

Presenting a Novel Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution Feeder Reconfiguration Considering the Importance of Reliability**Benyamin Katanchi¹, Ph.D. Student, Ali Asghar Shojaei¹, Assistant Professor, Mahdi Yaghoobi², Associate Professor**¹Department of Electrical Engineering- Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran²Department of Electrical Engineering- Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
benyamin_k2006@yahoo.com, a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir, yaghoobi@mshdiau.ac.ir**Abstract**

Since it might delay making significant expenditures in substations and generation, increasing the efficiency of power systems is an important priority. By altering the status of switches, the distribution feeder reconfiguration (DFR) can reduce system losses in this regard. Power loss and voltage deviation of buses are frequently taken into account as objective functions while solving the distribution feeder reconfiguration problem, however reliability indices have received less consideration. The proposed reliability index, coupled with power loss and switching number in the presence of distributed generators, are used in this study to address DFR as a multi-objective problem. The DFR problem is complex inherently, considering impacts of distributed generators makes the problem more be complex than before. For this purpose, an evolutionary method based on the combination of particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping has been used to solve the nonlinear optimization problem in this study. Two 33-bus and 70-bus systems are evaluated to gauge the effectiveness of the suggested hybrid algorithm.

Keywords: distribution feeder reconfiguration, energy not supplied, multi-objective, reliability**Received:** 22 September 2022**Revised:** 2 January 2023**Accepted:** 20 January 2023**Corresponding Author:** Dr. Ali Asghar Shojai

Citation: B. Katanchi, A.A. Shojaei, M. Yaghoobi, "Presenting a novel hybrid approach for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering the importance of reliability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 59, pp. 143-164, December 2024 (in Persian).

ارائه یک رویکرد ترکیبی جدید برای مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع با در نظر گرفتن اهمیت قابلیت اطمینان

بنیامین کتانچی^۱، دانشجوی دکتری، علی‌اصغر شجاعی^۱، استادیار، مهدی یعقوبی^۲، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

۲- گروه مهندسی برق - واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

benyamin_k2006@yahoo.com, a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir, yaghoobi@mshdiau.ac.ir

چکیده: تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع یک مسئله بهینه‌سازی در سیستم قدرت است که با تغییر وضعیت سوئیچینگ در شبکه توزیع برای برآورده کردن توابع هدف خاصی انجام می‌شود. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که اغلب تلفات توان و انحراف ولتاژ باس‌ها به‌عنوان توابع هدف در حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. با این حال توابع هدف جدیدتر نظیر قابلیت اطمینان کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. در این مقاله، برای حل مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع، از شاخص انرژی توزیع نشده به‌عنوان تابع قابلیت اطمینان، همراه با تلفات توان و تعداد سوئیچینگ در حضور واحدهای تولید تولید پراکنده استفاده شده است. تجدید آرایش فیدرهای توزیع به‌طور ذاتی مساله پیچیده‌ای است، در نظر گرفتن تاثیر منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مساله را پیچیده‌تر از قبل می‌کند، به همین منظور از یک روش تکاملی مبتنی بر ترکیب روش‌های اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه برای حل مسئله بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شده است. سیستم‌های ۳۳ و ۷۰ باسه نیز برای سنجش اثربخشی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همچنین نتایج روش پیشنهادی با نتایج سایر روش‌های تکاملی مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی اجتماع ذرات، تجدید آرایش فیدرهای شبکه، قابلیت اطمینان، واحدهای تولید پراکنده

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۶/۳۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی‌اصغر شجاعی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نیشابور - بلوار غزالی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور - دانشکده مهندسی برق - گروه قدرت

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع^۱ که عمدتاً به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، دچار تلفات گسترده خطوط و افت ولتاژ متناظر می‌شوند. روش‌های مختلفی برای کاهش این تلفات پیشنهاد شده که بسیاری از آن‌ها مستلزم نصب تجهیزات جدید در سیستم هستند. چنین تجهیزاتی نه تنها بار مالی را بر شرکت‌های توزیع تحمیل می‌کنند، بلکه باعث پیچیده‌تر شدن عملکرد سیستم توزیع نیز می‌شوند. سوئیچ‌های موجود شبکه توزیع، سیستم را قادر می‌سازند تا بارها را از طریق مسیرهای مختلف تغذیه کنند. تجدید آرایش فیدرهای توزیع^۲ از طریق تغییر وضعیت این سوئیچ‌ها (باز/بسته) برای بهینه‌سازی توابع هدف و به منظور رفع این محدودیت‌ها انجام می‌شود:

- آرایش شبکه همیشه باید شعاعی باشد.

- بارها نمی‌توانند بیشتر از ظرفیت تولید شبکه باشند.

- سطوح ولتاژ باس و تجهیزات شبکه باید در محدوده قابل قبول باشد.

- جریان خط و تجهیزات شبکه باید در محدوده مجاز باشد.

تجدید آرایش شبکه توزیع یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی است زیرا باید معادلات غیرخطی مربوط به پخش بار را محاسبه کند و وضعیت باز/بسته سوئیچ‌ها را تعیین کند. با این حال، به دلیل برخی محدودیت‌ها، از جمله پیوستگی و مشتق‌پذیری توابع هدف، روش‌های عددی مانند فن اندازه‌گیری فاصله^۳ [۱] و رویکرد نیروی زیاد^۴ [۲] نمی‌توانند یک راه‌حل بهینه جهانی برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع را تضمین کنند. به دلیل سادگی و حجم محاسبات کم، روش‌های فراابتکاری^۵ مختلفی در سال‌های اخیر برای مقابله با مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع ارائه شده‌اند. مطالعاتی که در این زمینه انجام شده‌اند را می‌توان با در نظر گرفتن یا نادیده گرفتن تأثیر واحدهای تولید پراکنده و خازن‌ها دسته‌بندی کرد.

بخش اول مطالعات مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع را در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده و خازن حل کرده است. هدف این بخش از مطالعات نشان دادن کارایی روش‌های مختلف بهینه‌سازی در حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع است. با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز تهاجمی^۶ چندهدفه، مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در مرجع [۳] با هدف کاهش تلفات توان، تعداد سوئیچینگ و انحراف ولتاژ حل شده است. برای به حداقل رساندن تلفات توان و انحراف ولتاژ باس‌ها، مرجع [۴] دو الگوریتم تکاملی به نام‌های ریشه دونده^۷ و بهبود یافته جستجوی فاخته^۸ برای حل مشکل چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع پیشنهاد کرده است. در مرجع [۵] استفاده از تئوری گراف و سیستم‌های ایمنی مصنوعی برای حل مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات توان پیشنهاد شده است. به منظور مقابله با مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع، یک الگوریتم ژنتیک بر اساس یک رمزگذاری جدید و درخت پوشا حداقل^۹ در مرجع [۶] ارائه شده است. به منظور کاهش تلفات توان و افزایش شاخص پایداری ولتاژ در شبکه توزیع نامتعادل، یک الگوریتم جستجوی هارمونی در مرجع [۷] معرفی شده است. الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی نیز در مرجع [۸] برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با توجه به کاهش فضای جستجو با هدف کاهش تلفات و بهبود مشخصات ولتاژ معرفی شده است. علاوه بر این، یک الگوریتم باینری بهبود یافته اجتماع ذرات^{۱۰} برای حل مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات توان به خوبی اعمال شده است [۹].

بررسی مطالعات بالا نشان می‌دهد که الگوریتم‌های تکاملی جدیدی نظیر بهینه‌سازی علف‌های هرز، سیستم ایمنی مصنوعی^{۱۱} ارائه شده است. همچنین این روش‌ها به نتایج قابل قبولی در کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس‌ها رسیده‌اند. با این حال، در این مطالعات فقط توابع تلفات یا انحراف ولتاژ باس‌ها^{۱۲} بهینه‌سازی شده و توجهی به توابع هدف جدیدتر نظیر قابلیت اطمینان نشده است. در نظر نگرفتن این تابع در ارزیابی مسائل شبکه توزیع به‌ویژه تجدید آرایش موجب خاموشی مشترکین می‌شود. واحدهای تولید پراکنده مانند توربین‌های بادی و وسایل نقلیه الکتریکی می‌توانند ویژگی‌های ولتاژ، کیفیت توان^{۱۳} و تلفات توان^{۱۴} را در صورت ادغام در شبکه توزیع بهبود بخشند. تلاش‌های تحقیقاتی فزاینده‌ای برای استفاده از ژنراتورهای تولید پراکنده و وسایل نقلیه الکتریکی در مقابله با مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع با توجه به مزایای این فناوری‌ها انجام شده است. هدف این قسمت از مطالعات نشان دادن تأثیر ژنراتورهای تولید پراکنده علاوه بر ارائه روش‌های مختلف بهینه‌سازی در حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع است. در مرجع [۱۰]، یک الگوریتم جستجوی ترکیبی^{۱۵} برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع

