این مرحله، یک مکانیسم تخصیص منابع مبتنی بر عملکرد به کار گرفته می‌شود. هدف از این مرحله توزیع هوشمندانهٔ نقاط جمعیت (یا منابع محاسباتی) بین مجتمع‌های مختلف بر اساس کیفیت و عملکرد هر یک است. این رویکرد موجب می‌شود مجتمع‌هایی که عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند، سهم بیشتری از منابع را دریافت کنند که در نهایت، به کارایی بیشتر و همگرایی سریع‌تر الگوریتم منجر می‌شود. در این خصوص، وزن نسبی jامین مجتمع از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$w_j = \frac{Q_j + \epsilon}{\sum_{i=1}^{p}(Q_i + \epsilon)}, \forall\, j, i \qquad (۲۸)$$

که در آن، وزن w_j نشان‌دهندهٔ سهم یا اهمیت مجتمع j در مقایسه با سایر مجتمع‌هاست و مبنای تخصیص منابع قرار می‌گیرد. این وزن یک مقدار نرمال‌شده بین ۰ و ۱ است؛ به طوری که مجموع وزن‌های تمامی مجتمع‌ها برابر ۱ می‌شود. متغیر p تعداد کل مجتمع‌ها و ϵ یک ثابت عددی بسیار کوچک (10^{-8}) در نظر گرفته شده است که برای جلوگیری از بروز خطای محاسباتی در مواردی که کیفیت یک یا چند مجتمع (Q_j) بسیار نزدیک به صفر یا دقیقاً صفر باشد، به صورت جمعی به همهٔ کیفیت‌ها اضافه می‌شود. این کار اطمینان حاصل می‌کند مخرج کسر هرگز صفر نشده است و در نتیجه، مجتمع‌های با کیفیت بسیار کم نیز شانسی اندک برای دریافت منابع خواهند داشت؛ اگرچه این شانس به طرزی قابل ملاحظه کمتر از مجتمع‌های با کیفیت زیاد است.

پس از محاسبهٔ وزن هر مجتمع، رابطهٔ (۲۹) برای محاسبهٔ تعداد واقعی نقاطی در نظر گرفته شده است که به مجتمع jام اختصاص می‌یابند. این عدد با m_j نشان داده می‌شود. این مرحله نظریهٔ وزن‌ها را به یک تخصیص عملی و قابل اجرا تبدیل می‌کند؛ در نتیجه، مجتمع‌های با عملکرد برتر نه فقط از نظر نظری، وزن بیشتری دارند، بلکه در عمل نیز با داشتن اعضای بیشتر، قدرت جست‌وجوی بیشتری در ناحیهٔ امیدبخش اطراف خود پیدا می‌کنند. این راهبرد تخصیص منابع محاسباتی را بهینه و الگوریتم را به سمت نواحی با پتانسیل بیشتر در فضای جست‌وجو هدایت می‌کند:

$$m_j = \lfloor w_j \cdot s \rfloor, \forall\, j \qquad (۲۹)$$

که در آن، متغیر s اندازهٔ کل جمعیت است که از حاصل‌ضرب تعداد اولیهٔ مجتمع‌ها (p) در لندازهٔ اولیهٔ هر مجتمع (m) محاسبه می‌شود ($s = p \times m$). از آنجا که حاصل‌ضرب $w_j \cdot s$ ممکن است یک عدد صحیح نباشد، عملگر جزء صحیح عدد حاصل را به نزدیک‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر یا مساوی گرد می‌کند تا تعداد نقاط مقداری صحیح و معقول باشد.

- **مرحلهٔ ٤ (یادگیری بین‌مجتمعی پیشرفته):**

هدف از این مرحله شکستن انزوا و استقلال مجتمع‌ها و ایجاد یک شبکهٔ یادگیری پویا بین آنهاست. این مکانیسم با امکان تبادل هدفمند اطلاعات بین مجتمع‌ها، از یک سو، سرعت همگرایی به سمت نواحی امیدبخش را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر، با تزریق ایده‌های جدید، از وقوع همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند.

این مرحله مبتنی بر یک ماتریس دانش است که به صورت پویا و مبتنی بر عملکرد مجتمع‌ها به‌روز می‌شـــود. این فرایند شامل دو گام اصلی به‌روزرسانی ماتریس دانش و سپس اعمال انتقال دانش اســـت که به ترتیب از طریق روابط (۳۰) تا (۳۲) محاسبه می‌شوند:

$$K_{j,i}^{t+1} = (1-\rho)K_{j,i}^{t} + \rho \cdot \frac{exp(-\gamma \cdot \Delta Q_{j,i})}{\sum_{k \neq j} exp\,(-\gamma \cdot \Delta Q_{j,k})}, \forall\, j,i,k \quad (۳۰)$$

$$\Delta Q_{j,i} = |Q_j - Q_i| + \epsilon, \forall\, j,i \quad (۳۱)$$

$$x_{new}^{j} = x_{old}^{j} + \tau \sum_{i \neq j} K_{j,i} \cdot (\bar{x}^{i} - \bar{x}^{j}) + \mathcal{N}(0, \sigma_{noise}), \forall\, j,i \quad (۳۲)$$

در رابطهٔ (۳۰)، $K_{j,i}^{t+1}$ میزان ارتباط دانشی است که مجتمع j در تکرار آینده $(t+1)$ از مجتمع i دریافت خواهد کرد و $K_{j,i}^{t}$ میزان ارتباط دانشی در تکرار جاری (t) است. مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ اســـت. متغییر ρ نرخ به‌روزرســـانی دانش اســـت. این پارامتر تعیین می‌کند ماتریس دانش با چه ســـرعتی خود را با شـــرایط جدید تطبیق دهد. مقادیر کوچک‌تر باعث یادگیری تدریجی و پایدار می‌شـــوند، در حالی که مقادیر بزرگ‌تر واکنش ســـریع‌تر به تغییرات را به همراه دارند. متغییر γ به عنوان پارامتر انتشـار در نظر گرفته شـده اسـت $(\gamma \geq 0)$. این پارامتر کنترل می‌کند تفاوت کیفیت بین مجتمع‌ها تا چه حـد بر انتقـال دانش تـأثیر بگـذارد. مقـادیر بزرگ‌تر γ بـاعـث می‌شوند مجتمع‌ها تمایل بیشتری برای یادگیری از مجتمع‌های با کیفیت بسیار مشابه خود داشته باشند (یادگیری محلی‌شده). $\Delta Q_{j,i}$ اختلاف مطلق کیفیت بین مجتمع j و مجتمع i اســـت که فاصـــلهٔ عملکردی بین دو مجتمع را اندازه‌گیری می‌کند. x_{new}^{j} نمایندهٔ جدید ایجادشـــده در مجتمع j بر اســـاس دانش انتقال‌یافته و x_{old}^{j} نقطه‌ای از مجتمع j اســـت که به عنوان پایه برای ایجاد نقطهٔ جدید در نظر گرفته می‌شـــود (نقطهٔ میانه یا مرکز ثقل مجتمع). τ ضـریب یادگیری یا نرخ انتقال اسـت که اندازهٔ گام برداشـته‌شـده در جهت انتقال دانش را کنترل می‌کند $(0 \leq \tau \leq 1)$. در این پژوهش، $\tau = 0.2$ که به اعمال ملایم و پایدار دانش منجر می‌شـــود. همچنین، $\mathcal{N}(0, \sigma_{noise})$ یک نویز گاوسی با میانگین صـفر و انحراف معیار σ_{noise} اسـت که افزودن آن برای حفظ تنوع در جمعیـت و جلوگیری از هم‌شـــکلی بیش از حد نقاط تحت تأثیر انتقال دانش در نظر گرفته شـــده اســـت و امکان کاوش تصـــادفی اطراف نقطهٔ ایجادشده را فراهم می‌کند.

- **مرحلهٔ ۵ (فرایند تکامل سه‌گانهٔ تطبیقی):**

این مرحله از الگوریتم RA-SCE هســـتهٔ اصـــلی فرایند بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهد که در آن، هر مجتمع به صورت مستقل و با بهره‌گیری از یک چارچوب تطبیقی پیشرفته تکامل می‌یابد. این چارچوب سه مؤلفهٔ اصلی را به صورت هماهنگ و پویا با یکدیگر تلفیق می‌کند: انتخاب راهبرد پویا، الگوریتم تکـامـل تفـاضـــلی (DE)[۳۱] تطبیقی و روش ســـیمپلکس انعطاف‌پذیر. هدف از این ادغام ایجاد تعادل هوشـــمندانه بین دو قابلیت کلیدی اکتشـــاف (جســـت‌وجوی ســـراســـری) و بهره‌برداری (جســـت‌وجوی محلی) در طول فرایند بهینه‌ســـازی است.

مرحلهٔ ۵-۱: انتخاب راهبرد پویا: این مکانیسم به صورت پویا کارایی هر راهبرد را ردیابی و احتمال انتخاب آن را بر اساس سابقهٔ عملکرد تنظیم می‌کند. این رویکرد انعطاف‌پذیری الگوریتم را افزایش می‌دهـد و امکـان تطبیق بـا ویژگی‌هـای مختلف مسئله را فراهم می‌کند. محاسبهٔ کارایی از طریق رابطهٔ (۳۳) قابل محاســـبه اســـت و در نتیجه، احتمال انتخاب اعضـــا توسط رابطهٔ (۳٤) تعیین می‌شود:

$$\eta_s = \frac{\sum \Delta F_i}{\sum \Delta F_t + \epsilon}, \forall\, j,t \quad (۳۳)$$

$$P_s = \frac{\eta_s}{\sum \eta_{all}} \quad (۳٤)$$

که در این روابط، ΔF_i مجموع بهبودهای حاصـل‌شـده در تابع هدف توسط این راهبرد، ΔF_t مجموع مطلق تمام تغییرات ایجادشـــده در تابع هدف و $\sum \eta_{all}$ حاصـل‌جمع مقادیر کارایی تمامی راهبردهای فعال در الگوریتم پیشنهادی است و به عنوان

عامل نرمال‌سازی در محاسبهٔ احتمال انتخاب هر راهبرد عمل می‌کند.

مرحلهٔ ۵-۲: راهبرد DE تطبیقی هوشمند: ضریب مقیاس در DE به صورت تطبیقی بر اساس میزان پیشرفت محلی تنظیم می‌شود. این تنظیم پویا باعث تعادل خودکار بین جست‌وجوی سراسری و محلی می‌شود و کارایی الگوریتم را در مراحل مختلف بهینه‌سازی در شبکه‌های چندعاملی در شرایط بهره‌برداری نرمال و خودترمیم بهبود می‌بخشد. در این خصوص، تولید بردار جهش و به‌روزرسانی ضریب مقیاس در الگوریتم تفاضلی به ترتیب از طریق روابط (۳۵) و (۳٦) انجام می‌شود:

$$v_i = x_{r1} + F_j \cdot (x_{r2} - x_{r3}) + \lambda \cdot (x^j_{\text{best}} - x_i), \forall\, j, i \quad (۳۵)$$

$$F_j = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \cdot \frac{\arctan(\pi \cdot \frac{\Delta F_j}{\Delta F_{\max}})}{\pi/2}, \forall\, j \quad (۳٦)$$

که در آنها، λ یک ضریب وزنی است که میزان تأثیر و گرایش بردار جهش به سمت بهترین نقطهٔ مجتمع (x^j_{best}) را کنترل می‌کند. این پارامتر عاملی کلیدی برای تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری در مرحلهٔ جهش است. در این پژوهش، $\lambda = 0.4$ که برای الگوریتم پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند تا هم‌زمان امکان جست‌وجو در ناحیهٔ اطراف بهترین نقطه فراهم شود، و با اثرگذاری بیشتر، جست‌وجو بر اساس تفاضل نقاط تصادفی ($x_{r2} - x_{r3}$) انجام شود که باعث اکتشاف جست‌وجوی سراسری بیشتر و جلوگیری از گیرکردن در بهینه‌های محلی می‌شود. $F_{\max} = 0.9$ و $F_{\min} = 0.4$ به ترتیب کران‌های پایین و بالا برای ضریب مقیاس در الگوریتم تفاضلی، ΔF_j میانگین بهبود در تابع هدف برای مجتمع jام در چند نسل اخیر و $\Delta F_{\max}$ حداکثر بهبود مشاهده‌شده در بین تمام مجتمع‌هاست.