[۱] با در نظر گرفتن ژنراتورهای تولید پراکنده برای به حداقل رساندن تلفات توان و بهبود مشخصات ولتاژ توسعه داده شده است. اگرچه نویسندگان در مرجع [۱۱] تلاش کرده‌اند تا یک نسخه جهش‌یافته قورباغه^{۱۶} برای کاهش تلفات توان و انحراف ولتاژ باس ارائه دهند، مرجع [۱۲] یک روش جدید حل مسئله را با توجه به محدودیت‌های حفاظتی پیشنهاد کرده است. برای مقابله با مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع با در نظر گرفتن ژنراتورهای تولید پراکنده، روش بهینه‌سازی بهبود یافته الگوریتم اجتماع ذرات در مرجع [۱۳] توسعه یافته است. الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی^{۱۷} در مرجع [۱۴] برای حل مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور ژنراتورهای تولید پراکنده به‌منظور کاهش تلفات شبکه و هزینه‌های عملیاتی^{۱۸} معرفی شده است. به‌منظور حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده، یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر ترکیب الگوریتم اجتماع ذرات و اصلاح شده قورباغه در مرجع [۱۵] پیشنهاد گردیده است. توابع هدف این مطالعه، کاهش تلفات توان، تعداد سوئیچینگ و افزایش شاخص پایداری ولتاژ است. تجدید آرایش شبکه توزیع تصادفی در مرجع [۱۶] با در نظر گرفتن نفوذ بالای وسایل نقلیه الکتریکی و تأثیر نیروگاه باد در شبکه هوشمند توسعه یافته است. به‌منظور حل مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع با در نظر گرفتن ژنراتورهای تولید پراکنده با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های سوئیچینگ و تلفات توان، الگوریتم ژنتیک در مرجع [۱۷] ارائه شده است. یک روش جستجوی هارمونی برای مشکل تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور ژنراتورهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ^{۱۹} در مرجع [۱۸] معرفی شده است. به‌منظور حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور عدم قطعیت نیروگاه بادی، الگوریتم اصلاح شده یادگیری معلم خود-انطباقی در مرجع [۱۹] ارائه شده است. برای کاهش میانگین انرژی توزیع^{۲۰} نشده و تلفات توان، یک رویکرد تصادفی برای حل مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع با توجه به نیروگاه بادی در مرجع [۲۰] ارائه شده است. به‌منظور کاهش تلفات توان، هزینه‌های عملیاتی و افزایش پایداری گذرا، یک الگوریتم جستجوی گرانشی در مرجع [۲۱] به‌عنوان راه‌حلی کارا برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با در نظر گرفتن ژنراتورهای تولید پراکنده پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۲]، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده باهدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ، ارائه شده است. بررسی نتایج، سودمندی روش پیشنهادی را برای حل این مسئله بهینه‌سازی نشان می‌دهد. الگوریتم بهبود یافته جستجوی هارمونی در مرجع [۲۳] برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. به‌منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، در چهار سیستم آزمون مورد آزمایش قرار گرفته است. در مرجع [۲۴]، الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات برای حل مسئله هم‌زمان تجدید آرایش شبکه توزیع و اختصاص بهینه واحدهای تولید پراکنده نظیر توربین بادی با هدف کاهش تلفات در دو شبکه ۳۳ و ۶۹ باسه آزموده شده است. هدف این مطالعه نشان دادن توانایی روش بهبود یافته در مقایسه با روش معمول اجتماع ذرات در حل مسئله بهینه‌سازی غیرخطی تجدید آرایش شبکه توزیع است.

ارزیابی مطالعات بالا نشان می‌دهد که نسخه بهبود یافته الگوریتم‌های تکاملی مانند بهبود یافته اجتماع ذرات، جهش قورباغه برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. با این حال، از روش چندهدفه فازی برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع باهم کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مشابه با مطالعات قبلی، تابع هدف قابلیت اطمینان نیز در این بخش بهینه‌سازی نشده است و تمایل بیشتر مطالعات بهینه‌سازی توابع هدف سنتی مانند تلفات و ... است.

بخش آخر مطالعات، تأثیر واحدهای خازنی و تولید پراکنده را در حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در نظر گرفته است. به عنوان مثال، در مرجع [۲۲]، روش بهینه‌سازی تطبیقی نهنگ برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع و اختصاص بهینه خازن برای به حداقل رساندن تلفات توان، هزینه عملیاتی و بهبود پروفیل ولتاژ پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۳]، از چند الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی شامل بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی اصلاح شده، جستجوی فاخته و اصلاح شده رقابتی امپریالیستی^{۲۱} برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای خازنی با هدف کاهش تلفات توان در دو شبکه ۳۳ و ۶۹ باسه استفاده شده است. الگوریتم تکاملی تطبیقی تفاضلی در مرجع [۲۷]، برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور هم‌زمان واحدهای تولید پراکنده و خازنی با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تلفات شبکه توزیع در حدود ۱۷ درصد با روش مورد نظر کاهش یافته است. در مرجع [۲۸]، روش بهینه‌سازی اکوسیستم مصنوعی برای حل مسئله هم‌زمان تجدید آرایش شبکه توزیع و اختصاص بهینه واحدهای تولید پراکنده و خازنی با

هدف کاهش تلفات بر روی یک شبکه ۵۹ باسه آزموده شده است. بررسی نتایج تلفات نشان از کاهش تلفات ۵۰ درصدی نسبت به روش‌های اجتماع ذرات، تطبیقی نهنگ^{۲۲} و گرگ خاکستری^{۲۳} دارد. ویژگی این بخش مطالعات، استفاده هم‌زمان منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر بوده که به نتایج بسیار خوبی در کاهش تابع تلفات رسیده‌اند. نکته دیگری که در مطالعات این بخش مورد بررسی قرار نگرفته است، عدم توجه به تابع هدف تعداد عملیات سوئیچینگ در شبکه توزیع است که باعث کاهش طول عمر این تجهیزات می‌شود. کاهش تعداد عملیات سوئیچینگ که می‌تواند هزینه‌های عملیاتی شبکه را کاهش دهد. از نظر روش حل مسئله بهینه‌سازی، مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع یک مسئله غیرخطی و پیچیده است و حل مسئله در قالب چندهدفه، فرآیند بهینه‌سازی را پیچیده‌تر می‌کند؛ بنابراین، در مطالعات کمتری به حل مسئله با روش‌های چندهدفه پرداخته شده است و یا مسئله بهینه‌سازی با استفاده از استراتژی وزن دهی توابع هدف حل شده که نمی‌تواند جواب بهینه‌ای برای مسئله چندهدفه باشد.

برخی از ویژگی‌های قابل توجه این مطالعه با توجه به نقایص مطالعات قبلی به شرح زیر است:

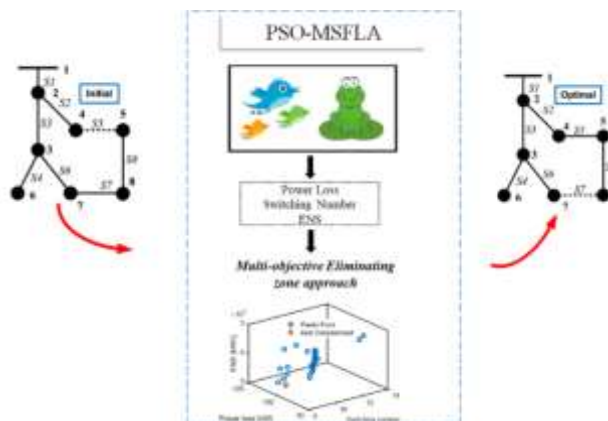
- معرفی یک الگوریتم ترکیبی جدید برای مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع که ترکیبی از الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه است. علت ترکیب این دو الگوریتم، استفاده بهینه از ویژگی‌های این دو روش است. ویژگی الگوریتم اجتماع ذرات، سادگی در اجرا و سرعت بالا است. همچنین ویژگی‌های الگوریتم جهش قورباغه در مقایسه با سایر روش‌های، پروسه تکاملی ساده و قابلیت جستجوی جهانی است. ترکیب این دو الگوریتم و استفاده از مزایای این دو روش، احتمال همگرایی زودرس را در حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی و نا محذب را کاهش می‌دهد.

- ارائه شاخص انرژی توزیع نشده به عنوان تابع هدف قابلیت اطمینان، این شاخص نمایشی از رفتار سیستم در هنگام خاموشی ارائه می‌دهد و مجموع انرژی توزیع نشده بارها را به دلیل خطاها در دوره مشخص شده منعکس می‌کند.

- بررسی چگونگی تأثیر ژنراتورهای تولید پراکنده بر اهداف مختلف تجدید آرایش شبکه توزیع و تغییر ساختار فیدرهای شبکه توزیع. پروسه تجدید آرایش در حضور واحدهای تولید پراکنده، موجب تغییر آرایش فیدرها می‌شود. در نتیجه تغییر ساختار فیدرها جهت توان در شبکه را تغییر داده و باعث تغییر توابع هدف در سیستم توزیع می‌شود.

- ارائه یک رویکرد جدید چندهدفه مبتنی بر حذف منطقه برای به دست آوردن پاسخ‌های غیرغالب برای مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع. در بهینه‌سازی چندهدفه ما با مجموعه‌ای از جواب‌ها به جای یک جواب بهینه سروکار داریم. از این رو نمی‌توان از مفهوم بهینه‌سازی تک‌هدفه برای حل مسئله چندهدفه استفاده کرد. در این مطالعه، یک مدل جدید مبتنی بر حذف منطقه برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف و پیدا کردن مجموعه جواب بهینه، معرفی شده است.

چکیده گرافیکی طرح پیشنهادی در شکل (۱) ارائه شده است. در ادامه ساختار مقاله به این شرح است. فرمول‌بندی مسئله، شامل توابع هدف و محدودیت‌ها، در بخش دوم توضیح داده شده است. روش چندهدفه در بخش سوم نشان داده شده است. الگوریتم‌های اجتماع ذرات، جهش قورباغه و الگوریتم اجتماع ذرات-بهبود یافته جهش قورباغه در بخش چهارم معرفی شده‌اند. معرفی شبکه‌های آزمون، آنالیز نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری در بخش‌های پنجم و ششم به ترتیب ارائه شده است.



شکل (۱): چکیده گرافیکی طرح پیشنهادی

Figure (1): Graphical abstract of the proposed scheme

۲- فرمول مسئله

در این قسمت توابع هدف و محدودیت‌های مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع مورد استفاده اشاره شده است.

۲-۱- توابع هدف

در زیر توابع هدف مطالعه شامل تلفات توان، انرژی توزیع نشده و تعداد عملیات کلیدزنی ارائه شده است.

الف- به حداقل رساندن تلفات توان: تلفات توان از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۴]. رابطه (۲)، متغیرهای کنترلی مسئله را نشان می‌دهد.

$$f_1(X) = \sum_{i=1}^{N_{branch}} R_i \times |I_i|^2 \quad (1)$$

$$X = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{N_{Tie}}, SW_1, SW_2, \dots, SW_{N_{Tie}}, P_{Dg1}, P_{Dg2}, \dots, P_{DgN_{Dg}}] \quad (2)$$

ب- به حداقل رساندن تعداد سوئیچینگ: تعداد عملیات سوئیچینگ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{N_s} |S_i - S_{oi}| \quad (3)$$

ج- به حداقل رساندن انرژی توزیع نشده: انرژی توزیع نشده یکی از شاخص‌های مهم قابلیت اطمینان شبکه توزیع است و کل بارهای تأمین نشده سیستم را در نتیجه خرابی‌ها در طول دوره مطالعه اندازه‌گیری می‌کند [۲۹، ۳۰] که می‌توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$ENS_i = P_i \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{i,j} + U'_{i,j}) \quad (4)$$

شبکه تستی را در نظر گرفته می‌شود که تعداد گره‌های آن برابر N_B بیشتر از یک است و گره ۱ به عنوان منبع فرض شده است. فرض کنید که هر گره جدا از منبع، دارای توان فعال P_i بر حسب کیلووات برای $i=2,3,\dots,N_B$ است. در دسترس نبودن سرویس به دلیل زمان تعمیر و زمان بازسازی تمام شاخه‌های متصل به گره i به ترتیب با $U_{i,j}$ و $U'_{i,j}$ نشان داده می‌شود که تعاریف آن‌ها به شرح زیر است:

$$U_{i,j} = \lambda_{i,j} \times d_{i,j} \times t_{i,j} \quad (5)$$

$$U'_{i,j} = \lambda'_{i,j} \times d_{i,j} \times t_{i,j} \quad (6)$$

بدون در نظر گرفتن گره مرجع، رابطه انرژی توزیع نشده کل شبکه توزیع به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$f_3(x) = \sum_{i=2}^{N_{BUS}} ENS_i \quad (7)$$

۲-۲- محدودیت‌ها

در این قسمت محدودیت‌ها بیان می‌شوند.

الف- محدودیت انتقال توان: حداکثر توانی که هر فیدر می‌تواند منتقل کند به شرح زیر است:

$$|p_{ij}^{line}| \leq p_{ij,Max}^{line} \quad (8)$$

ب- معادلات پخش بار: در طول فرآیند بهینه‌سازی، معادلات پخش بار باید رعایت شود. این معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_i \times V_j \times Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i=2,3,\dots,N_{bus} \quad (9)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_i \times V_j \times Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (10)$$

که در آن P_i و Q_i به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس i -ام هستند. V_i و δ_i به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ باس i -ام هستند. Y_{ij} و θ_{ij} به ترتیب بیانگر اندازه و زاویه ادمیتانس شاخه بین باس‌های i و j هستند.

ج- ساختار شعاعی شبکه: ساختار شبکه مطابق رابطه (۱۱) برای بهبود حفاظت شبکه باید شعاعی باشد که در آن N_{bus} و V_{source} به ترتیب بیانگر تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه و N_{branch} تعداد خطوط شبکه را نشان می‌دهند.

$$N_{branch} = N_{bus} - N_{source} \quad (11)$$

د- محدودیت ولتاژ باس: مقادیر ولتاژ باس باید با استفاده از معادله (۱۲) در یک محدوده معقول حفظ شود که در آن V_{min} و V_{max} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ باس i -ام و V_i بیانگر مقدار ولتاژ باس i -ام است.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (12)$$

ه- محدودیت جریان فیدر: جریان مجاز فیدر i -ام طبق رابطه زیر نباید از حداکثر مقدار آن بیشتر شود.

$$|I_{f,i}| \leq I_{f,i}^{Max} \quad i=1,2,\dots,N_{feeder} \quad (13)$$

که در آن $I_{f,i}$ و $I_{f,i}^{Max}$ به ترتیب دامنه جریان و حداکثر جریان فیدر i -ام هستند و N_{feeder} تعداد فیدرهای شبکه را نشان می‌دهد. و- محدودیت ترانسفورماتور: جریان مجاز ترانسفورماتور i با توجه به معادله تعیین می‌شود:

$$|I_{t,i}| \leq I_{t,i}^{Max} \quad i=1,2,\dots,N_{transformer} \quad (14)$$

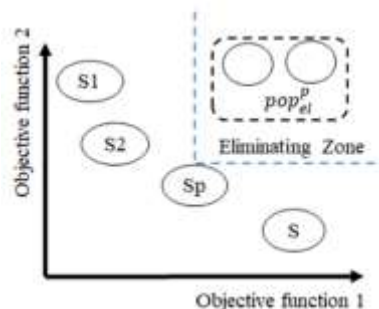
ز- محدودیت‌های ژنراتورهای تولید پراکنده: منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع به دو صورت PQ و PV مدل می‌شوند. از آنجاکه سیستم‌های توزیع سه فاز نامتعادل است، منابع تولید پراکنده به دو روش کنترل می‌شوند. زمانی که این منابع به روش PV مدل می‌شوند، به منظور حفظ ولتاژ در محدوده مجاز باید توان راکتیو تولید کنند. در این مطالعه از PQ برای مدل‌سازی تولید پراکنده استفاده شده است [۳۱،۳۲]. محدوده توان واحدهای تولید پراکنده مطابق رابطه زیر است:

$$P_{DG}^{min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG}^{max} \quad (15)$$

که در آن $P_{DG,Min}$ و $P_{DG,Max}$ بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو واحد تولید پراکنده i -ام هستند. N_{DG} بیانگر تعداد واحدهای تولید پراکنده است.

۳- استراتژی چندهدفه

این بخش یک روش جدید برای حل مسائل چندهدفه ارائه می‌کند. این استراتژی همه جمعیت‌ها را بر اساس مقدار شایستگی آن‌ها به ترتیب نزولی مرتب می‌کند. سپس برای هر ذره یک ناحیه حذفی مطابق شکل (۲) ایجاد می‌شود که بر اساس آن بخشی از جمعیت حذف می‌شود. این استراتژی بر عملکرد منطقه حذف تکیه دارد، برای انجام این روش ابتدا یک جمعیت اولیه (pop) ساخته می‌شود و سپس جمعیت اولیه را بر اساس مقدار شایستگی مرتب می‌کنیم. هنگامی که یک منطقه حذفی برای جمعیت P -ام ایجاد می‌کنیم، ذرات نزدیک به این منطقه حذف می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ذرات خارج از این منطقه مجموعه راه‌حل‌های غیر غالب را تشکیل می‌دهند. با توجه به این که توابع هدف متفاوت هستند و در یک محدوده قرار نمی‌گیرند، هر تابع هدف با استفاده از تصمیم‌گیری فازی با مقداری بین ۰ و ۱ جایگزین می‌شود [۱۴،۱۵]. تابع عضویت هر تابع هدف برای هر ذره مطابق رابطه (۱۶) بیان می‌شود که در آن هر تابع هدف به‌طور مستقل برای ارائه $f_{i,Min}$ و $f_{i,Max}$ بهینه‌شده است [۱۴،۱۵]. مقدار عضویت نرمال شده هر ذره در مخزن با استفاده از رابطه (۱۷) ارزیابی می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، هر سه تابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند و بهینه‌سازی هم‌زمان تلفات توان، انرژی توزیع نشده و تعداد سوئیچینگ دشوار و پیچیده است. الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از مفهوم استراتژی بهینه پارتو^{۲۴} برای به دست آوردن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیر غالب برای حل مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع استفاده می‌کند.



شکل (۲): حذف منطقه برای هر محلول

Figure (2): Eliminating zone for each solution

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^{\min} \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(x) \leq f_i^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

$$N_{\mu j} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n W_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (17)$$

در طول فرآیند جستجو، یک مخزن خارجی نیز برای ذخیره داده‌های غیر غالب در نظر گرفته می‌شود و به اپراتور اجازه می‌دهد تا بین توابع هدف مطابق با اولویت ترجیحی خود مصالحه برقرار کند.

۴- رویکرد پیشنهادی

الگوریتم‌های تکاملی به دلیل سادگی و پیچیدگی محاسباتی کم برای انواع مسائل بهینه‌سازی، در سال‌های اخیر محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند، همچنین اکنون نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی قابل اعتمادتر هستند. شرح مختصری از الگوریتم‌های تکاملی در ادامه ارائه شده که عبارتند از: اجتماع ذرات، جهش قورباغه و اجتماع ذرات-جهش قورباغه بهینه شده.

۴-۱- بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات، یکی از بهترین روش‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت، از دسته‌های پرندگان و ماهی‌ها الهام می‌گیرد. هر ذره در این روش این پتانسیل را دارد که راه‌حلی برای مسئله بهینه‌سازی باشد. هر ذره با استفاده از بهترین دانش قبلی و بهترین عضو یک گروه به مکان بهینه منتقل می‌شود [۳۳]. دو بردار در فضای جستجو برای تعیین موقعیت هر ذره استفاده می‌شود: بردار موقعیت $X=[X_1, X_2, \dots, X_n]$ و بردار سرعت $V=[V_1, V_2, \dots, V_n]$. هر ذره در این روش این توانایی را دارد که موقعیت خود را با استفاده از سرعت فعلی، تجربه گذشته و تجربه ذرات نزدیک خود بهبود بخشد. $PB=[PB_1, PB_2, \dots, PB_n]$ بهترین جواب قبلی برای ذره m -ام و $GB=[GB_1, GB_2, \dots, GB_n]$ است. بهترین موقعیت سراسری کل ذرات است. معادله‌های (۱۸) و (۱۹) برای به‌روزرسانی موقعیت و سرعت هر ذره استفاده می‌شوند.

$$V_m^{k+1} = W V_m^k + c_1 \times \text{rand}_1 \times (PB_m^k - X_m^k) + c_2 \times \text{rand}_2 \times (GB^k - X_m^k) \quad (18)$$

$$X_m^{k+1} = X_m^k + V_m^{k+1} \quad (19)$$

در رابطه بالا، W اینرسی است که مطابق رابطه (۲۰) معمولاً از ۱ به ۰ به صورت خطی کاهش می‌یابد [۳۴]:

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (20)$$

۴-۲- الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه

یکی از الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت که توسط لنسی و یوسف معرفی شده است، جهش قورباغه است [۳۰]. یک جمعیت اولیه از قورباغه‌ها (مجموعه‌ای از جواب‌ها) به طور تصادفی در این رویکرد تولید می‌شود. پس از آن، قورباغه‌ها در چندین گروه تقسیم می‌شوند. در این الگوریتم، هر قورباغه ایده خاص خود را دارد و می‌تواند در طول تکامل از ایده‌های دیگر قورباغه‌ها استفاده کند. مراحل تکامل این الگوریتم به شرح زیر است:

- تولید جمعیت اولیه: جمعیت اولیه مطابق رابطه (۲۱) به صورت تصادفی در بازه مسئله تولید می‌شود.

$$X_p = X_p^1 + \text{rand} \times (X_p^1 - X_p^h) \quad (21)$$

قورباغه‌ها بر اساس مقدار شایستگی به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند، سپس با استفاده از یک فرآیند خاص در گروه‌های مختلف مرتب می‌شوند [۳۵].