مرحلهٔ ۵-۳: راهبرد سیمپلکس انعطاف‌پذیر: ضریب انعکاس در این راهبرد به صورت پویا بر اساس اختلاف کیفیت بین بهترین و بدترین نقطهٔ سیمپلکس تنظیم می‌شود. این تنظیم خودکار باعث می‌شود نرخ اکتشاف و بهره‌برداری بهینه شود و الگوریتم بتواند به طور مؤثرتر فضای جست‌وجو را کاوش کند. در این خصوص، ضریب انعکاس از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_j = \alpha_{min} + (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \cdot \frac{arctan(\frac{F_w - F_b}{|F_b| + \epsilon})}{\pi/2} \quad (۳۷)$$

$$r = g + \alpha_j \cdot (g - x_w), \forall\, j \quad (۳۸)$$

در این روابط، $\alpha_{min} = 0.8$ و $\alpha_{max} = 1.2$ کران‌های پایین و بالا برای ضریب انعکاس در روش سیمپلکس، F_w مقدار تابع هدف در بدترین نقطهٔ سیمپلکس (x_w)، F_b مقدار تابع هدف در بهترین نقطهٔ سیمپلکس و g بردار میانگین موزون (مرکز ثقل) تمام نقاط تشکیل‌دهندهٔ سیمپلکس جاری در یک مجتمع است، به‌جز بدترین نقطه (x_w) که بیشترین مقدار تابع هدف را دارد. هدف اصلی از محاسبهٔ مرکز ثقل به عنوان یک نقطهٔ مرجع باکیفیت برای انجام عمل انعکاس (r) استفاده می‌شود. این کار باعث می‌شود جست‌وجو از ناحیه‌ای که توسط بدترین نقطه نمایندگی می‌شود (ناحیهٔ با کیفیت کم) فاصله بگیرد و به سمت نواحی با میانگین کیفیت بیشتر حرکت کند.

- **مرحلهٔ ٦ (مکانیسم نظارت و بازآرایی هوشمند):**

این مرحله به عنوان یک سیستم پایش سلامت برای هر مجتمع عمل می‌کند. با محاسبهٔ مداوم شاخص سلامت برای هر مجتمع، الگوریتم قادر است مشکلاتی مانند همگرایی زودرس، کاهش تنوع و رکود در جست‌وجو را به‌موقع تشخیص دهد و اقدامات اصلاحی مناسب را اعمال کند. رابطهٔ (۳۹) برای محاسبهٔ امتیاز سلامت مجتمع در نظر گرفته شده است:

$$H_j^{score} = a \cdot \rho_j + b \cdot \vartheta_j^{rate} + c \cdot \epsilon_j^{con}, \forall\, j \quad (۳۹)$$

که در آن، ρ_j شاخص تنوع در مجتمع jام و از رابطهٔ (٤۰) قابل محاسبه است، ϑ_j^{rate} نرخ بهبود در این مجتمع است که

طبق رابطهٔ (٤١)، به صورت یک میانگین زمانی از دفعات بهبود در بهترین مقدار تابع هدف هر مجتمع طی k نسل اخیر محاسبه می‌شود. $\epsilon_j^{con} = 10^{-6}$ سطح همگرایی در این مجتمع است. a، b و c وزن هر معیار در محاسبهٔ امتیاز نهایی سلامت هستند که در این پژوهش، به ترتیب ۰/٤، ۰/٤ و ۰/۲ در نظر گرفته شده‌اند. در روش پیشنهادی، با مطالعهٔ شاخص سلامت برای هر مجتمع، در صورتی که $H_j^{score} \leq 0.3$ باشد، آنگاه ٦۰ درصد از جمعیت بازتولید می‌شود و سپس الگوریتم تا رسیدن به معیار همگرایی ادامه پیدا می‌کند.

$$\rho_j = \frac{1}{m_j \cdot D} \sum_{i=1}^{m_j} ||\mathrm{x}_i^j - \bar{\mathrm{x}}^j||_2, \forall\, j, i \qquad (٤٠)$$

$$\vartheta_j^{rate} = \frac{1}{k} \sum_{t=U-k}^{U} \mathbb{I}\,(\Delta F_{best}^j(t) < 0), \forall\, j, t, k \qquad (٤١)$$

که در این روابط، m_j تعداد اعضای موجود در مجتمع j (مطابق خروجی مرحلهٔ ۳)، x_i^j بردار موقعیت نقطهٔ iام در مجتمع j و D قطر فضای جست‌وجو است که در مرحلهٔ ۱ تعریف شده است ($D = \| \mathrm{UB} - \mathrm{LB} \|_2$)، $\bar{\mathrm{x}}^j$ میانگین هندسی تمام نقاط مجتمع و $\mathbb{I}(.)$ تابع نشانگر است که اگر شرط درون آن برقرار باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت، ۰ است، $\Delta F_{best}^j(t)$ تغییر در مقدار تابع هدف بهترین نقطهٔ مجتمع j در نسل t و U شمارهٔ نسل جاری است.

- **مرحلهٔ ۷ (ادغام هوشمند و توقف):**

این مرحله مسئولیت دو وظیفهٔ مهم را به عهده دارد: (۱) ادغام هوشمند: ترکیب دانش و دستاوردهای مجتمع‌های مختلف در یک قالب ساختاریافته و (۲) توقف بهینه: تصمیم‌گیری برای خاتمهٔ فرایند بهینه‌سازی در مناسب‌ترین زمان ممکن که بر اساس مراحل زیر صورت می‌گیرد:

مرحلهٔ ۷-۱: مخلوط وزنی[۳۲] (ادغام هوشمند): این فرایند با الهام از مرحلهٔ مخلوط‌کردن در الگوریتم SCE کلاسیک [۲۹]، اما به صورت پیشرفته‌تر، با استفاده از رابطهٔ (٤۲) انجام می‌شود. هدف ایجاد یک جمعیت سراسری جدید از طریق ترکیب هوشمندانهٔ مجتمع‌ها، با در نظر گرفتن کیفیت هر یک است که باعث تسریع در همگرایی نهایی می‌شود:

$$x_{new} = \frac{\sum_{j=1}^{p} w_j \cdot C_j}{\sum w_j} + \mathcal{N}(0, \sigma_s), \forall\, j \qquad (٤٢)$$

که در آن، w_j وزن مجتمع jام است که از مرحلهٔ ۳ محاسبه شده و نشان‌دهندهٔ کیفیت نسبی مجتمع است، C_j نمایندهٔ مجتمع jام است که بهترین نقطهٔ مجتمع (x_{best}^j) در نظر گرفته شده است و $\mathcal{N}(0, \sigma_s)$ یک جزء نویز گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار $\sigma_s = 0.05(UB - LB)$ برای تزریق تنوع کنترل‌شده در فرایند ادغام است.

مرحلهٔ ۷-۲: توقف بهینه: در الگوریتم RA-SCE پیشنهادی، تشخیص زمان بهینه برای توقف اجرای الگوریتم بر اساس یک معیار توقف ترکیبی مطابق رابطهٔ (٤۳) انجام می‌شود. این معیار برخلاف روش SCE که فقط یک شرط (مانند عدم بهبود یا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار) را بررسی می‌کند، از یک منطق ترکیبی استفاده می‌کند. این کار از توقف زودرس (در صورت بهبود آهسته اما پیوسته) و نیز ادامهٔ بی‌فایدهٔ محاسبات (در صورت رسیدن به همگرایی) جلوگیری می‌کند. این منطق ترکیبی عبارت است از دو شرط لازم که عبارت‌اند از: شرط اول (عدم بهبود ناچیز): بررسی می‌کند آیا بهبود نسبی در بهترین جواب در طول k نسل اخیر از یک حد آستانهٔ بسیار کوچک کمتر شده است یا خیر. این امر نشان می‌دهد الگوریتم در یافتن راه‌حل‌های بهتر بسیار کند شده است، و شرط دوم (تنوع کم): بررسی می‌کند آیا تنوع کلی جمعیت به زیر یک آستانهٔ بحرانی سقوط کرده است یا خیر. این امر نشان می‌دهد جمعیت به‌شدت متمرکز شده است و پتانسیل کمی برای اکتشاف نواحی جدید وجود دارد. در نهایت، توقف فقط زمانی اتفاق می‌افتد که هر دو شرط به طور هم‌زمان برقرار باشند. اگر فقط شرط اول برقرار باشد (بهبود کند اما تنوع زیاد)، الگوریتم همچنان پتانسیل اکتشاف و بهبود را دارد. اگر فقط شرط دوم برقرار باشد (تنوع کم اما بهبود پیوسته)، الگوریتم ممکن است در حال همگرایی بهینه به سمت جواب بهینه باشد:

$$\text{if } \left(\frac{|F_{best}^{t}-F_{best}^{t-k}|}{|F_{best}^{t-k}|}<\epsilon_{imp}\right)\wedge(\rho<\epsilon_{con}) \Rightarrow \text{Stop}, \forall\, t,k \qquad (٤٣)$$

که در آن، F_{best}^{t} بهترین مقدار تابع هدف یافت‌شده در نسل جاری (t)، F_{best}^{t-k} بهترین مقدار تابع هدف یافت‌شده در $k=10$ نسل قبل، $\epsilon_{imp}=10^{-8}$ حداقل بهبود نسبی قابل قبول در تابع هدف و $\wedge$ عملگر "AND" است.

لازم به تأکید است که به علت ساختار غیرمتمرکزِ روش پیشنهادی، هماهنگی در این معماری گسسته، نه از طریق یک الگوریتم هماهنگ‌کنندهٔ مرکزی، بلکه به صورت ضمنی و از طریق مکانیسم‌های تعاملی حاصل می‌شود. هر عامل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی محلی خود به دنبال بهینه‌سازی تابع هدف خود است و این بهینه‌سازی محلی در پاسخ به سیگنال‌های دریافتی از سایر عامل‌ها صورت می‌گیرد. در واقع، الگوریتم RA-SCE در سطح هر عامل ابزاری است برای تصمیم‌گیری هوشمندانه و یافتن بهترین پاسخ به شرایط لحظه‌ای که نتیجهٔ تعامل با سایر عامل‌هاست. ویژگی‌های پیشرفتهٔ این الگوریتم، مانند یادگیری بین‌مجتمعی و تطبیق‌پذیری، به هر عامل کمک می‌کنند تا در این محیط تعاملی پویا، سریع‌تر و دقیق‌تر به تعادل بهینه دست یابد. به این ترتیب، مجموعه‌ای از عامل‌های خودمختار که هر یک با RA-SCEبهینه‌سازی می‌شوند، از طریق مکانیسم‌های تعاملی قیمت و اولویت‌بندی، به یک راه‌حل هماهنگ و نزدیک به بهینهٔ سراسری برای کل سیستم NMG همگرا می‌شوند. این ساختار به صورت یکپارچه در الگوریتم (۱) ارائه شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی، بحث و گفت‌وگو

در این بخش، شبیه‌سازی‌ها در یک نسخهٔ اصلاح‌شده از سیستم آزمون قابلیت اطمینان انجام می‌شوند تا کارایی روش پیشنهادی نشان داده شود. برای این منظور، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، از نسخهٔ اصلاح‌شدهٔ سیستم توزیع RBTS-IEEE (شین ٦) [۳۲] برای مطالعهٔ موردی استفاده می‌شود. این شبکه در مقایسه با دیگر شبکه‌های آزمون، مزایایی مفید دارد؛ از جمله دسترسی به داده‌های قابلیت اطمینان برای اجزای اصلی. شبکهٔ توزیع در شین ٦، یک شبکهٔ شهری متداول با مجموعاً ٤۰ نقطه بار متشکل از مشترکین تجاری، صنعتی کوچک، کشاورزی و مسکونی است. نسخهٔ اصلاح‌شده شامل ۲۹۳۸ مشترک است که به پنج بخش مجزا با بارها و منابع انرژی پراکندهٔ مربوط به خود تفکیک شده‌اند. این نسخهٔ اصلاح‌شده سیستم NMG نامیده می‌شود که دارای چهار ریزشبکه (با نام‌های $MG1$ تا $MG4$) و DN است. بر اساس مقادیر عددی پذیرفته‌شده در این مطالعه، در شرایط بهره‌برداری عادی و با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع، همهٔ ریزشبکه‌ها ظرفیت تولید کافی برای تأمین تقریبی بارهای خود را دارند؛ همچنین، این ریزشبکه‌ها به یکدیگر و به DN متصل هستند و می‌توانند بر اساس راهبرد بهره‌برداری و تصمیم عامل مربوط، انرژی مبادله کنند. اطلاعات تفصیلی شبکهٔ آزمون در جدول (۱) نشان داده شده است. پارامترهای پایهٔ این شبکه و طول خطوط اصلی (L_1-L_{64}) را می‌توان در مرجع [۳۲] یافت. همچنین، طول دیگر خطوط (L_a-L_k) حدود ۰/٦ کیلومتر فرض شده است.

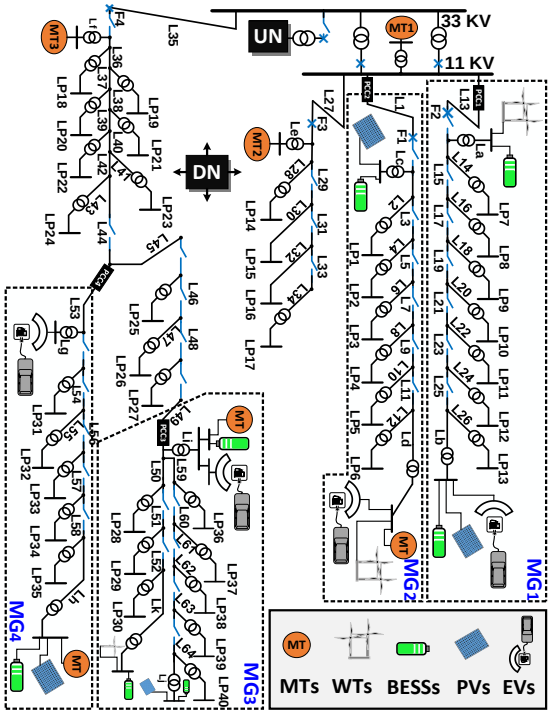
داده‌های قابلیت اطمینان واحدهای تولید پراکندهٔ قابل کنترل از مرجع [۳۳] اخذ شده‌اند. همچنین، نرخ خرابی ترانسفورماتور، زمان تعمیر خط توزیع و زمان جایگزینی ترانسفورماتورها از مرجع [۳٤] اقتباس شده است. از این مقاله، می‌توان دریافت خطوط و کابل‌ها نرخ خرابی دارند که وابستگی چشمگیری به طول آنها دارد؛ در نتیجه، فیدرهای اصلی (L_1-L_{64}) برای سطح ولتاژ ۱۱ کیلوولت نرخ خرابی $L\times$ ۰/۰٦٥ خرابی در سال و برای سطح ولتاژ ۳۳ کیلوولت نرخ خرابی $L\times$ ۰/۰٤٦ خرابی در سال دارند.

از سوی دیگر، وقوع خطا در شبکهٔ بالادست اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین، مقادیر میانگین زمان تا تعمیر $(1/\mu)$ و میانگین زمان تا خرابی $(1/\lambda)$ برای شبکهٔ بالادست به ترتیب ۲ و ۱٤٦۰ ساعت در نظر گرفته شده‌اند [۳٥]. برخی از اجزا (مانند دستگاه‌های حفاظتی، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری، خودروهای برقی و غیره) که در نظر گرفته نشده‌اند، ۱۰۰ درصد قابل اطمینان فرض شده‌اند.

الگوریتم (۱): ساختار روش پیشنهادی RA-SCE

Input: Problem dimension n, Bounds LB, UB, Number of complexes p, Initial complex size $m \Rightarrow$ total population $s = p \times m$,
Stopping parameters ε_{imp}, ε_{con}, window size k
Output: Global best solution $x_{\text{global}}^{\text{best}}$ and its fitness $F_{\text{global}}^{\text{best}}$
Stage 1: Initialization
1.1 Generate initial population P of size s using truncated normal distribution:
For $i = 1$ to s:
For $j = 1$ to n:
$\psi \sim \mathcal{N}(0.5,\ 0.15)$
$\psi \leftarrow \max(0, \min(1, \psi))$
$x_{i,j} = LB_j + \psi \cdot (UB_j - LB_j)$
1.2 Evaluate each individual: $F_i = OF(x_i)$ (objective function value).
Stage 2: Main Optimization Loop
while stopping criterion not met **do**
Stage 3: Evaluation and Structural Analysis
3.1 Partition P into p complexes $C_1, \dots, C_p$, each initially of size m.
3.2 **for each** complex C_j **do**
Sort members in ascending order of fitness.
Compute quality index: $Q_j = \frac{\sum_{k=1}^{m} exp\left(-\frac{k-1}{\sigma}\right) \cdot F_{(k)}^{j}}{\sum_{k=1}^{m} F_{(k)}^{j}}$, $\forall\, j, m, k;\ \sigma = max\left(1, \frac{m}{4}\right),\ \forall\, m$
end for
Stage 4: Dynamic Weighted Partitioning (Resource Allocation)
for each complex C_j **do** $w_j = \frac{Q_j + \varepsilon}{\sum_{i=1}^{p}(Q_i + \varepsilon)}$, $\varepsilon = 10^{-8}$, $m_j = \lfloor w_j \cdot s \rfloor$
Adjust size of C_j to m_j (total population remains s).
end for
Stage 5: Advanced Inter-Complex Learning (Knowledge Transfer)
5.1 Update knowledge transfer matrix K:
for each complex j **do**
for each other complex $i \neq j$ **do** $\Delta Q_{j,i} = |Q_j - Q_i| + \varepsilon$, $p_{j,i} = \frac{\exp(-\gamma \cdot \Delta Q_{j,i})}{\sum_{k \neq j} \exp(-\gamma \cdot \Delta Q_{j,k})}$, $K_{j,i}^{t+1} = (1-\rho) K_{j,i}^{t} + \rho \cdot p_{j,i}$
end for
end for
5.2 **for each** complex j **do** $x_{\text{new}}^{j} = x_{\text{old}}^{j} + \tau \sum_{i \neq j} K_{j,i} \left(\bar{x}^{i} - \bar{x}^{j}\right) + \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{noise}})$
end for
Stage 6: Adaptive Triple-Stage Evolution for Each Complex
for each complex C_j **in parallel do**
6.1: Dynamic Strategy Selection
for each strategy $s \in$ {DE_Adaptive, Simplex_Flexible} **do** $\eta_s = \frac{\sum \Delta F_s}{\sum \Delta F_{\text{total}} + \varepsilon}$, $P_s = \frac{\eta_s}{\sum \eta_{\text{all}}}$
end for
Select strategy according to its probability P_s.
6.2: If DE strategy selected: Compute adaptive scaling factor: $F_j = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \cdot \frac{\arctan\left(\pi \frac{\Delta F_j}{\Delta F_{\max}}\right)}{\pi/2}$
for each individual i in C_j **do** $v_i = x_{r1} + F_j \cdot (x_{r2} - x_{r3}) + \lambda \cdot (x_{\text{best}}^{j} - x_i)$
end for Perform crossover and selection as per standard DE.
6.3: If Simplex strategy selected
Identify best (x_b, F_b) and worst (x_w, F_w) points in the simplex.
Compute dynamic reflection coefficient: $\alpha_j = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \cdot \frac{\arctan\left(\frac{F_w - F_b}{|F_b| + \varepsilon}\right)}{\pi/2}$
Centroid g of all points except x_w.
Reflection point $r = g + \alpha_j \cdot (g - x_w)$.
Replace x_w with r if r improves fitness.
end for
Stage 7: Health Monitoring and Intelligent Rearrangement
for each complex C_j **do**
Diversity index
$\rho_j = \frac{1}{m_j \cdot D} \sum_{i=1}^{m_j} \| x_i^{j} - \bar{x}^{j} \|_2, \quad D = \| UB - LB \|_2$
Improvement rate
$\theta_j^{\text{rate}} = \frac{1}{k} \sum_{t=U-k}^{U} \mathbb{I}\left(\Delta F_{\text{best}}^{j}(t) < 0\right)$
Health score
$H_j^{\text{score}} = a\, \rho_j + b\, \theta_j^{\text{rate}} + c\, \varepsilon_{\text{con}}, \quad a = 0.4,\ b = 0.4,\ c = 0.2$
if $H_j^{\text{score}} \leq 0.3$ **then** Reinitialize 60% of the members of C_j randomly.
end if
end for
Stage 8: Intelligent Merging and Stopping Criterion
8.1 Build new population P_{new}: **for each** complex C_j **do** $x_{\text{new}} = \frac{\sum_{j=1}^{p} w_j \cdot x_{\text{best}}^{j}}{\sum w_j} + \mathcal{N}(0, \sigma_s)$
end for
Add these new points to P_{new}.
8.2 Update global best solution $(x_{\text{global}}^{\text{best}}, F_{\text{global}}^{\text{best}})$.
8.3 Check combined stopping criterion: **if** $\frac{|F_{\text{global}}^{t} - F_{\text{global}}^{t-k}|}{|F_{\text{global}}^{t-k}|} < \varepsilon_{\text{imp}}$ **and** $\rho_{\text{total}} < \varepsilon_{\text{con}}$ **then**
break
end if
end while
Stage 9: Termination
return $x_{\text{global}}^{\text{best}}$, $F_{\text{global}}^{\text{best}}$

مقاومت و راکتانس خطوط همهٔ ریزشبکه‌ها و DN از مرجع [۳٦] گرفته شده است. باید توجه داشت، در تحلیل پخش بار، ضریب توان ۰/۹ برای همهٔ بارهای اشاره‌شده در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، توان راکتیو هر نقطهٔ بار با اطلاعات جدول (۱) تعیین می‌شود که در ادامه ارائه خواهد شد.



شکل (۲): پیکربندی شبکهٔ آزمون تحت مطالعه

با در نظر گرفتن اطلاعات بالا، از روش نمونه‌برداری تصادفی به نام نمونه‌برداری انتقال حالات[۳۳] [۳۵] برای شبیه‌سازی شرایط خطا و ایجاد یک رخداد احتمالی استفاده می‌شود که فرایند آن در بخش ضمایم ارائه شده است. گفتنی است، از آنجا که مدیریت انرژی پیشنهادی مبتنی بر مکانیسم برنامه‌ریزی ساعتی-آینده است، فقط برنامه‌ریزی بازهٔ زمانی بعدی اجرا می‌شود؛ بنابراین، امکان وقوع خطا برای بازهٔ زمانی بعدی در نظر و اثرات آن در بازهٔ زمانی جاری نادیده گرفته شده است. با این حال، برای بخش‌های متصل به شبکه، بهره‌برداران می‌توانند از بازار زمان واقعی استفاده کنند. به بیان دیگر، هنگامی که در بازهٔ زمانی جاری یک رخداد احتمالی رخ می‌دهد، از آنجا که هماهنگی بین عوامل به زمان کافی نیاز دارد، عامل مربوط می‌کوشد با استفاده از روش پیشنهادی و برنامه‌ریزی منابع موجود در بازه‌های زمانی آینده، راهبرد خود را برای بازهٔ زمانی بعدی تغییر دهد. اقدامات مرتبط با بازهٔ زمانی بعدی اجرا می‌شود و این روند تا پایان خطا ادامه می‌یابد.

هزینهٔ بهره‌برداری از واحدهای PV و WT برابر صفر فرض شده است. در همهٔ شرایط عادی، خروجی‌های در دسترس این واحدها به طور کامل استفاده می‌شوند. این یک سیاست الزام‌آور و تشویقی برای پشتیبانی از انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب و موجی می‌شود تا این تجهیزات پس از سرمایه‌گذاری اولیهٔ زمانی ملزم به تولید پیوسته باشند.