- مراحل جستجوی محلی: بهترین و بدترین مقدار شایستگی قورباغه‌ها در هر گروه به ترتیب با متغیرهای X_b و X_w نمایش داده می‌شوند. علاوه بر این، X_G بهترین قورباغه در بین تمام گروه‌ها را نشان می‌دهد. معادله‌های (۲۲) الی (۲۴) موقعیت بدترین قورباغه را در هر گروه تغییر می‌دهد.

$$D_i = \text{rand} \times (X_b - X_w) \quad (22)$$

$$X_w^{\text{new}} = X_w + D_i \quad (23)$$

$$-D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad (24)$$

با توجه به معادلات فوق، اگر قورباغه‌ای با شایستگی بهتر تولید شود، قورباغه جدید با بدترین قورباغه جایگزین می‌شود. در غیر این صورت، قورباغه با بهترین تناسب X_G با X_b در رابطه (۲۳) جایگزین می‌شود. سپس، اگر قورباغه‌ای با شایستگی بهتر تشکیل شود، این قورباغه با قورباغه بدتر جایگزین می‌شود. در غیر این صورت، یک قورباغه تصادفی جدید جایگزین بدترین قورباغه می‌شود.

- ترکیب جمعیت: همه گروه‌ها باهم ترکیب می‌شوند و قورباغه‌ها به ترتیب نزولی بر اساس شایستگی در داخل گروه‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند؛ و دوباره فرایند بروز رسانی موقعیت قورباغه‌ها انجام می‌شود، فرایند تکامل تا زمانی که نیاز توقف برآورده شود تکرار می‌شود. رویکرد متداول جهش قورباغه که بر تغییر موقعیت قورباغه با کمترین شایستگی تمرکز دارد، برای تکامل همه جمعیت، به‌ویژه برای قورباغه‌هایی با برازندگی بهتر، کافی نیست. در نتیجه، تمام قورباغه‌ها در الگوریتم متداول جهش قورباغه در فرایند تکامل شرکت نمی‌کنند و این نقص موجب همگرایی زودرس یا گیر افتادن در بهینه‌های محلی می‌شود. از این رو الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه مبتنی بر معرفی فرایند جدید تکاملی در این مطالعه ارائه می‌شود. ایده اولیه روش بهبود یافته جهش قورباغه، بهبود موقعیت قورباغه‌های تصادفی با برازندگی بهتر است. موقعیت قورباغه i -ام با شایستگی بهتر با توجه معادله‌های (۲۵) و (۲۶) بهبود می‌یابد که در آن D نشان دهند سرعت قورباغه i -ام در الگوریتم بهبود یافته است. $X_{i,q}$ و $X_{z,q}$ به ترتیب قورباغه تصادفی از میان قورباغه‌ها با شایستگی بهتر و قورباغه با شایستگی بهتر هستند.

$$D_i^{q+1} = c_1 \times \text{rand}_1^q \times d_i^q + c_2 \times \text{rand}_2^q \times (X_z^q - X_i^q), \quad i=1,2,\dots,n \quad (25)$$

$$X_i^{q+1} = X_i^q + D_i^{q+1} \quad (26)$$

۳-۴ ترکیبی اجتماع ذرات - بهبود یافته جهش قورباغه

الگوریتم اجتماع ذرات به دلیل سادگی در اجرا و سرعت بالا، برای حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی پیچیده مورداستفاده قرار می‌گیرد. مزیت کلیدی روش جهش قورباغه نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی، حداقل نیاز ذخیره‌سازی این روش است. با توجه به اینکه ماهیت این الگوریتم‌ها بر اساس جمعیت اولیه است، آن‌ها دارای نقایصی مانند گیر افتادن در بهینه محلی هستند و مدتی طول می‌کشد تا به بهینه سراسری برسند. به‌منظور بهبود قابلیت جستجوی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و تنوع جمعیت، یک روش جدید جهش در الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه گنجانده شده است. ایده اصلی ادغام الگوریتم اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه استفاده از مزایای آن‌ها به‌منظور غلبه بر عیوب مرتبط با هر یک از این الگوریتم‌ها به‌صورت جداگانه است. مزایای روش ترکیبی اجتماع ذرات - بهبود یافته جهش قورباغه نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی شده در این مقاله، سرعت، دقت بالا، بار محاسباتی کمتر و کاهش احتمال به دام افتادن در بهینه محلی است. فلوچارت الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در شکل (۳) این مفهوم را نشان می‌دهد. حال، مراحل اجرا روش ترکیبی اجتماع ذرات - بهبود یافته جهش قورباغه را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

مرحله ۱- ایجاد یک جمعیت اولیه از ذرات با موقعیت و سرعت تصادفی.

مرحله ۲- ارزیابی توابع هدف را برای تمام ذرات جمعیت با استفاده از رابطه‌های (۱)، (۳) و (۷).

مرحله ۳- ارزیابی تابع عضویت هر تابع هدف را با معادله (۱۷).

مرحله ۴- استفاده از معادله (۱۸) برای محاسبه مقدار عضویت نرمال شده برای همه ذرات.

مرحله ۵- استفاده از استراتژی بهینه پارتو برای به‌دست آوردن توابع هدف نرمال شده از مرحله قبل و ذخیره راه‌حل‌های غیرغالب.

مرحله ۶- تقسیم ذرات به K گروه مختلف بر اساس ترتیب نزولی مقدار شایستگی.

مرحله ۷- GB و PB را برای هر ذره در هر گروه تعیین کنید.

مرحله ۸- بروز رسانی موقعیت و سرعت ذره r -ام در گروه z -ام (بر اساس ترکیب اجتماع ذرات-جهش قورباغه بهبود یافته) با استفاده از معادله‌های (۲۷) و (۲۸)، این روش برای همه ذرات در هر گروه اجرا می‌شود.

$$D_{r,j}^{iter+1} = W \times D_{r,j}^{iter} + C_1 \times rand_1 \times (X_{Pbest} - X_{r,j}^{iter}) + C_2 \times rand_2 \times (X_{Gbest} - X_{r,j}^{iter}) \quad (27)$$

$$X_{r,j}^{iter+1} = X_{r,j}^{iter} + D_{r,j}^{iter+1} \quad (28)$$

مرحله ۹- جمعیت به‌روز شده ذرات به‌دست‌آمده از الگوریتم قبلی به‌عنوان قورباغه‌های مجازی تعریف می‌شود.

مرحله ۱۰- ارزیابی توابع هدف را برای همه ذرات به‌منظور شناسایی بهترین قورباغه در هر گروه.

مرحله ۱۱- تعیین X_i و X_z را در هر گروه.

مرحله ۱۲- بروز رسانی موقعیت i امین قورباغه را (بر اساس استراتژی جهش قورباغه بهبود یافته) با استفاده از معادله‌های (۲۶) و (۲۷)، این روش برای همه گروه‌ها اجرا می‌شود.

مرحله ۱۳- ارزیابی توابع هدف را با استفاده از رابطه‌های (۱)، (۳) و (۷).

مرحله ۱۴- ارزیابی تابع عضویت هر تابع هدف را با رابطه (۱۷).

مرحله ۱۵- محاسبه مقدار عضویت نرمال شده برای همه ذرات را با رابطه (۱۸).

مرحله ۱۶- استفاده از استراتژی بهینه‌سازی پارتو برای به‌دست آوردن توابع هدف نرمال شده از مرحله قبل و ذخیره راه‌حل‌های غیرغالب.

مرحله ۱۷- بررسی معیار همگرایی (تعداد حداکثر تکرار از پیش تعیین شده) و سپس اگر معیار همگرایی برآورده شد، فرآیند بهینه‌سازی به پایان می‌رسد و G_{best} به‌عنوان جواب نهایی انتخاب می‌شود در غیر این صورت به مرحله ۷ برمی‌گردد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه، پخش بار و توابع هدف در نرم‌افزار متلب روی دستگاه لپ‌تاپ Core i7-2600 اینتل، پردازنده مرکزی ۳/۴ گیگاهرتز، حافظه ۸ گیگابایتی پیاده‌سازی می‌شوند. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، از دو سیستم آزمون ۳۳ و ۷۰ باسه استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات-بهبود یافته جهش قورباغه جمعیت اولیه ۳۰۰، حداکثر تعداد تکرار ۲۰۰، تعداد گروه ۵، $W = [0.4-0.9]$ و C_1 و C_2 برابر ۴ هستند. پارامترهای روش اجتماع ذرات جمعیت اولیه ۳۰۰، حداکثر تعداد تکرار ۲۰۰، $W = [0.4-0.9]$ و C_1 و C_2 برابر ۴ هستند. پارامترهای روش بهبود یافته جهش قورباغه جمعیت اولیه ۳۰۰، حداکثر تعداد تکرار ۲۰۰ و تعداد گروه برابر ۵ است. قبل از حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع سه تابع بنچمارک با سه روش مورد نظر در این مطالعه بهینه‌سازی می‌شوند.

۵-۱- ارزیابی ترکیب اجتماع ذرات و جهش قورباغه بهبود یافته برای بهینه‌سازی توابع معیار

روش‌های تکاملی بهینه‌سازی شامل اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه برای ۳ تابع معیار آزمایشی مطابق رابطه (۲۹) [۳۶] جهت بهینه‌سازی عددی محدود اعمال می‌شوند. تعداد جمعیت اولیه و ماکزیمم تکرار برای هر کدام از الگوریتم‌های تکاملی به ترتیب برابر ۲۰ و ۳۰ است. نتایج بهینه‌سازی هر سه تابع در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین مقدار میانگین و انحراف معیار برای هر سه الگوریتم در بیست آزمایش مختلف در جدول (۲) آمده است.

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x) = \sum_{i=1}^1 X_i^2 & -100 \leq X \leq 100, f_{\min} = 0 \\ f_2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100 \times (X_{i+1} - X_i)^2 + (X_i - 1)^2] & -30 \leq X \leq 30, f_{\min} = 0 \\ f_3(x) = \sum_{i=1}^n (X_i + 0.5)^2 & -500 \leq X \leq 500, f_{\min} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Table (1): Experimental results on unimodal benchmark functions

جدول (۱): نتایج تجربی روی توابع معیار تک‌وجهی

تابع	اجتماع ذرات		بهبودیافته جهش قورباغه		ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
f_1	$9/85e-16$	$6/69e-16$	$5/36e-14$	$1/01e-14$	$5/08e-25$	$1/25e-25$
f_2	$2/67e+1$	$3/9e+00$	$5/12e-3$	$1/28e-3$	$2/68e-3$	$2.12e-3$
f_3	$4/88e-17$	$4/39e-17$	$5/12e-16$	$2/28e-16$	$1/35e-26$	$8/35e-26$

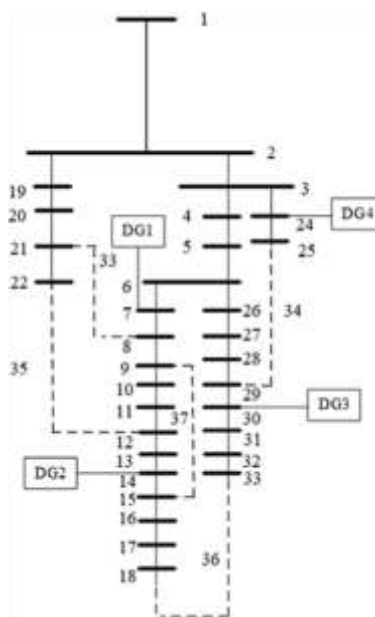
با توجه به جدول (۱)، واضح است که روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه نسبت به الگوریتم‌های دیگر مانند اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در بهینه‌سازی توابع معیار به پاسخ‌های کارآمدتری رسیده است. همچنین کمترین انحراف استاندارد روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر، توانایی الگوریتم پیشنهادی را در همگرایی به بهینه سراسری را در آزمایش‌های مختلف اثبات می‌کند.

۲-۵- مورد مطالعاتی اول

شبکه توزیع ۱۲/۶۶ کیلوولت ۳۳ باسه [۳۷]، به‌عنوان اولین سیستم آزمایشی در این مطالعه استفاده می‌شود. تلفات اولیه قبل از تجدید آرایش ۲۰۲/۶۷ کیلووات است. نمایش تک‌خطی از این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. چهار ژنراتور تولید پراکنده در این مطالعه به کار گرفته شده‌اند: دو ژنراتور با ظرفیت ۳۰۰ کیلووات در باس‌های ۷# و ۱۴# و دو ژنراتور با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات در باس‌های ۲۴# و ۳۰# نصب شده‌اند.

۱-۲-۵- بهینه‌سازی تلفات توان

مقادیر بهینه و متغیرهای کنترل مربوط به بهینه‌سازی تلفات توان در غیاب ژنراتورهای تولید پراکنده در جدول‌های (۲) و (۳) آمده است. در جدول (۲) بهترین، بدترین و میانگین نتایج برای الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در ۳۰ اجرا به همراه مقدار انحراف معیار ارائه شده است. با توجه به جدول‌های فوق، روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه نتایج مشابه و یا کمی بهتر نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد.



شکل (۳): نمودار تک‌خطی سیستم آزمون ۳۳-باسبه

Figure (3): Single-line diagram of 33 bus test system

Table (2): Findings of power loss optimization without DGs

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی تلفات توان بدون واحدهای تولید پراکنده

روش‌ها	تلفات توان (کیلووات)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف
اجتماع ذرات- مورچگان [۴]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
ژنتیک [۱۷]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
هارمونی [۱۸]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
اجتماع ذرات- زنبور عسل [۳۹]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
جستجوی گرانشی [۱۴]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
اجتماع ذرات- قورباغه [۱۵]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
اصلاح شده قورباغه [۱۱]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
انتخابی اجتماع ذرات [۹]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
تطبیقی نهنگ [۲۶]	۱۳۹/۵۳	-	-	-
اجتماع ذرات	۱۴۰/۲۸۲	۱۴۱/۷۸۱	۱۴۳/۹۴	۱/۳۸۰
بهبودیافته جهش قورباغه	۱۳۹/۹۸۲	۱۴۰/۴۳۵	۱۴۱/۹۲۱	۰/۵۲۹
ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه	۱۳۹/۵۳	۱۳۹/۵۳	۱۳۹/۵۳	۰

Table (3): CPU time and control variables for various algorithms

جدول (۳): زمان پردازش و متغیرهای کنترلی برای الگوریتم‌های مختلف

روش‌ها	سوئیچ‌های باز شده	زمان پردازش (ثانیه)
اجتماع ذرات- مورچگان [۴]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۸
ژنتیک [۱۷]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۸
هارمونی [۱۸]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۸
اجتماع ذرات- زنبور عسل [۳۴]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۸
جستجوی گرانشی [۱۴]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۶/۸۳
هیبرید اجتماع ذرات- قورباغه [۱۵]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	۸
اصلاح شده قورباغه [۱۱]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	-
انتخابی اجتماع ذرات [۹]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	-
تطبیقی نهنگ [۲۶]	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	-
اجتماع ذرات	۷-۹-۳۰-۳۴-۳۷	۱/۵۹۲
بهبودیافته جهش قورباغه	۷-۱۴-۹-۳۲-۲۸	۱/۵۷۷
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۷-۱۴-۹-۳۲-۲۷	۱/۵۶۵

Table (4): Findings of power loss optimization with DGs

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی تلفات توان با واحدهای تولید پراکنده

روش‌ها	تلفات توان (کیلووات)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف
اجتماع ذرات	۷۳/۸۹۵	۷۵/۹۲۸	۷۸/۷۸۲	۱/۸۹۲
بهبودیافته جهش قورباغه	۷۲/۷۳۵	۷۳/۲۱۱	۷۳/۸۹۱	۰/۵۱۹
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۷۲/۲۴۱	۷۲/۶۰۸	۷۳/۲۸۹	۰/۳۸۲

جدول‌های (۴) و (۵) نتایج الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه به همراه متغیرهای کنترلی مربوطه به بهینه‌سازی تلفات توان در حضور ژنراتورهای تولید پراکنده را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج جدول‌ها، واحدهای تولید پراکنده نقش مهمی در کاهش تلفات توان دارند. علاوه بر این، الگوریتم ترکیبی اجتماع

ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه پیشنهادی در یافتن بهترین پاسخ برای مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی مورد نظر در این مطالعه، عملکرد بهتری دارد.

۲-۵- بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده

مقادیر بهینه و متغیرهای کنترل مربوطه برای بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده با استفاده از الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در جدول‌های (۶) الی (۹) در غیاب و حضور واحدهای تولیدپراکنده ارائه شده است. این جدول‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از نظر نتایج، بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. این یافته‌ها توانایی الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه را برای مدیریت مسئله چالش برانگیز تجدید آرایش شبکه توزیع نشان می‌دهد. علاوه بر این، شاخص انرژی توزیع نشده در سیستم ۳۳ باسه باوجود واحدهای تولید پراکنده کاهش می‌یابد (جدول ۸). جدول‌های (۴) و (۷) نشان می‌دهند که روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه به زمان پردازش کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در طول ۳۰ آزمایش مختلف دارد. شکل (۴) منحنی همگرایی تابع هدف تلفات را برای روش‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه نشان می‌دهد.

Table (5): Optimum control variables for various methods

جدول (۵): متغیرهای کنترلی بهینه برای روش‌های مختلف

خروجی واحدهای تولید پراکنده (کیلووات)	سوئیچ‌های باز شده	روش‌ها
۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	اجتماع ذرات
۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	بهبودیافته جهش قورباغه
۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۷-۱۴-۹-۳۲-۳۷	ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه

Table (6): Findings of ENS optimization without DGs

جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده بدون واحدهای تولید پراکنده

روش‌ها	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)			
	انحراف	بدترین	میانگین	بهترین
اجتماع ذرات	۳۰۹/۸	۵۴۶۹۲/۲۳	۵۴۱۸۵/۴۱	۵۳۷۹۸/۱۹
بهبودیافته جهش قورباغه	۲۰۹/۸	۵۳۷۹۸/۱۹	۵۳۲۹۹/۳۳	۵۳۲۹۹/۳۳
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۰	۵۳۲۹۹/۳۳	۵۳۲۹۹/۳۳	۵۳۲۹۹/۳۳

Table (7): CPU time and control variables for various algorithms

جدول (۷): زمان پردازش و متغیرهای کنترلی برای الگوریتم‌های مختلف

زمان پردازش (ثانیه)	سوئیچ‌های باز شده	روش‌ها
۱/۶۶۸	۳۷-۳۵-۱۳-۱۹-۱۵	اجتماع ذرات
۱/۶۸۴	۳۷-۳۵-۳۴-۱۹-۱۷	بهبودیافته جهش قورباغه
۱/۶۵۸	۳۷-۳۵-۳۴-۱۹-۱۷	ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه

Table (8): Findings of ENS optimization with DGs

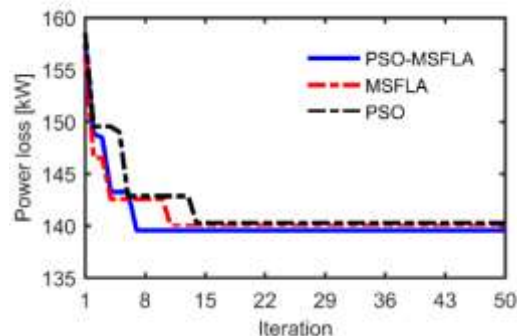
جدول (۸): نتایج بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده باوجود واحدهای تولیدپراکنده

روش‌ها	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)			
	انحراف	بدترین	میانگین	بهترین
اجتماع ذرات	۲۴۶/۱	۳۱۳۰۵/۳۳	۳۰۹۵۱/۸۷	۳۰۷۰۲/۰۹
بهبودیافته جهش قورباغه	۶۰/۷	۳۰۷۸۴/۹	۳۰۷۱۳/۳۴	۳۰۶۵۶/۹۶
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۳۸/۳	۳۰۶۵۶/۹۶	۳۰۵۰۵/۹۳	۳۰۵۰۵/۸۵

Table (9): Optimum control variables for various methods

جدول (۹): متغیرهای کنترلی بهینه برای روش‌های مختلف

روش‌ها	سوئیچ‌های باز شده	خروجی واحدهای تولید پراکنده (کیلووات)
اجتماع ذرات	۳۷-۳۵-۳۴-۱۹-۱۷	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰
بهبودیافته جهش قورباغه	۳۷-۳۵-۲۹-۱۹-۱۳	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته قورباغه	۳۷-۳۵-۲۹-۱۹-۲۷	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰



شکل (۴): منحنی همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی تلفات توان بدون واحدهای تولید پراکنده

Figure (4): Convergence curve of different algorithms for power loss optimization without DGs

الگوریتم پیشنهادی ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، زودتر از سایر الگوریتم‌ها به جواب بهینه همگرا می‌شود. به عبارت دیگر، الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، می‌تواند به نتایج بهتری در مدت زمان کوتاه‌تری برسد.