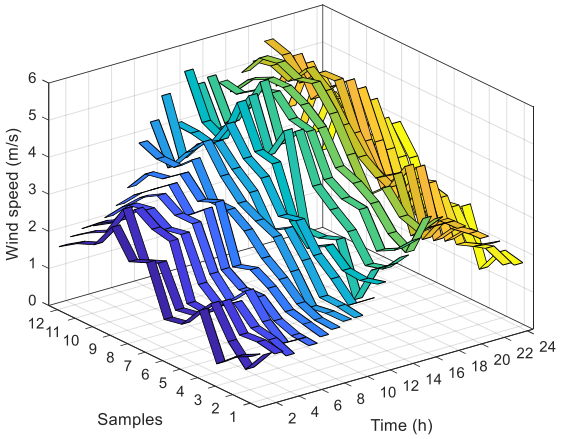
همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی و در نظر گرفتن ماهیت غیرقابل پیش‌بینی و متناوب منابع تجدیدپذیر، برای هر فصل از سه نوع مدل سرعت ساعتی باد استفاده می‌شود. به بیان دیگر، در هر روز از فصل‌ها، یکی از سه نمونه به صورت تصادفی برای برنامه‌ریزی انتخاب می‌شود؛ نمونه‌های ۱-۳ برای فصل تابستان، ٤-٦ برای فصل پاییز، ۷-۹ برای فصل زمستان و ۱۰-۱۲ برای فصل بهار در نظر گرفته شده‌اند. برای این کار، داده‌های باد از مرجع [۳۷] اخذ شده است. همچنین، فرض شده است WTها از یک نوع هستند. علاوه بر این، برای کارایی محاسباتی بیشتر، برای سیستم NMG مورد مطالعه، از دو نوع تابش خورشیدی در هر فصل استفاده شده است که به ترتیب نمونه‌های ۱ و ۲ برای فصل زمستان، ۳ و ٤ برای فصل پاییز، ۵ و ٦ برای فصل بهار و در نهایت، نمونه‌های ۷ و ۸ برای فصل تابستان برنامه‌ریزی شده‌اند (شکل ٤ را ببینید). گفتنی است، فرض شده است RESها در حالت ردیابی نقطه حداکثر توان، کار می‌کنند. پارامترها و ظرفیت‌های نامی منابع انرژی پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

قیمت ساعتی توان الکتریکی از مرجع [۳۸] به دست آمده و هزینهٔ بهره‌برداری واحد ذخیره‌ساز از مرجع [۳۹] اقتباس شده است. گفتنی است، ضریب قدرت برای MTها برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، تولید توان راکتیو صورت پذیرفته و قابل برنامه‌ریزی است.

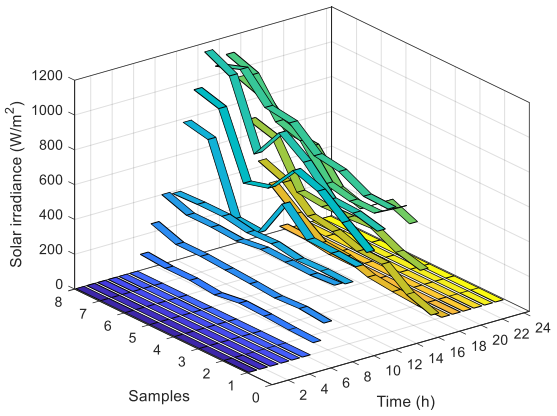
جدول (۱): اطلاعات مربوط به شبکهٔ آزمون تحت مطالعه و زیربخش‌های موجود

واحدها	نقاط بار	نوع مشترک	سطح بار به‌ازای هر نقطهٔ بار (MW)		تعداد مشترکین
			بیشینه	متوسط	
DN	14, 17	تجاری (C)	0.8500	0.4697	1
	15	صنعتی کوچک (SI)	1.9670	1.6391	1
	16	SI	1.0830	0.9025	1
	18,23	مسکونی (R)	0.2964	0.1659	147
	19	R	0.3229	0.1808	126
	20	کشاورزی (A)	0.6517	0.2501	1
	21	A	0.6860	0.2633	1
	22	R	0.3698	0.2070	132
	24	A	0.7965	0.3057	1
	25	R	0.2776	0.1554	79
	26	A	0.7375	0.2831	1
	27	R	0.2831	0.1585	76
MG1	1, 3	R	0.3171	0.1775	138
	2, 4	R	0.3229	0.1808	126
	5, 6	R	0.3864	0.2163	118
MG2	7, 8, 10	R	0.2964	0.1659	147
	9	R	0.3171	0.1775	138
	11	R	0.3229	0.1808	126
	12, 13	R	0.3698	0 2070	132
MG3	28, 36	R	0.2776	0.1554	79
	29, 39	R	0.2831	0.1585	76
	30	A	0.6517	0.2501	1
	37	A	0.5025	0 1929	1
	38	A	0.7375	0.2831	1
	40	A	0.7965	0.3057	1
MG4	31	R	0.2776	0.1554	79
	32	A	0.5025	0.1929	1
	33	R	0.2831	0.1585	76
	34	A	0.6517	0.2501	1
	35	A	0.6860	0.2633	1

برای این مطالعه، شارژرهای EVها در پارکینگ‌های ثابت نصب شده و سطوح توان شارژ و دشارژ نیز مطابق استانداردهای مشخص، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در واقع، پارکینگ‌ها به عنوان تجمع‌دهنده‌های بار در نظر گرفته می‌شوند تا کل توان شارژ و دشارژ EVها تعیین شود. در هر پارکینگ، EVها مطابق ساختار خودروی برقی یوشیتا [۴۰]، به بستهٔ باتری ۲۲ کیلووات‌ساعتی مجهز هستند. افزون بر این، حالت شارژ (SOC)[۳۴] و تعداد این خودروها درون پارکینگ‌ها با استفاده از مدل‌سازی تصادفی انرژی مرجع [۴۱] و داده‌های مرجع [۴۲] تعیین می‌شود. سپس، بار ناشی از زمان شارژ این خودروها پس از این رویه تعیین می‌شود. در این راستا، اطلاعات تفصیلی پارکینگ‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل (۳): داده‌های نمونه‌برداری از سرعت باد در فصول مختلف سال



شکل (٤): داده‌های نمونه‌برداری از تابش خورشید در فصول مختلف سال

جدول (۲): اطلاعات مربوط به منابع تولید پراکندهٔ نصب‌شده در هر زیربخش

واحدها	نوع	بیشینهٔ ظرفیت (kW)
DN	MTs_1	600
	MTs_2	800
	MTs_3	1200
MG1	WTs	1100
	PVs	600
	Each BESS	250
MG2	WTs	850
	PVs	600
	MTs	500
	BESSs	500
MG3	MTs	1300
	WTs	1100
	PVs	700
	Each BESS	200
MG4	PVs	1400
	MTs	500
	BESSs	400

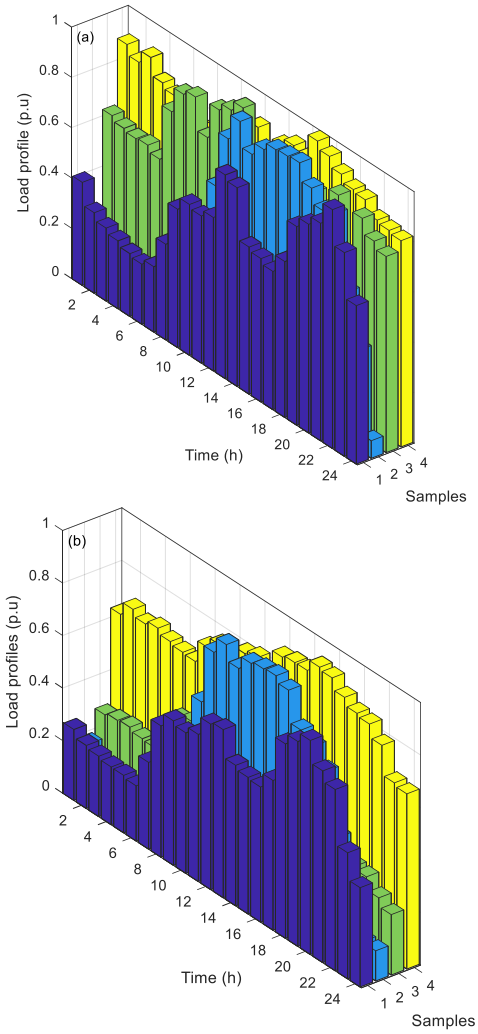
جدول (۳): اطلاعات مربوط به پارکینگ‌های موجود در هر زیربخش برای EVها

زیربخش‌ها	بیشینهٔ تعداد EVها	زمان‌های دسترسی برای دشارژ	میزان SOC در دسترس برای هر دورهٔ زمانی	
MG1 & MG2	80	6:00-13:00 & 18:00-23:00	10%	SOC<20
			25%	20≤SOC<30
			35%	30≤SOC<40
			20%	40≤SOC<60
			10%	SOC≥60
MG3 & MG4	60	9:00-14:00 &17:00-0:24:00	5%	SOC<20
			20%	20≤SOC<30
			45%	30≤SOC<40
			25%	40≤SOC<50
			5%	SOC≥50

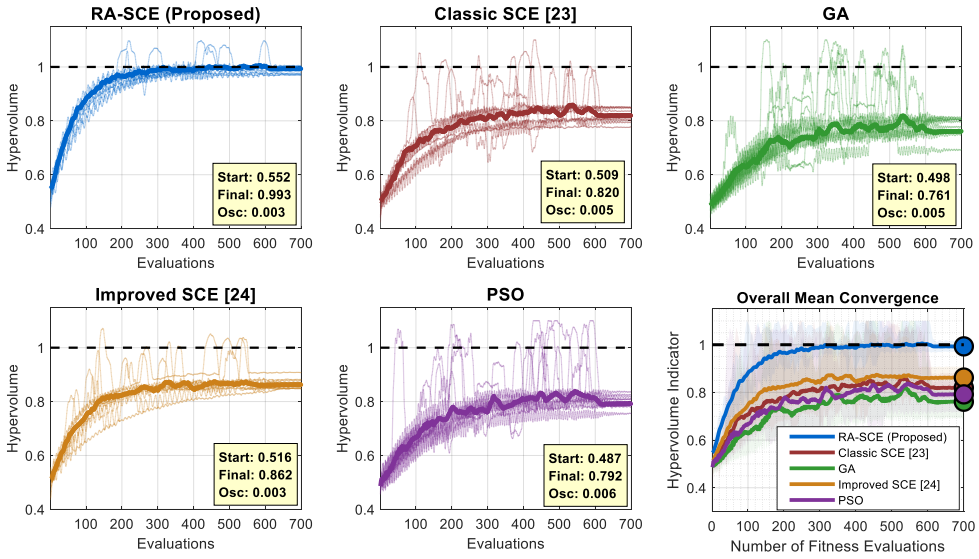
پروفایل‌های روزانهٔ بارهای مورد مطالعه در شکل (۵) [٤۳] و [٤٤] ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد پروفایل برای چهار نوع بار به طرزی قابل ملاحظه متفاوت است؛ برای مثال، سیستم در ماه‌های تابستان و بهار تقاضای کشاورزی بیشتری دارد. در این شکل، نمونه‌های ۱ تا ٤ به ترتیب برای بارهای مسکونی، تجاری، کشاورزی و صنعتی در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه، بارهای قابل قطع فقط در دو بازهٔ زمانی در دسترس هستند: ساعت ۱۱ صبح تا ۲ بعدازظهر و ساعت ٦ بعدازظهر تا ۹ شب. علاوه بر این، ۸ درصد از بارهای مسکونی ریزشبکه‌های ۱ و ۲، به علاوهٔ ٤ درصد از بارهای مسکونی به همراه ۵ درصد از بارهای کشاورزی ریزشبکه‌های ۳ و ٤ به عنوان بارهای قابل قطع در نظر گرفته شده‌اند که مکان آنها به صورت تصادفی انتخاب شده است.

با هدف نمایش تولنایی بهینه‌سازی روش بهینه‌سازی پیشنهادی، قبل از اعمال بر شبکهٔ آزمون، نتایج شبیه‌سازی برای شاخص ابرحجم[۳۵] هنگام استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی استخراج و در شکل (٦) نمایش داده شده است. این شاخص نمایش می‌دهد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی (RA-SCE) نسبت به الگوریتم‌های زیر در حل توابع هدف برتری دارد: (الف) روش SCE کلاسیک [۲۹]، (ب) روش GA، پ) روش SCE بهبودیافته [۳۰]، (ت) روش PSO. در مطالعهٔ این شاخص، چنین استنباط می‌شود که الگوریتم RA-SCE با سرعت بیشتری همگرا می‌شود و به مقادیر بیشینهٔ شاخص ابرحجم دست می‌یابد. این شاخص با هدف بررسی نتایج مسائل مختلف بهینه‌سازی چندهدفه به صورت عددی و مقایسهٔ آنها استفاده می‌شود [٤۵]. به این ترتیب، برای درک بهتر چگونگی همگرایی الگوریتم پیشنهادی به جبههٔ بهینهٔ پارتو، هر الگوریتم حداکثر برای ۳۰۰ ارزیابی برازش اجرا شده و مقادیر شاخص ابرحجمِ مجموعه‌های تقریب‌زدهٔ پارتو در هر نسل محاسبه شده است. برای تجسم سرعت همگرایی، نتایج در شکل (٦) نشان داده شده است که در آن، محور افقی تعداد

ارزیابی‌های برازش و محور عمودی مقادیر شـاخص ابرحجم را با اجرای الگوریتم‌های مختلف به تصویر کشیده است.