۳-۲-۵- بهینه‌سازی چندهدفه

جبهه‌های بهینه پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف مختلف در شکل‌های (۵) الی (۷) نشان داده شده تا اثربخشی الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته را در حل مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع، نمایان شود. راه‌حل مصالحه و متغیرهای کنترلی مربوط به بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. نتایج جدول (۱۱) نشان می‌دهد که روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در مقایسه با الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه، در حل مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع، عملکرد بهتری دارد.

Table (10): Optimal compromise answer to the MODFR problem

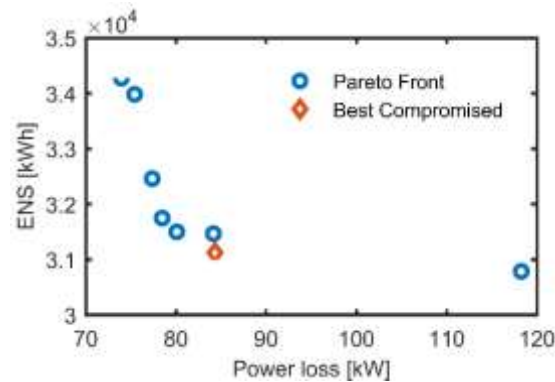
جدول (۱۰): پاسخ مصالحه برای مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع

روش‌ها	تلفات توان (کیلووات)	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)	تعداد عملیات سوئیچینگ
اجتماع ذرات	۸۱/۵۸	۳۲۵۰۷/۵۴	۴
بهبودیافته جهش قورباغه	۸۱/۷	۳۱۶۰۳/۲۲	۴
ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته قورباغه	۸۲/۲۹	۳۱۱۲۰/۲۶	۲

Table (11): Optimal control variables for various methods

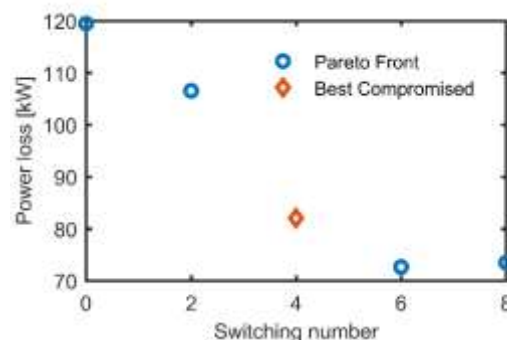
جدول (۱۱): متغیرهای کنترل بهینه برای روش‌های مختلف

روش‌ها	سوئیچ‌های باز شده	خروجی واحدهای تولید پراکنده (کیلووات)
اجتماع ذرات	۱۹-۳۱-۳۴-۳۵-۳۷	۴۹۹/۹۹ - ۵۰۰ - ۲۹۹/۱۵ - ۲۹۴/۲۲
بهبودیافته جهش قورباغه	۱۵-۱۹-۳۴-۳۵-۳۷	۴۹۹/۹۹ - ۴۹۹/۹۲ - ۲۹۴/۹۱ - ۳۰۰
ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته قورباغه	۱۵-۳۷-۳۴-۳۵-۳۳	۴۹۹/۹۹ - ۵۰۰ - ۲۹۹/۱۸ - ۳۰۰



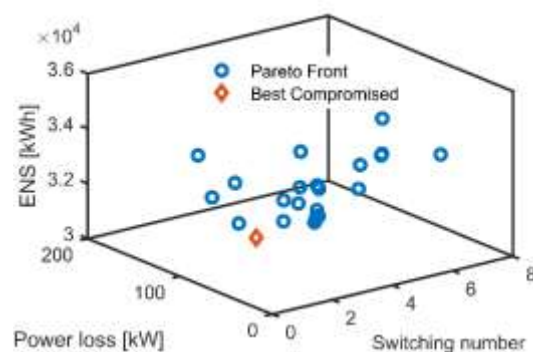
شکل (۵): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف انرژی توزیع نشده و تلفات توان

Figure (5): Pareto-front for ENS and power loss objective functions



شکل (۶): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف تلفات توان و تعداد سوئیچینگ

Figure (6): Pareto-front for power loss and switching number objective functions



شکل (۷): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی سه تابع هدف مختلف

Figure (7): Pareto-front for different three functions

با توجه به شکل (۵)، در بهینه‌سازی توابع انرژی توزیع نشده و تلفات توان، حداقل مقادیر تلفات توان و انرژی توزیع نشده به ترتیب ۷۳/۳۵ کیلووات و ۳۰۷۰۹/۲۳ کیلووات ساعت در سال هستند، همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است. مقادیر تلفات بهینه توان و انرژی توزیع نشده در راه‌حل مصالحه (بارنگ قرمز مشخص شده است) به ترتیب ۸۴/۷۵ کیلووات و ۳۱۱۸۹/۲۳ کیلووات ساعت در سال هستند که نشان دهنده اختلاف کمتر از ۴ درصد بین جواب بهینه و جواب مصالحه است. بر اساس شکل‌های (۵) الی (۷)، به نظر می‌رسد که روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مؤثر است.

۳-۵- مورد مطالعاتی دوم

شکل (۸) نمودار تک‌خطی یک شبکه ۱۱ کیلوولت [۳۳،۳۴] را با دو پست چهار فیدره، ۷۰ باس و ۷۸ انشعاب (شامل انشعاب‌های اتصالی) نشان می‌دهد.

این سیستم آزمایشی متشکل از هفت واحد تولید پراکنده در باس‌های شماره‌های ۹، ۱۶، ۲۴، ۳۳، ۴۳، ۵۴ و ۶۶ است که هر کدام دارای ظرفیت ۵۰۰ کیلووات هستند.

۱-۳-۵- بهینه‌سازی تلفات توان

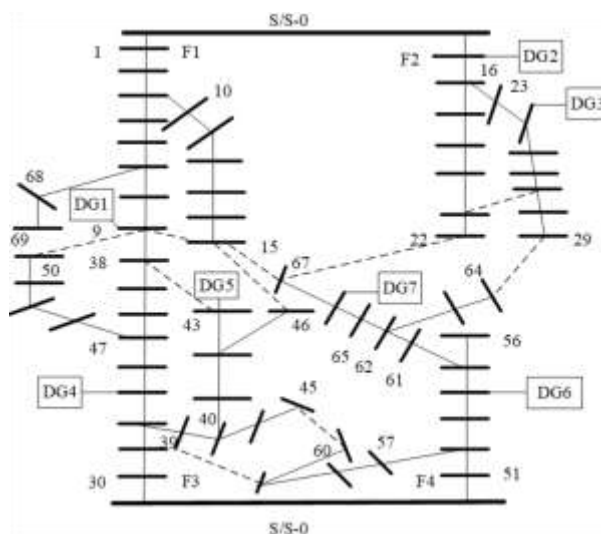
مقادیر بهینه و متغیرهای کنترلی مرتبط با بهینه‌سازی تلفات توان بدون واحدهای تولیدپراکنده با استفاده از الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه در جدول‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. همچنین نتایج الگوریتم‌های مورد استفاده در این مطالعه با خروجی‌های الگوریتم‌های دیگر برگرفته از سایر مراجع مقایسه شده است. مقادیر بهترین، بدترین، متوسط و انحراف معیار تابع هدف تلفات حاصل از روش‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در ۳۰ اجرا در جدول (۱۲) نشان داده شده است.

اثربخشی الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع تصدیق می‌شود زیرا یافته‌های بهینه‌تری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. همچنین مقادیر بهترین، بدترین، متوسط و انحراف معیار تابع هدف تلفات در حضور واحدهای تولیدپراکنده حاصل از روش‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه به ترتیب (۹۲/۹۲۳، ۹۲/۱۷۷ و ۹۱/۸۰۵)، (۹۴/۶۷۱، ۹۳/۶۰۵ و ۹۲/۴۸۲)، (۹۸/۷۵۵، ۹۵/۲۳۰ و ۹۴/۲۵۹) و (۲/۷۱۸، ۱/۵۴۹ و ۱/۱۴۸) کیلووات هستند. واضح است که الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه راه‌حل بهتری نسبت به الگوریتم‌های موجود ارائه می‌دهد.

در جدول (۱۴)، مقایسه‌ای بین نتایج تابع هدف تلفات در عدم حضور و حضور تولیدپراکنده صورت گرفته است، از نتایج جدول (۱۴)، واضح است که الگوریتم پیشنهادی به جواب‌های بهتری رسیده است. همچنین در نظر گرفتن تولیدپراکنده باعث کاهش تلفات شده است.

۲-۳-۵- بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده

مقادیر بهینه و متغیرهای کنترلی مرتبط با بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده بدون حضور واحدهای تولیدپراکنده حاصل از الگوریتم‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه در جدول‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. مطابق نتایج جدول (۱۴)، الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه در مقایسه یا سایر روش‌های تکاملی توانسته به جواب بهینه‌تری همگرا شود.