شکل (۵): داده‌های مربوط به پروفایل‌های روزانهٔ بارهای مورد مطالعه؛ (الف) تابستان و بهار و (ب) پاییز و زمستان



شکل (٦): داده‌های شاخص ابرحجم روش RA-SCE پیشنهادی در مقایسه با چهار روش مطرح دیگر

برای تأیید اثربخشی روش پیشنهادی، مقایسهٔ نتایج پنج مورد مطالعاتی که در ادامه ارائه شده است، به طور جداگانه بررسی می‌شود. گفتنی است، برای تمامی موارد مطالعاتی، ظرفیت‌های انتقال توان تمامی نقاط اتصال مشترک در حداکثر مقدار خود ۱/۲ مگاوات در نظر گرفته شده است. همچنین، در موارد مطالعاتی ۱ تا ۵، کلیهٔ خودروهای برقی موجود در پارکینگ‌ها می‌توانند هم در حالت شارژ از شبکه و هم در حالت تزریق توان به شبکه عمل کنند. بر اساس روش مدیریت انرژی پیشنهادی، هر بازهٔ زمانی معادل ۱ ساعت تنظیم شده و بهره‌برداری سیستم در چهار فصل متوالی تا زمان برآورده‌شدن معیارهای همگرایی شبیه‌سازی شده است. گفتنی است، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب روی یک رایانهٔ شخصی با پردازندهٔ ۳/۲ گیگاهرتز از نوع Ryzen-5800H و حافظهٔ رم ۱۶ گیگابایت انجام شده است.

- **مورد مطالعاتی ۱:** مدیریت انرژی همهٔ عامل‌ها در حالت ناهماهنگ. در این حالت، هیچ‌گونه انتقال توانی بین نقاط اتصال مشترک مختلف وجود ندارد.
- **مورد مطالعاتی ۲:** برنامه‌ریزی بهینه برای هر دو شرایط بهره‌برداری خطا و عادی، بر اساس توابع چندهدفه با وزن ثابت $(\omega_{i1}, \omega_{i2}, \omega_{i3}) = (0.25, 0.25, 0.5)$.
- **مورد مطالعاتی ۳:** برنامه‌ریزی بهینه برای هر دو شرایط خطادار و عادی، بر اساس فرمولاسیون مسئلهٔ پیشنهادی (تابع چندهدفه با وزن متغیر)، در حالی که از الگوریتم SCE کلاسیک [۲۹] به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی مسئله استفاده شده است.
- **مورد مطالعاتی ٤ (روش پیشنهادی):** برنامه‌ریزی بهینه برای هر دو شرایط بهره‌برداری خطا و عادی، بر اساس فرمول‌نویسی مسئلهٔ پیشنهادی (تابع چندهدفه با وزن متغیر)، در حالی که از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی (RA-SCE) به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی مسئله استفاده شده است.
- **مورد مطالعاتی۵:** مشابه مورد مطالعاتی ٤، با این تفاوت که از الگوریتم SCE بهبودیافته [۳۰] به عنوان حل‌کنندهٔ مسئله استفاده شده است.

با در نظر گرفتن موارد بالا، کل بار قطع‌شده و زمان‌های خاموشی هر نقطهٔ بار ثبت می‌شود تا شاخص‌های مطرح قابلیت اطمینان نقاط بار مشترکین در سیستم NMG مورد مطالعه با استفاده از روابط ٤٤ و ٤٥ محاسبه شوند [٤٣]. این دو رابطه بیانگر میزان انرژی تأمین‌نشده (ENS)[۳۶] با واحد $\left(\frac{W\text{att.Hour}}{\Delta t.N_t}\right)$ و میانگین انرژی تأمین‌نشده (AENS)[۳۷] با واحد $\left(\frac{W\text{att.Hour}}{\text{Customer}.\Delta t.N_t}\right)$ برای هر یک از نقاط بار هستند و نتایج آنها در شکل‌های (۷) و (۸) خلاصه شده‌اند.

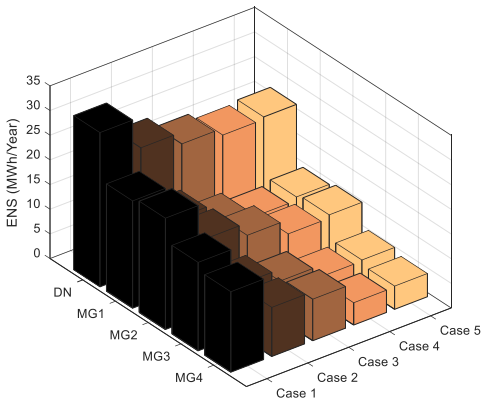
$$ENS = \frac{8760}{\Delta t.N_t}\sum_{c=1}^{N_c}\sum_{t=1}^{N_t} L_a^c(t)U_c(t) \qquad (٤٤)$$

$$AENS = \frac{\frac{8760}{\Delta t.N_t}\sum_{c=1}^{N_c}\sum_{t=1}^{N_t} L_a^c(t)U_c(t)}{N_c} \qquad (٤٥)$$

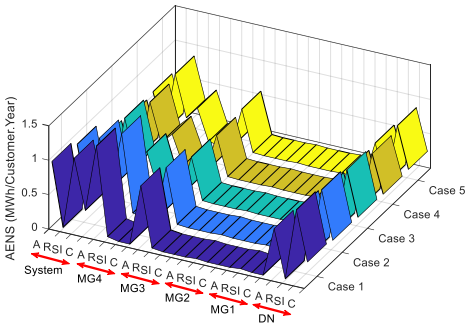
نتایج استخراج‌شده نشان می‌دهد بیشترین افزایش در دسترس‌پذیری سیستم در مورد مطالعاتی ٤ رخ می‌دهد؛ به این معنا که هنگام وقوع رخداد احتمالی خطا، عاملان سیستم قابلیت اطمینان تأمین توان الکتریکی برای بارهای محلی خود را به طرزی قابل ملاحظه افزایش می‌دهند. این امر به این دلیل است که با در نظر گرفتن تابع چندهدفه با وزن متغیر در فرمول‌نویسی مسئله، منابع محلی می‌توانند با ظرفیت زیاد خود در شرایط احتمالی بیشتری استفاده شوند، در حالی که ملاحظات اقتصادی نادیده گرفته می‌شوند؛ در نتیجه، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم (ENS و AENS) تحت راهبرد پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود، بهبودی چشمگیر یافته‌اند و این بهبود عملتاً در کاهش وقفه و زمان خاموشی سیستم بازتاب یافته است. از این دیدگاه، همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی قابل استنباط است (شکل‌های ۷ و ۸ را ببینید)، اجرای الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی (RA-SCE) می‌تواند تاب‌آوری سیستم NMG را در برابر وقفه‌های غیرقابل پیش‌بینی به طرزی معنادار افزایش دهد و نقشی به ویژه مهم در کاهش قطع بار در کل سیستم ایفا کند. در واقع، مطابق نتایج شبیه‌سازی، بهبودی معادل ۳۹/۱۲ درصد در مقادیر ENS از مورد مطالعاتی ۱ به ٤ مشاهده می‌شود. همچنین، بهبودهایی به ترتیب معادل ۱۷/۱٤، ۷/٤٤ و ۵/۰۸ درصد در مقادیر ENS از موارد مطالعاتی ۲، ۳ و ۵ نسبت به مورد مطالعاتی ٤ حاصل شده است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی در مورد مطالعاتی ۱، مشترکین داخل سیستم NMG با حداکثر خطر زمان‌های خاموشی مواجه هستند؛ بنابراین، مشاهده می‌شود شاخص‌های قابلیت

اطمینان در مورد مطالعاتی ۱ تنزل یافته‌اند. همچنین، مورد مطالعاتی ۲ مربوط به فرمول‌نویسی متعارف مسئله است که به طور گسترده در سیستم‌های ریزشبکه استفاده می‌شود. در این حالت، توجه کمتری به مدت‌های وقفه شده است؛ زیرا در هر دو حالت بهره‌برداری عادی و خطا، توابع هدف دارای وزن‌های ثابت هستند. همچنین، مسائل مربوط به سیستم (OF_1 و OF_2) در مقایسه با مسائل اقتصادی (OF_3) وزن کمتری دارند؛ در نتیجه، در مقایسه با موارد مطالعاتی ۳ تا ۵، این روش احتمال خرابی اجزای سیستم را دست‌کم می‌گیرد؛ بنابراین، به نتیجه‌گیری بدبینانه‌ای دربارهٔ زمان‌های خاموشی می‌رسد؛ در نتیجه، مشترکین بیشتری در داخل سیستم NMG در مقایسه با موارد مطالعاتی ۳ تا ۵ در معرض خطر زیاد خاموشی قرار می‌گیرند.



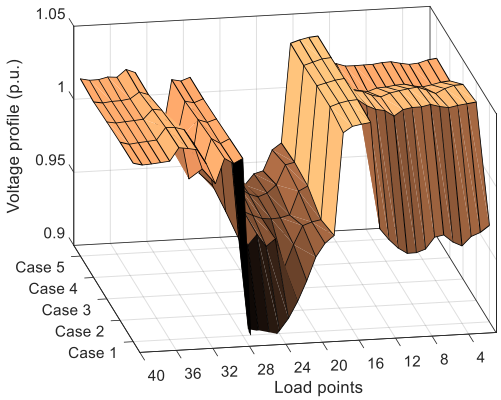
شکل (۷): داده‌های استخراج‌شده برای شاخص ENS مربوط به انواع بار و تمام زیرسیستم‌های شبکهٔ NMG تحت مطالعه



شکل (۸): داده‌های استخراج‌شده برای شاخص AENS مربوط به انواع بار و تمام زیرسیستم‌های شبکهٔ NMG تحت مطالعه

هنگامی که در DN یک رخداد احتمالی رخ می‌دهد، ریزشبکه‌ها در طول زمان تعمیر اجزای معیوب، نه فقط تأمین توان الکتریکی نقاط بار داخل خود را به عهده دارند، بلکه برای نقاط بار موجود در DN نیز توان الکتریکی تأمین می‌کنند. با توجه به اطلاعات جدول (۲)، مقادیر توان خروجی ریزشبکه‌ها به طور محتمل بین ۰ تا ۳/۶ مگاوات هستند. در عین حال، ظرفیت‌های انتقال توان نقاط اتصال مشترک ۱ تا ٤، برابر ۱/۲ مگاوات در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که توانایی ریزشبکه‌ها در تأمین نقاط بار خارجی محدود است؛ بنابراین، این امر به بهبود متعادل در قابلیت اطمینان برای بارهایی منجر می‌شود که در سمت دیگر خطا و نزدیک‌ترین ریزشبکه قرار دارند.

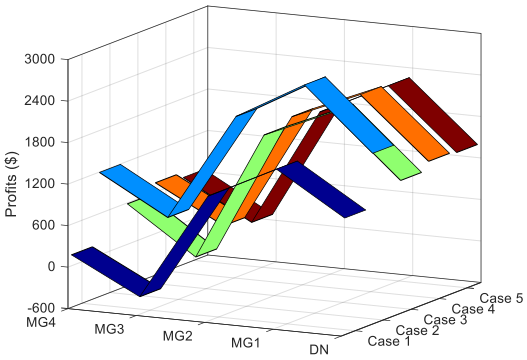
از سوی دیگر، روش حاضر با هدف کمینه‌سازی تغییرات کل ولتاژ (OF_2) بر اساس معادلهٔ (۳) عمل می‌کند؛ بنابراین، بررسی پروفایل ولتاژ در تمام نقاط بار سیستم توزیع موجود و تحلیل روش پیشنهادی ضروری است. از این نظر، شکل (۹) پروفایل ولتاژ هر شین از سیستم آزمون مورد مطالعه را نشان می‌دهد و مقادیر ولتاژ را برای همهٔ موارد مقایسه می‌کند. این داده‌ها برای یک روز معمولی در تابستان بین ساعات ۱۲ تا ۱۳ ظهر ثبت شده‌اند که سیستم در این بازه یک رویداد احتمالی در خط L_{35} (که در ساعت ۷ صبح رخ داده است) با زمان تعمیر ۸ ساعت را تجربه می‌کند. در این شرایط، ممکن است بخشی از DN نتواند توان مورد نیاز خود را از شبکهٔ بالادست دریافت کند. همچنین، ساختار DN موجود از نظر تولید توان به اندازهٔ کافی پاسخ‌گوی نیازهای ریزشبکه‌ها نیست؛ این وضعیت تا زمانی ادامه می‌یابد که بخش معیوب کابل به طور کامل تعمیر شود؛ در نتیجه، همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، در برخی از موارد، مقدار ولتاژ برخی از شین‌های واقع در بخش معیوب (از LP_{18} تا LP_{40}) مطلوب نبوده است که با اجرای روش پیشنهادی (مورد مطالعاتی ٤) به طور مناسب بهبود یافته‌اند.