شکل (۸): نمودار تک خطی سیستم آزمون ۷۰ باسه

Figure (8): Single-line diagram of 70-bus test system

Table (12): Results obtained by optimizing the power loss without DGs
جدول (۱۲): نتایج بهینه‌سازی تلفات توان بدون حضور واحدهای تولیدپراکنده

روش‌ها	تلفات توان (کیلووات)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف
اجتماع ذرات- زنبورعسل [۳۹]	۲۰۵/۳۲۲	-	-	-
اجتماع ذرات- مورچگان [۴]	۲۰۲/۱۸۱	-	-	-
جستجوی فاخته بهبود یافته [۴]	۲۰۵/۶۱	-	-	-
ریشه دونده [۴]	۲۰۵/۶۱	-	-	-
جستجوی گرانشی [۱۴]	۲۰۲/۱۴۰	۲۰۲/۱۴۰	۲۰۲/۱۴۰	۰
اجتماع ذرات	۲۰۴/۵۹۱	۲۰۴/۷۸۱	۲۰۵/۱۰۵	۰/۲۵۵
بهبودیافته جهش قورباغه	۲۰۲/۶۲۴	۲۰۴/۳۴۱	۲۰۴/۵۹۱	۰/۹۶۴
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۲۰۱/۴۰۰	۲۰۱/۴۰۰	۲۰۱/۴۰۰	۰

Table (13): Optimal control variables and CPU time for different algorithms
جدول (۱۳): متغیرهای کنترلی بهینه و زمان پردازش برای الگوریتم‌های مختلف

روش‌ها	سوئیچ‌های باز شده	زمان پردازش (ثانیه)
اجتماع ذرات- زنبورعسل [۳۹]	۶۷-۸۰-۲۹-۵۲-۷۱-۷۴-۴۰-۴۷-۱۵-۷۷-۷۲	۸
اجتماع ذرات- مورچگان [۴]	۶۷-۸۰-۷۸-۵۲-۷۱-۳۱-۴۷-۷۶-۷۹-۷۸-۷۷	۸
بهبودیافته جستجوی فاخته [۴]	۴۶-۵۱-۶۷-۷۰-۷۱-۷۳-۷۵-۷۶-۷۹-۷۸-۷۷	۱۶۲
ریشه دونده [۴]	۴۶-۵۱-۶۷-۷۰-۷۱-۷۳-۷۵-۷۶-۷۹-۷۸-۷۷	۹۷
جستجوی گرانشی [۱۴]	۵۲-۷۱-۷۲-۶۷-۳۱-۴۷-۴۰-۷۷-۷۸-۱۵-۸۰	۸
اجتماع ذرات	۵۲-۷۱-۷۲-۶-۷۴-۴۷-۴۰-۷۷-۲۹-۷۹-۸۰	۵/۶۶
بهبودیافته جهش قورباغه	۵۲-۷۱-۷۲-۶۷-۳۱-۴۶-۴۰-۷۷-۷۸-۱۵-۸۰	۵/۸۴
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته قورباغه	۵۲-۷۱-۱۵-۶۷-۳۱-۴۶-۷۶-۷۷-۷۸-۷۹-۸۰	۵/۱۵

Table (14): Results obtained by optimizing the power loss with and without DGs
جدول (۱۴): نتایج بهینه‌سازی تلفات در عدم حضور و حضور واحدهای تولیدپراکنده

روش‌ها	تلفات توان (کیلووات ساعت)			
	بدون حضور تولید پراکنده		در حضور تولید پراکنده	
	بهترین	انحراف معیار	بدترین	انحراف معیار
اجتماع ذرات	۲۰۴/۵۹۱	۰/۲۵۵	۹۲/۹۲۳	۲/۷۱۸
بهبودیافته جهش قورباغه	۲۰۲/۶۲۴	۰/۹۶۴	۹۲/۱۷۷	۱/۵۴۹
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۲۰۱/۴۰۰	۰	۹۱/۸۰۵	۱/۱۴۸

همچنین مقادیر بهترین، بدترین، متوسط و انحراف معیار تابع هدف انرژی توزیع نشده در حضور واحدهای تولید پراکنده حاصل از روش‌های اجتماع ذرات، بهبودیافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه به ترتیب (۳۰۳۳۸/۰۵)، (۳۰۲۵۶/۰۷۲ و ۳۰۵۰۵/۰۵) (۳۰۶۹۰/۷۱۲)، (۳۰۴۸۶/۴۷۱ و ۳۰۲۸۴/۵۴۵)، (۳۱۵۱۳/۶۶۴ و ۳۱۱۲۰/۰۷۶ و ۳۰۷۰۲/۳۸۵) و (۵۴۷/۹۹۵ و ۳۸۸/۶۰۹ و ۳۴۷/۱۷۵) کیلووات ساعت بر سال هستند.

مطابق نتایج جدول (۱۵) و نتایج به‌دست آمده در حضور واحدهای تولیدپراکنده مشهود است که مقدار انرژی توزیع نشده در حضور واحدهای تولیدپراکنده کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از روش پیشنهادی در نبود واحدهای تولید پراکنده ۱۵۰۹۰۵/۸۷ کیلووات ساعت بر سال است، در حضور واحدهای تولید پراکنده، این مقدار به ۳۰۰۰۵/۶۲۷ کیلووات ساعت در سال کاهش می‌یابد.

از نتایج جدول‌های (۱۳) و (۱۶) مشهود است که روش ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه نسبت به دو روش تکاملی دیگر به زمان پردازش کمتری در ۳۰ آزمایش مختلف نیاز دارد. در جدول (۱۷)، مقایسه‌ای بین نتایج تابع هدف انرژی توزیع نشده در عدم حضور و حضور تولیدپراکنده صورت گرفته است. طبق نتایج جدول (۱۷)، بهبود نتایج تابع هدف انرژی توزیع نشده ناشی از حضور واحدهای تولیدپراکنده در مسئله است.

منحنی همگرایی تلفات توان حاصل از روش‌های اجتماع ذرات، بهبود یافته جهش قورباغه و ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه برخلاف سایر الگوریتم‌ها، تنها پس از ۱۰ تکرار به راه حل بهینه جهانی همگرا می‌شود، درحالی‌که الگوریتم‌های دیگر تا ۱۵ تکرار ادامه می‌دهند. واضح است که الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه قبل از الگوریتم‌های اجتماع ذرات و بهبودیافته جهش قورباغه به بهترین راه حل می‌رسد.

Table (15): Results obtained by optimizing the ENS without DGs

جدول (۱۵): نتایج بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده بدون واحدهای تولیدپراکنده

روش‌ها	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت / سال)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف معیار
اجتماع ذرات	۱۵۱۳۸۵/۶۶	۱۵۱۷۸۴/۵۴	۱۵۲۶۶۲/۴۲	۴۱۱/۴۵
بهبودیافته جهش قورباغه	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۱۵۱۰۰۰	۱۵۱۸۶/۱۲	۱۵۸/۴۹
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۰

Table (16): Optimal control variables for different algorithms

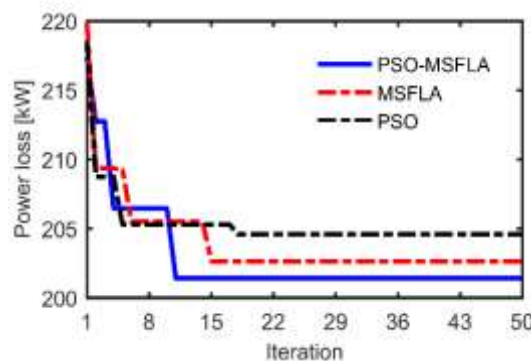
جدول (۱۶): متغیرهای کنترلی بهینه برای الگوریتم‌های مختلف

روش‌ها	سوئیچ‌های باز شده	زمان پردازش (ثانیه)
اجتماع ذرات	۴۹-۹-۷۲-۶۸-۶۵-۶۲-۴۰-۴۱-۷۸-۱۵-۸۰	۵/۶۶
بهبودیافته جهش قورباغه	۴۹-۸-۷۲-۶۸-۶۵-۶۲-۴۰-۴۱-۷۸-۱۵-۸۰	۵/۸۴
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۴۹-۸-۷۲-۶۸-۶۵-۶۲-۴۰-۴۱-۷۸-۱۵-۸۰	۵/۱۵

Table (17): Results obtained by optimizing the ENS with and without DGs

جدول (۱۷): نتایج بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده در عدم حضور و حضور واحدهای تولید پراکنده

روش‌ها	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت / سال)			
	بدون حضور تولید پراکنده		در حضور تولید پراکنده	
	بدترین	انحراف معیار	بدترین	انحراف معیار
اجتماع ذرات	۱۵۱۳۸۵/۶۶	۴۱۱/۴۵	۳۰۳۳۸/۰۵	۵۴۷/۹۹۹
بهبودیافته جهش قورباغه	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۱۵۸/۴۹	۳۰۲۵۶/۰۷	۳۸۸/۶۰۹
ترکیبی اجتماع ذرات- بهبودیافته جهش قورباغه	۱۵۰۹۰۵/۸۷	۰	۳۰۰۰۵/۶۲۷	۳۴۷/۱۷۵



شکل (۹): منحنی همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی تلفات توان بدون واحدهای تولید پراکنده

Figure (9): Convergence curve of different algorithms for power loss optimization without DGs

۳-۳-۵- بهینه‌سازی چندهدفه

مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع به‌عنوان یک مشکل چند هدفه در این بخش حل شده است. در جدول‌های (۱۹) و (۲۰)، جواب مصالحه و همچنین متغیرهای کنترلی برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف مختلف نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) نشان دهنده جبهه پارتو برای بهینه‌سازی مسئله دو و سه هدفه در این بخش هستند. نتایج جدول (۱۹) نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه پتانسیل خوبی برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع را داراست. مطابق جدول (۱۹) مقادیر تلفات توان، تعداد سوئیچینگ و انرژی توزیع نشده در راه حل مصالحه حاصل از الگوریتم اجتماع ذرات به ترتیب برابر ۹۹/۶۵ کیلووات، ۱۰ و ۳۸۷۷۵/۵۴ کیلووات ساعت بر سال هستند، درحالی‌که مقادیر همین توابع در راه حل مصالحه حاصل از روش اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه به ترتیب ۹۵/۳۳ کیلووات، ۸ و ۳۴۸۹۱/۴۱ کیلووات ساعت بر سال هستند. مطابق شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) که نشان دهنده پتانسیل خوب روش ترکیبی اجتماع ذرات- بهبود یافته جهش قورباغه در حل مسئله چندهدفه هستند، اپراتور سیستم نیز می‌تواند با تغییر ضریب اهمیت W_k برای هر یک از توابع هدف در معادله (۱۸)، تصمیمات مختلفی بگیرد. برای مثال، مطابق شکل (۱۰) اگر اپراتور آرایش شبکه با کمترین میزان تلفات توان را بخواهد، در آرایش انتخابی، مقدار تلفات توان ۹۲/۵۲ کیلووات و مقدار انرژی توزیع نشده ۴۵۰۵۴/۳۲ کیلووات ساعت بر سال است. از طرف دیگر، اگر اپراتور آرایش شبکه با کمترین مقدار انرژی توزیع نشده را بخواهد، در آرایش انتخابی مقدار انرژی توزیع نشده ۳۱۸۳۵/۲۳ کیلووات ساعت بر سال و میزان تلفات توان ۱۵۶/۴۵ کیلووات است.