شکل (۹): داده‌های استخراج‌شده برای پروفیل ولتاژ نقاط بار موجود در شبکهٔ تحت مطالعه

علاوه بر این، برای همان روز و همان رخداد احتمالی، مقادیر سود DN و هر ریزشبکه برای موارد مطالعاتی ۱ تا ۵ استخراج و در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. در حالتی که برای هر دو شرایط عملیاتی عادی و خطا، توابع هدف دارای وزن‌های ثابت هستند و همچنین، موضوع اقتصادی برای عاملان ریزشبکه‌ها در اولویتی بالاتر قرار دارد (مورد مطالعاتی ۲)، سود روزانهٔ ریزشبکه‌های ۳ و ٤ به ترتیب ٦۳۷/۰۷٤ و ۱۲۸۹/٤۳ دلار است. هنگامی که اهداف اقتصادی و سیستمی توسط عاملان اولویت‌بندی می‌شوند، مقادیر مرتبط به ترتیب ۲۸۰/۳۵ و ۸۱۵/٤٤ دلار هستند. نتایج حاکی از آن است که که برای یک روز معمولی که سیستم یک رخداد احتمالی را تجربه می‌کند، قابلیت اطمینان سیستم با در نظر گرفتن روش پیشنهادی (مورد مطالعاتی ٤) بهبود می‌یابد، اما در قبال کاهشی اندک در سود روزانهٔ بهره‌برداری از شبکه. از آنجا که تعداد روزهای تحت تأثیر خطاهای احتمالی محدود است، این کاهش سود را می‌توان در کل افق زمان بهره‌برداری (۱ سال) بسیار کوچک بیان کرد.

بنابراین، با در نظر گرفتن روش پیشنهادی، مسائل سیستم به طرزی قابل ملاحظه بهبود می‌یابند، در حالی که کل سود عملیاتی ممکن است کمی کاهش یابد که این امر می‌تواند تأثیر تابع چندهدفه با وزن متغیر پیشنهادی را بر نتایج برنامه‌ریزی منعکس کند. همچنین، مقدار مرتبط برای مورد مطالعاتی ۱ به‌شدت کاهش یافته است؛ به این دلیل که در هر دو زمان عملیاتی عادی و خطا، مدیریت انرژی بدون هماهنگی صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل‌های (٦) تا (۱۰) مشاهده می‌شود، نتایج مورد مطالعاتی ٤ به نتایج موردهای ۳ و ۵ نزدیک است، اما تفاوت آن قابل چشم‌پوشی نیست که دقت روش حل مسئلهٔ پیشنهادی (RA-SCE) را در مقایسه با SCE کلاسیک [۲۳] و SCE بهبودیافته [۲۹] تأیید می‌کند. جلب توجه است که از آنجا که هزینهٔ بهره‌برداری منابع انرژی تجدیدپذیر در این مقاله نادیده گرفته شده است، برخی از ریزشبکه‌ها در مقایسه با شبکه توزیع سود بیشتری دارند.



شکل (۱۰): داده‌های استخراج‌شده برای سود بهره‌برداری زیربخش‌های شبکهٔ آزمون تحت مطالعه

۵- نتیجه‌گیری

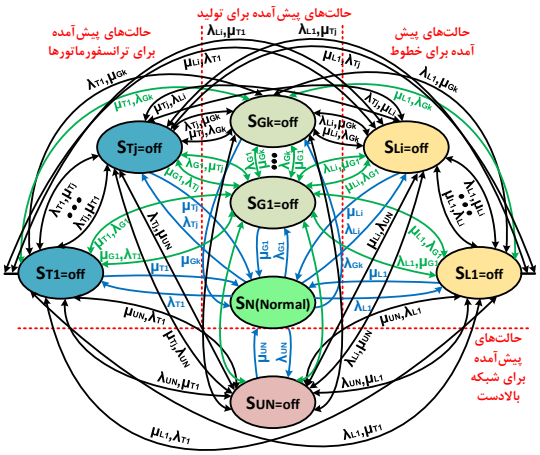
در این پژوهش، یک چارچوب مدیریت انرژی چندعاملی غیرمتمرکز برای شبکه‌های NMG مبتنی بر یک الگوریتم بهینه‌سازی نوین به نام RA-SCE ارائه شد. هستهٔ اصلی این چارچوب به عنوان یک فرمول‌بندی ریاضی یکپارچه مطرح شد که عملیات عادی و حالت خودترمیمی پس از وقوع خطا را در قالب یک تابع هدف چندمتغیره با وزن‌های پویا ادغام می‌کرد. الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از معماری چندراهبردی تطبیقی، شبکهٔ انتقال دانش پویا بین زیرجمعیت‌ها، مکانیسم نظارت سلامت و تخصیص وزنی پویای منابع محاسباتی، توانست تعادلی بهینه بین اهداف اقتصادی، قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ برقرار کند. ارزیابی عملکرد الگوریتم بر روی یک شبکهٔ آزمون اصلاح‌شدهٔ RBTS(شین ٦) نشان داد RA-SCE در مقایسه با الگوریتم‌های مرسوم مانند SCE کلاسیک، SCE بهبودیافته، GA و PSO، از سرعت همگرایی بیشتری و کیفیت جواب بهتری برخوردار است. شاخص ابرحجم برای الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی‌های برازش یکسان، مقادیری بالاتر را ثبت کرد که بیانگر دست‌یابی به جبههٔ پارتو برتر است. نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف خطا حاکی از آن بود که اجرای راهبرد پیشنهادی (مورد مطالعاتی ٤) به بهبود قابل ملاحظهٔ شاخص‌های قابلیت اطمینان منجر می‌شود؛ به گونه‌ای که شاخص ENS در مقایسه با حالت بدون هماهنگی (مورد ۱) به میزان ۳۹/۱۲ درصد بهبود یافت. همچنین، مقادیر ENS در روش پیشنهادی نسبت به موارد مطالعاتی ۲ (وزن‌های

ثابت)، ۳ (SCE کلاسیک) و ۵ (SCE بهبودیافته) به ترتیب ۱۷/۱٤، ۷/٤٤ و ۵/۰۸ درصد کاهش نشان دادند که تأییدی بر کارایی فرمول‌بندی وزنی پویا و الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند است. این بهبود در شاخص AENS نیز به میزان ۱۷/۱۹۵ درصد نسبت به مورد پایه مشهود بود. علاوه بر این، چارچوب پیشنهادی توانست پروفایل ولتاژ را در شرایط خطا (رخداد خطا در خط L_{35} با زمان تعمیر ۸ ساعت) به طور مؤثر بهبود بخشد و تمامی نقاط بار را در محدودهٔ مجاز ولتاژ حفظ کند، در حالی که در سایر موارد مطالعاتی، برخی از شین‌ها به ویژه LP_{18} تا LP_{40} دچار افت ولتاژ غیرمجاز شدند. اگرچه این بهبودهای چشمگیر در قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ با کاهش جزئی در سود اقتصادی روزانه (برای مثال، کاهش سود روزانهٔ ریزشبکهٔ ۳ از ٦۳۷/۰۷٤ دلار در مورد ۲ به ۲۸۰/۳۵ دلار در مورد ٤) همراه بود، با توجه به محدودبودن تعداد روزهای متأثر از خطاهای شدید در افق بهره‌برداری یک‌ساله، این کاهش سود در بلندمدت ناچیز و قابل قبول تلقی می‌شود. در مجموع، پژوهش حاضر نشان داد رویکرد ترکیبی فرمول‌بندی مسئله با وزن‌های پویا و الگوریتم بهینه‌سازی تطبیقی پیشنهادی، می‌تواند تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سیستم‌های NMG را در مواجهه با اختلالات پیش‌بینی‌نشده به طرزی معنادار افزایش دهد.

ضمایم

در پژوهش حاضر، پیش‌آمد خطا با هدف ایجاد یک خط‌مشی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های موجود در شبکه‌های NMG صورت می‌گیرد که در نتیجه، در هر دورهٔ زمانی، با لحاظ‌کردن خطاهای احتمالی، بخش‌های جزیره‌ای جزئی و تمام‌جزیره‌ای ناشی از خطا شناسایی می‌شوند و به عنوان اطلاعات اولیهٔ مورد نیاز برای اعمال راهبرد مدیریت انرژی پیشنهادی در دسترس عامل‌های شبکه قرار خواهند گرفت؛ سپس، در مرحلهٔ نهایی، با به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای هر نقطهٔ بار، شاخص‌های مربوط محاسبه می‌شوند و قابلیت اطمینان شبکهٔ تحت مطالعه ارزیابی خواهد شد. به منظور مدل‌سازی مکان خطا و میزان استقرار در دوره‌های زمانی خطا، از مفهوم روش نمونه‌برداری انتقال حالات، مشابه آنچه در مرجع [۳۵] مطرح شده است، استفاده می‌شود. در واقع، سعی بر آن است که با در دست داشتن اطلاعات مربوط به λ و μ عناصر کلیدی شبکه، بتوان به صورت توزیع‌شده در کل زمان مطالعه، حالات پیش‌آمده برای سیستم و زمان استقرار در این حالات را در نظر گرفت. در واقع، در این نوع مطالعهٔ خطا، مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های ناشی از رخداد خطا مدنظر است و نوع خطا و راه‌های از بین بردن آن مدنظر نیست.

در این راستا، برای مدل پیشنهادی، گذر از حالت بهره‌برداری عادی به مجموعه‌ای از حالات ممکن برای خطا و نرخ گذر از هر یک، در شکل (A.1) نشان داده شده است. در واقع، در این شکل، مجموعه‌ای از حالات خطا در سطوح تولید، خطوط توان، ترانسفورماتورهای سطح توزیع و یک حالت ویژه مربوط به توانایی یا عدم توانایی پشتیبانی شبکهٔ UN از کل سیستم NMG که ناشی از احتمال وقوع خطا در آن است، در نظر گرفته شده است. در این مدل، اولین ساعت شروع بهره‌برداری از شبکه به صورت حالت نرمال در نظر گرفته شده است و با استفاده از اطلاعات λ و μ عناصر شبکه، مسیر گذر به حالت بعدی تعیین می‌شود و به همین ترتیب، گذر این حالات تا انتهای بهره‌برداری ادامه می‌یابد و شرایط شبکه تعیین می‌شود.



شکل (A.1): مجموع حالات ممکن برای گذر حالات ناشی از رخداد خطا در سطوح خطوط، ترانسفورماتورهای توزیع، تولید و شبکهٔ بالادست

در این روش، وقوع هر حالت از توزیع نمایی پیروی می‌کند؛ از این رو، زمان واقع در هر حالت از تابع چگالی

احتمال به صورت رابطهٔ (A.1) محاسبه و تابع تجمعی احتمال برای هر حالت استخراج می‌شود؛ سپس، با استفاده از آن، زمان واقع در هر حالت ($d(k)$) طبق رابطهٔ (A.2) قابل محاسبه خواهد بود؛ بعد از به دست آوردن داده‌های مورد نیاز یادشده در رابطه با شبکهٔ تحت مطالعه، در هر مرحله از بهره‌برداری باید تشخیص داده شود احتمال گذر از حالت فعلی ناشی از خرابی کدام عنصر است. برای این کار، با در نظر گرفتن j عنصر واقع در شبکه، با استفاده از رابطهٔ (A.3)، محل خرابی عنصر معیوب تعیین می‌شود و تا زمان برطرف‌شدن خطا، با توجه به نرخ تعمیر آن، در حالت off باقی می‌ماند [۳۵].

$$f(t) = \sum_{i=1}^{m} \delta_i e^{-\Sigma \delta_i(t)} \tag{A.1}$$

$$d(k) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} \delta_i} ln(U) \quad U \in [0,1] \tag{A.2}$$

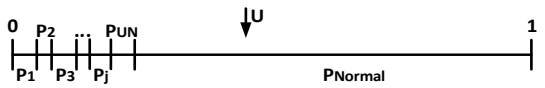
$$P_j = \frac{\delta_j}{\sum_{i=1} \delta_i} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} if\ 0 < rand \le P_1 \rightarrow P_1 = Fail \\ if\ P_1 < rand \le P_1 + P_2 \rightarrow P_2 = Fail \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \\ if \sum_{i=1}^{j-1} P_i < rand \le \sum_{i=1}^{j} P_i \rightarrow P_j = Fail \\ if \sum_{i=1}^{j} P_i < rand \le \sum_{i=1}^{j} P_i + P_{UN} \rightarrow UN\ is\ Fail \\ if \sum_{i=1}^{j} P_i + P_{UN} < rand \le 1 \rightarrow Normal \end{cases} \tag{A.3}$$

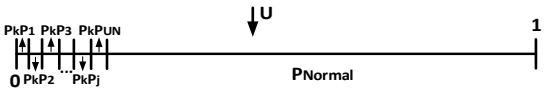
در این روابط، U یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت (بین ۰ و ۱) است. همچنین، نرخ گذر از حالت‌های سالم به حالت‌های ناسالم (off) به صورت $\delta_i = \lambda_{ij}$ و نرخ گذر از حالات ناسالم به حالات سالم به صورت $\delta_i = \mu_{ij}$ در نظر گرفته شده است.

با توجه به رابطهٔ (A.3)، شکل (A.2) روند نمونه‌برداری از حالات سیستم را در رخداد اولین خطای احتمالی در هر دورهٔ زمانی شرح می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، یک بردار با خانه‌های متناظر با نرخ خطای عناصر شبکه تشکیل و سپس، با در نظر گرفتن یک عدد تصادفی (U) با توزیع یکنواخت (بین ۰ و ۱)، مکان عنصر معیوب در اولین رخداد خطا با استفاده از رابطهٔ (A.3) تعیین می‌شود؛ در این راستا، از آنجا که تابع چگالی احتمال برای حالت عادی بهره‌برداری بسیار بزرگ‌تر از احتمال حالات خطاست، بیشترین دورهٔ بهره‌برداری در این حالت سپری خواهد شد و گذر به حالات خطا در تعدادی نامشخص، با توجه به اطلاعات λ هر زیر بخش در طول کل زمان بهره‌برداری، اتفاق خواهد افتاد. در شکل (A.2)، P_{UN}: احتمال خارج از سرویس بودن UN، P_{Normal}: احتمال بهره‌برداری بدون خطا و P_1 تا P_j: احتمال خرابی عناصر موجود در شبکه در سطوح تولید و توزیع است.

به منظور افزایش توانایی روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی شرایط خطا در شبکه، برخلاف سایر روش‌های موجود، در یک دورهٔ زمانی، احتمال رخداد دو خطای هم‌زمان در شبکه (گذر هم‌زمان به دو حالت off) در نظر گرفته شده است و با توجه به شکل (A.3)، وقوع خطای ثانویه ممکن است در هر سطحی اتفاق بیفتد. در این حالت، وقوع خطای سوم منوط به تعمیر دست‌کم یکی از دو عنصر معیوب است؛ از این رو، در هر دورهٔ زمانی، دو بار عمل نمونه‌برداری از حالات انجام خواهد شد، با این تفاوت که در مرحلهٔ دوم، بازه‌های مربوط به رخداد خطا (P_1 تا P_j و P_{UN}) در مقدار نرخ گذر حالت خطای اولیه ضرب می‌شوند و از آنجا که این نرخ متناسب با λ عنصر معیوب اولیه است، از لحاظ اندازه مقداری کوچک است و در نتیجه، احتمال وقوع دو خطای پیاپی بسیار کمتر از احتمال وقوع یک خطای منفرد در شبکه است. به این ترتیب، شکل (A.3) روند نمونه‌برداری از حالات سیستم را برای تعیین مکان رخداد دومین خطا در شبکه (هم‌زمان با خطای اول در یک دورهٔ زمانی) شرح می‌دهد. با استفاده از رابطهٔ (A.3) و با ایجاد تفاوت در بازه‌های موجود در هر حالت (مشابه شکل (A.3))، می‌توان مکان رویداد خطای ثانویه در یک دورهٔ زمانی مشترک با خطای اولیه را در نظر گرفت.



شکل (A.2): روند نمونه‌برداری از حالات سیستم در تعیین مکان اولین خطا در هر دورهٔ زمانی



شکل (A.3): روند نمونه‌برداری از حالات سیستم در تعیین خطای ثانویه توأم با خطای اولیه (P_k) در یک دورهٔ زمانی

در این نوع مدل‌سازی، با توجه به تکرارپذیربودن آن، ممکن است یک عنصر در طول دورهٔ بهره‌برداری چند بار خراب شود و ممکن است یک عنصر اصلاً خراب نشود. به علاوه، تقدم و تأخر در مدل پیشنهادی از اهمیتی ویژه برخوردار است؛ به این ترتیب که در صورت رخداد دو خطا در یک دورهٔ بهره‌برداری، ترتیب رخداد این دو خطا در شبکه مهم است؛ به طوری که مطابق شکل (A.3)، نرخ خطای عنصر معیوب اول به طور مستقیم بر روی بازه‌های بردار نمونه‌برداری برای تعیین عنصر معیوب دوم تأثیر گذار خواهد بود.

به این ترتیب، در هر دورهٔ زمانی، با گذر به حالات مختلف خطا و بازگشت آنها با توجه به نرخ یا زمان تعمیر عنصر معیوب، احتمال وقوع خطا در مکان‌های مختلف شبکه و زمان مورد نیاز برای برطرف‌شدن آن در نظر گرفته می‌شود؛ سپس، در هر دورهٔ زمانی، با تشکیل یک ماتریس حالت ($S_{1\times j}^{t}$) مطابق رابطهٔ (A.4) با درایه‌های واحد برای عناصر سالم و درایه‌های متناظر صفر برای عناصر معیوب شبکه، شرایط مختلف شبکه برای بهره‌برداری از شبکه در n دورهٔ زمانی (ساعت)، مدل‌سازی و سپس بر روی شبکهٔ تحت مطالعه اعمال می‌شود. گفتنی است، در شبکه‌های هوشمند، با وجود تعداد زیاد عناصر، از آنجا که مکان احتمالی عناصر معیوب و در نتیجه، تشخیص درایه‌های صفر ماتریس به صورت مستقیم به وسیلهٔ روابط یادشده تعیین می‌شود، مراحل با پیچیدگی مواجه نخواهند شد.

$$f(t)=\sum_{i=1}^{m}\delta_i e^{-\Sigma\delta_i(t)} \qquad (A.4)$$

در مرحلهٔ بعدی، پس از تعیین مکان عنصر معیوب و همچنین، محاسبهٔ زمان مورد نیاز برای برطرف‌شدن خطا، راهبرد مدیریت انرژی پیشنهادی اجرا و سپس، در پایان هر دورهٔ زمانی، توان قابل دسترس، زمان‌های قطعی مشترکین، کل تعداد قطعی‌های مشترکین و کل انرژی قطع‌شده در تمامی نقاط بار محاسبه می‌شود.

فهرست علائم

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

t, n_t	اندیس و مجموعهٔ نشانگر تعداد دوره‌های زمانی (ساعتی)
	در شبیه‌سازی
m	اندیس مربوط به ریزشبکه‌ها
M	مجموعهٔ شامل تمامی ریزشبکه‌های موجود در سیستم NMG
ω	اندیس برای ضرایب وزنی
j,k,n	اندیس و مجموعهٔ نشانگر تعداد کل واحدها و نقاط بار
i	اندیس برای شمارهٔ گره‌ها
OF	اندیس برای توابع هدف
N_c	اندیس برای تعداد مشترکین
max/min	مقادیر حداکثر/حداقل هر متغیر

متغیرهای دوگانه و سه‌گانه

$S_{BESS/EV}$	متغییر سه‌گانه: مقدار ۱- نشان‌دهندهٔ حالت دشارژ، مقدار ۱+ نشان‌دهندهٔ حالت شارژ و مقدار ۰ نشان‌دهندهٔ حالت بدون فعالیت است.
$\kappa_{BESS/EV}^{ch/dch}$	متغییر دودویی (صفر و یک) برای حالت شارژ یا دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باتری یا خودروهای الکتریکی است.
β_{Ex}	متغیر دودویی: مقدار ۱ برای فروش توان از سمت ریزشبکه‌ها به شبکهٔ توزیع و ۱- برای خرید توان از شبکهٔ توزیع توسط ریزشبکه‌هاست.
A_{UN}	متغیر برای در نظر گرفتن امکان تبادل قدرت بین هر ریزشبکه و شبکهٔ توزیع که در آن، ۰ به معنای عدم دسترسی و ۱ به معنای دسترسی است.

متغیرها و پارامترها

λ/μ	نرخ خرابی/تعمیر اجزاء
L_a	میانگین بار متصل به هر نقطهٔ بار
U	مدت زمان بی‌برقی
B/G	سوسپتانس/کاندوکتانس خط بین نقاط بار
v_{base}	ولتاژ مرجع
$\eta_{BESS/EV}^{ch/dch}$	راندمان واحدهای BESS/EV در فرایندهای شارژ/دشارژ
v	دامنهٔ ولتاژ نقاط بار
$Cr_{\text{up/down}}$	نرخ افزایش/کاهش توان واحدها
$C_{BESS/EV}$	هزینهٔ شارژ/دشارژ واحدهای BESS/EV
$C_{DG,M}$	هزینهٔ بهره‌برداری واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها
C_{Cut}	هزینهٔ پرداختی بابت ظرفیت بارهای قطع‌شدنی
$C_{ID/NID}$	قیمت فروش به بارهای قطع‌شدنی/قطع‌نشدنی ریزشبکه‌ها
$C_{CU,D}$	قیمت فروش به مصرف‌کنندهٔ شبکهٔ توزیع
C_{Ex}	قیمت مبادله بین عامل DN و عوامل ریزشبکه‌ها
$C_{DG,D}$	هزینهٔ بهره‌برداری واحدهای تولید پراکنده واقع در DN
C_{UN}	قیمت مبادله بین عامل DN و UN
$N_{BESS/EV}^{state}$	محدودیت‌های تغییر حالت شارژ و دشارژ
$P_{BESS/EV}$	ظرفیت نامی (کیلووات) سیستم‌های BESS/EV

P_{Cut}	ظرفیت نامی (کیلووات) بارهای قطع‌شدنی
$P/Q_{DG,M}$	ظرفیت نامی (کیلووات/کیلووار) واحدهای تولید پراکنده واقع در ریزشبکه‌ها
P/Q_{NID}	وان اکتیو/راکتیو تأمین‌شده برای بارهای قطع‌نشدنی ریزشبکه‌ها
$P_{Cu,D}$	توان اکتیو تأمین‌شده برای مصرف‌کنندهٔ DN
P/Q_{ID}	توان اکتیو/راکتیو تأمین‌شده برای بارهای قطع‌شدنی ریزشبکه‌ها
P_{Ex}	توان تبادلی بین ریزشبکه‌ها و شبکهٔ توزیع
$P_{DG,D}$	ظرفیت نامی (کیلووات) واحدهای تولید پراکنده واقع در DN
P_{UN}	توان تبادلی بین DN و UN
P/Q_R	ظرفیت نامی (کیلووات/کیلووار) واحدهای مبتنی بر RES واقع در ریزشبکه‌ها
$SOC_{BESS/EV}$	وضعیت شارژ واحدهای BESS/EV

مراجع

[1] Y. Bo, X. Xu, F. Xue, C. Zachariades, X. Chen, "A Coordinated Day-Ahead and Real-Time Networked Multi-Microgrid Scheduling Framework Considering System Robustness Enhancement: An ADMM-Assisted State Adversarial Deep Reinforcement Learning Approach", IEEE Trans. on Industry Applications, Early access, 2025. https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3619002

[2] M. Aryannezhad, A. Rastgou, S. Ghasemi, "Optimal Power Management and Energy Cost Saving for the Hybrid Microgrids under Uncertainties of Wind Speed and Solar Radiation Considering Demand Side Management (DSM)", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 43-52, 2024. https://doi.org/10.22108/isee.2023.134620.1576 [In Persian]

[3] R. Darshi, S. Shamaghdari, A. Jalali, H. Arasteh, "Optimal Decentralized Energy Management of Electrical and Thermal Distributed Energy Resources and Loads in Microgrids Using Reinforcement Learning", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 47-66, Sep. 2023. https://doi.org/10.22108/isee.2022.133209.1556 [In Persian]

[4] H. A. Muqeet, H. Javed, M. N. Akhter, M. Shahzad, H. M. Munir, M. U. Nadeem, S. S. Bukhari, M. Huba, "Sustainable Solutions for Advanced Energy Management System of Campus Microgrids: Model Opportunities and Future Challenges", Sensors, Vol. 22, No. 6, Art. no. 2345, Mar. 2022. https://doi.org/10.3390/s22062345

[5] X. Zhong, W. Zhong, Y. Liu, C. Yang, S. Xie, "Optimal Energy Management for Multi-Energy Multi-Microgrid Networks Considering Carbon Emission Limitations", Energy, Vol. 246, Art. no. 123428, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123428

[6] A. Jani, H. Karimi, S. Jadid, "Two-Layer Stochastic Day-Ahead and Real-Time Energy Management of Networked Microgrids Considering Integration of Renewable Energy Resources", Applied Energy, Vol. 323, Art. no. 119630, 2022. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119630

[7] Z. Guan, H. Wang, Z. Li, X. Luo, X. Yang, J. Fang, Q. Zhao, "Multi-Objective Optimal Scheduling of Microgrids Based on Improved Particle Swarm Algorithm", Energies, Vol. 17, No. 7, Art. no. 1760, 2024. https://doi.org/10.3390/en17071760

[8] Y. He, Z. Han, K. Sun, X. Wu, X. Du, H. Wang, H. Lu, "Economic Optimization Scheduling of Multi-Microgrid Based on Improved Genetic Algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 17, No. 23, pp. 5298-5307, 2023. https://doi.org/10.1049/gtd2.13043

[9] D. Han, J. H. Lee, "Two-Stage Stochastic Programming Formulation for Optimal Design and Operation of Multi-Microgrid System Using Data-Based Modeling of Renewable Energy Sources", Applied Energy, Vol. 291, Art. no. 116830, Jun. 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116830

[10] Y. Ye, T. Zhang, R. Shi, Z. Liu, L. Jia, "A Multi-Stage Stochastic-Robust Planning Approach for Highway Service Area Self-Contained Energy System Considering Multiple Uncertainties", Energy, Art. no. 139189, Nov. 2025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139189

[11] F. Feng, X. Du, Q. Si, H. Cai, "Operation Optimization of Distributed Multi-Energy Multi-Microgrid Considering System Robustness", Energy Exploration & Exploitation, Vol. 41, No. 3, pp. 1085-1106, 2023. https://doi.org/10.1177/01445987231162381

[12] Y. Wen, R. Ding, Y. Liang, J. Chen, "Multi-Microgrid Shared Energy Storage Operation Optimization Strategy Based on a Mixed Game Theory", Electr. Power Syst. Res., Vol. 246, Art. no. 111643, 2025. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111643

[13] N. Alamir, S. Kamel, S. M. Abdelkader, "Stochastic Multi-Layer Optimization for Cooperative Multi-Microgrid Systems with

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101604
[22] S. E. Ahmadi, N. Rezaei, H. Khayyam, "Energy Management System of Networked Microgrids through Optimal Reliability-Oriented Day-Ahead Self-Healing Scheduling", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 23, Art. no. 100387, 2020. https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100387
[23] S. Nourian, A. Kazemi, "A Two-Stage Optimization Technique for Automated Distribution Systems Self-Healing: Leveraging Internet Data Centers, Power-to-Hydrogen Units, and Energy Storage Systems", Journal of Energy Storage, Vol. 85, Art. no. 111084, 2024. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111084
[24] P. Zhang, S. A. Mansouri, A. R. Jordehi, M. Tostado-Véliz, Y. Z. Alharthi, M. Safaraliev, "An ADMM-Enabled Robust Optimization Framework for Self-Healing Scheduling of Smart Grids Integrated with Smart Prosumers", Applied Energy, Vol. 363, Art. no. 123067, 2024. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123067
[25] M. F. Al-Safi, A. L. Ara, H. B. Tolabi, "Optimal Probabilistic Scheduling of Microgrids for Enhancing Network Resiliency and Flexibility Using Conical Self-Regulating PSO Algorithm", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 16, No. 12, Art. no. 103841, 2025. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103841
[26] J. Lu, R. Zhao, W. Guo, H. Li, B. Hu, J. Lin, "Uniform Design-Based Self-Healing Evaluation for Active Distribution Network", Electric Power Systems Research, Vol. 235, Art. no. 110863, 2024. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110863
[27] A. D. Kaif, K. S. Alam, S. K. Das, G. Chen, S. Islam, S. M. Muyeen, "A Comprehensive Multi-Layer Framework for Fault Mitigation and Adaptive Self-Healing in Blockchain-Enabled Virtual Power Plants", Expert Systems with Applications, Vol. 287, Art. no. 128099, 2025. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128099
[28] S. Badakhshan, R. A. Jacob, B. Li, P. Wang, J. Zhang, "Self-Healing Power Systems Using Reinforcement Learning over Graphs for Controlled Grid Islanding", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 20, Art. no. 101937, 2025. https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101937
[29] Q. Y. Duan, V. K. Gupta, S. Sorooshian, "Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 76, No. 3, pp. 501-521, 1993. https://doi.org/10.1007/BF00939380
[30] X. Gao, Y. Cui, J. Hu, G. Xu, Z. Wang, J. Qu, Hydrogen Storage and Demand Response", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 100, pp. 688-703, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.244
[14] Y. Pan, Z. Yang, "Optimization Scheduling of Shared Hydrogen Energy Storage among Multi-Microgrids and Its Comprehensive Evaluation of Utilization Benefits", J. Energy Storage, Vol. 126, Art. no. 116945, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116945
[15] A. Merabet, A. Al-Durra, T. El-Fouly, E. F. El-Saadany, "Optimization and Energy Management for Cluster of Interconnected Microgrids with Intermittent Non-Polluting and Diesel Generators in Off-Grid Communities", Electr. Power Syst. Res., Vol. 241, Art. no. 111319, 2025. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111319
[16] T. Gangwar, N. P. Padhy, P. Jena, "Decentralized BESS Optimization for Multi-Microgrids: An Optimization Framework", J. Energy Storage, Vol. 141, Art. no. 119029, 2026. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119029
[17] P. Li, Y. Wang, T. Zheng, Y. Jin, W. Yuan, W. Guo, "Coordinated Optimization of P2P Energy Trading and Network Operation for Active Distribution Network with Multi-Microgrids", Glob. Energy Interconnect., Vol. 8, No. 3, pp. 474-485, 2025. https://doi.org/10.1016/j.gloei.2025.01.007
[18] S. Lv, D. Yang, K. Zhang, Y. Cheng, Y. Chen, W. Wang, "Research on Soft Self-Healing Method for Fault in Multi-Branch Distribution Network Based on Beat Frequency Measurement Technology", Results in Engineering, Vol. 10, Art. no. 107652, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107652
[19] W. Wang, K. Zhang, S. Lv, Z. Zheng, G. Li, L. Bai, "Research and Application of New Fast Self-Healing Technology of Distribution Network Based on Line Topology and Beat Frequency Attenuation", Results in Engineering, Vol. 6, Art. no. 106641, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106641
[20] I. Hamdeen, E. A. Badran, M. F. Kotb, M. Elgamal, "Self-Healing Multi-Agent Techniques in Electric Power Distribution Systems: A Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 224, Art. no. 116132, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116132
[21] M. S. Jonban, L. Romeral, A. Akbarimajd, Z. Ali, S. S. Ghazimirsaeid, M. Marzband, G. Putrus, "Autonomous Energy Management System with Self-Healing Capabilities for Green Buildings (Microgrids)", Journal of Building Engineering, Vol. 34, Art. no. 101604, 2021.

H. Wang, "Parameter Extraction of Solar Cell Models Using Improved Shuffled Complex Evolution Algorithm", Energy Conversion and Management, Vol. 157, pp. 460-479, 2018. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.033

[31] V. C. Mariani, L. dos Santos Coelho, "A Hybrid Shuffled Complex Evolution Approach with Pattern Search for Unconstrained Optimization", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, No. 9, pp. 1901-1909, 2011. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2011.02.009

[32] R. Billinton, S. Jonnavithula, "A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1670-1676, 2002. https://doi.org/10.1109/59.544626

[33] R. Karki, R. Billinton, "Reliability/Cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 16, No. 4, pp. 368-373, 2002. https://doi.org/10.1109/60.969477

[34] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel, K. S. So, "A Reliability Test System for Educational Purposes—Basic Distribution System Data and Results", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 813-820, 2002. https://doi.org/10.1109/59.76730

[35] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, "Role of Outage Management Strategy in Reliability Performance of Multi-Microgrid Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 33, No. 3, pp. 2359-2369, 2017. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2746180

[36] B. R. Sathyanarayana, "Sensitivity-Based Pricing and Multiobjective Control for Energy Management in Power Distribution Systems", Arizona State University, 2012. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2230192

[37] H. Afrakhte, P. Bayat, "A Self-Evolving Type-2 Fuzzy Energy Management Strategy for Multi-Microgrid Systems", Computers & Electrical Engineering, Vol. 85, Art. no. 106702, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106702

[38] M. Jalali, K. Zare, H. Seyedi, "Strategic Decision-Making of Distribution Network Operator with Multi-Microgrids Considering Demand Response Program", Energy, Vol. 141, pp. 1059-1071, 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.145

[39] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, "Stochastic Energy Management of Microgrids during Unscheduled Islanding Period", IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 3, pp. 1079-1087, 2016. https://doi.org/10.1109/TII.2016.2646721

[40] P. Bayat, A. Baghramian, P. Bayat, "Implementation of Hybrid Electric Vehicle Energy Management System for Two Input Power Sources", Journal of Energy Storage, Vol. 17, pp. 423-440, 2018. https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.019

[41] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, "Reliability Studies of Modern Distribution Systems Integrated with Renewable Generation and Parking Lots", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 8, No. 1, pp. 431-440, 2016. https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2598365

[42] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, "Decentralized Energy Management System for Networked Microgrids in Grid-Connected and Islanded Modes", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 1097-1105, 2015. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2427371

[43] J. Zhu, W. Gu, P. Jiang, S. Song, H. Liu, H. Liang, M. Wu, "Dynamic Island Partition for Distribution System with Renewable Energy to Decrease Customer Interruption Cost", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 2146-2156, 2017. https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.6.2146

[44] S. Emiroglu, Y. Uyaroglu, G. Ozdemir, "Distributed Reactive Power Control Based Conservation Voltage Reduction in Active Distribution Systems", Advances in Electrical & Computer Engineering, Vol. 17, No. 4, 2017. https://doi.org/10.4316/AECE.2017.04012

[45] E. Zitzler, L. Thiele, "Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach", IEEE Trans. on Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 4, pp. 257-271, 2002. https://doi.org/10.1109/4235.797969

[1] Networked microgrid
[2] Renewable energy sources
[3] Self-healing
[4] Day-ahead
[5] Intra-day
[6] Stackelberg
[7] Nash bargaining
[8] Battery energy storage systems
[9] Consensus
[10] Mixed linear integer programming
[11] Gurobi

[12] Peer-to-peer
[13] Alternating direction method of multipliers
[14] Conical self-regulating particle swarm optimization
[15] Robust adaptive shuffled complex evolution
[16] Upstream network
[17] Photovoltaic
[18] Wind turbine
[19] Micro-turbine
[20] Electric vehicle
[21] Ramp function
[22] Complexes
[23] Competitive complex evolution
[24] Evolving step
[25] Nelder-Mead Simplex
[26] Shuffling step
[27] Genetic algorithm
[28] Particle swarm optimization
[29] Lower bound
[30] Upper bound
[31] Differential evolution
[32] Weighted shuffling
[33] State transition sampling technique
[34] State of charge
[35] Hypervolume
[36] Energy not supplied
[37] Average energy not supplied