Table (18): Compromise solution with control variables related to the multi-objective problem of distribution network reconfiguration

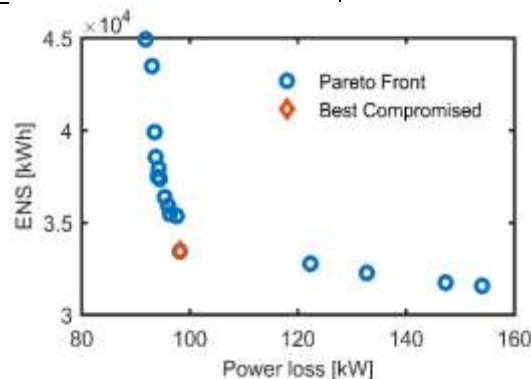
جدول (۱۸): راه‌حل مصالحه همراه با متغیرهای کنترلی مربوط به مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع

تعداد عملیات سوئیچینگ	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت/سال)	تلفات توان (کیلووات)	روش
۱۰	۳۸۷۷۵/۵۴	۹۹/۶۵	اجتماع ذرات
۱۲	۳۵۸۸۹/۸۹	۹۸/۰۵	بهبود یافته جهش قورباغه
۸	۳۴۸۹۱/۴۱	۹۵/۳۳	ترکیبی اجتماع ذرات- بهبود یافته جهش قورباغه

Table (19): Optimal control variables for different algorithms

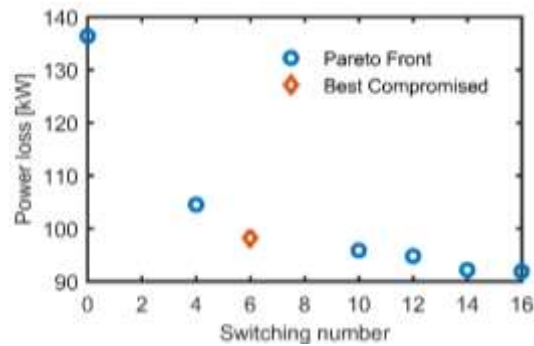
جدول (۱۹): متغیرهای کنترلی بهینه برای الگوریتم‌های مختلف

خروجی واحدهای تولید پراکنده (کیلووات)	سوئیچ‌های باز شده	روش
۴۴۸/۶۵ - ۵۰۰ - ۵۰۰ - ۵۰۰ - ۲۶۲/۱۹ - ۳۷۵/۲۲	۵۲-۷۱-۷۲-۶۷-۳۱-۷۵-۳۸-۷۷-۷۸-۱۲-۸۰	اجتماع ذرات
۴۹۹/۹۹ - ۴۹۹/۹۲ - ۳۱۱/۷۲ - ۴۹۹ - ۴۸۸/۹۵ - ۳۹۷/۵ - ۵۰۰ -	۵۱-۹-۷۲-۶۷-۷۴-۴۷-۷۶-۷۷-۲۹-۱۴-۸۰	بهبود یافته جهش قورباغه
۵۰۰ - ۵۰۰ - ۵۰۰ - ۵۰۰ - ۴۹۸/۱۱ - ۳۲۹/۴۶ - ۵۰۰	۵۱-۷۱-۷۲-۶۷-۷۴-۷۵-۳۸-۷۷-۲۹-۷۹-۸۰	ترکیبی اجتماع ذرات- بهبود یافته جهش قورباغه

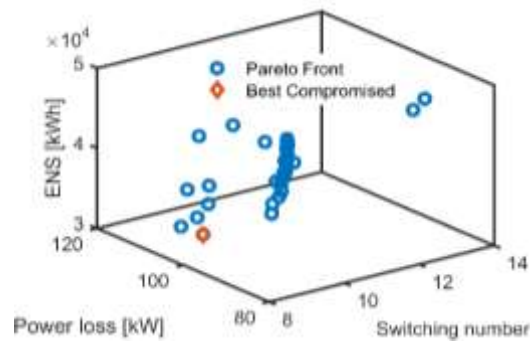


شکل (۱۰): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف انرژی توزیع نشده و تلفات توان

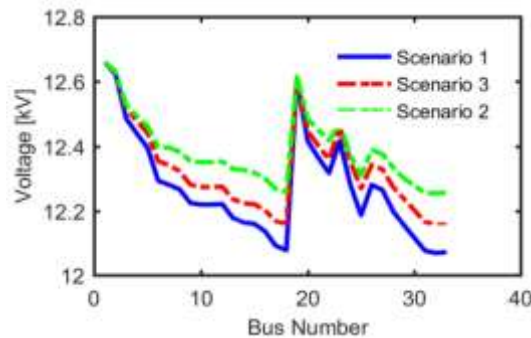
Figure (10): Pareto-front for ENS and power loss objective functions



شکل (۱۱): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی توابع هدف تلفات توان و تعداد سوئیچینگ
Figure (11): Pareto-front for power loss and switching number objective functions

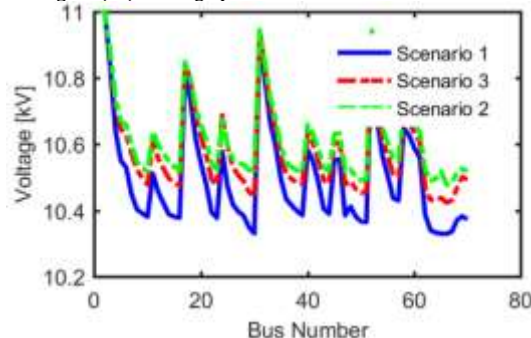


شکل (۱۲): جبهه پارتو برای بهینه‌سازی سه تابع هدف
Figure (12): Pareto-front for three objective functions



شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ در شبکه آزمون ۳۳ باسه

Figure (13): Voltage profile in 33-node test network



شکل (۱۴): پروفیل ولتاژ در شبکه آزمون ۷۰ باسه

Figure (14): Voltage profile in 70-node test network

به‌منظور تأثیر واحدهای تولید پراکنده و تجدید پیکانه‌اش شبکه توزیع بر روی پروفیل ولتاژ سناریوهای ۲ و ۳ به این شرح است: اثر تجدید آرایش شبکه توزیع در سناریو ۳ و اثر آن با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده در سناریو ۲ بر روی پروفیل ولتاژ سیستم‌های آزمون ۳۳ و ۷۰ گره به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. همچنین سناریو ۱ بر اساس وضعیت

اولیه شبکه‌های توزیع است. شکل‌های فوق نشان می‌دهند که در هر دو شبکه آزمون، تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به غیاب واحدهای تولید پراکنده تأثیر بهتری در بهبود پروفیل ولتاژ دارد.

۶- نتیجه‌گیری

مسئله چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در این مطالعه با استفاده از یک الگوریتم تکاملی جدید و قدرتمند که ترکیبی از روش‌های اجتماع ذرات و بهبود یافته جهش قورباغه است، حل شده است. توابع هدف مورد بررسی در این مطالعه، شامل به حداقل رساندن تلفات توان، انرژی توزیع نشده و تعداد عملیات سوئیچینگ هستند. محدودیت‌های موجود در این مسئله شامل حفظ ساختار شعاعی شبکه، محدودیت‌های ولتاژ باس‌ها، جریان فیدرها و ظرفیت ترانسفورماتورها است. الگوریتم پیشنهادی ترکیبی اجتماع ذرات-بهبود یافته جهش قورباغه بر روی سیستم‌های آزمون ۳۳ و ۷۰ باسه مورد آزمایش قرار گرفته است. یافته‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش ترکیبی اجتماع ذرات-بهبود یافته جهش قورباغه در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مطرح شده در پیشینه تحقیق، می‌تواند به راه‌حل‌های بهینه‌تری در بهینه‌سازی تک و چندهدفه برسد. در نهایت بر اساس نتایج شبیه‌سازی، استنباط‌های زیر قابل برداشت است:

- الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش‌های تکاملی دیگر عملکرد بهتری از نظر همگرایی و دقت ارائه می‌کند.
- الگوریتم پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در سیستم‌های آزمون متوسط و بزرگ دارد.
- الگوریتم پیشنهادی می‌تواند مشکلات تک‌هدفه و چندهدفه را بدون توجه به چالش‌هایی مانند پیچیدگی و مقیاس آن‌ها مدیریت کند.
- استفاده از واحدهای تولید پراکنده منجر به کاهش انرژی توزیع نشده و کاهش تابع هدف تلفات توان می‌شود.
- استفاده از شاخص انرژی توزیع نشده به همراه تلفات و تعداد سوئیچینگ شرایط قابل اطمینان‌تری را برای بهره‌برداری ایمن‌تری از شبکه توزیع را فراهم می‌کند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] R. Borjali-Navesi, D. Nazarpour-Akbari, R. Ghanizadeh, P. Alemi, "Coordination of switchable capacitor banks and dynamic network reconfiguration for the improvement of distribution network operation integrated with renewable energy resources", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 48, pp. 43-59, March 2022 (doi: 10.1001.1.23223871.1400.12.48.2.2).
- [2] A.B. Morton, I.M. Mareels, "An efficient brute-force solution to the network reconfiguration problem", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 996-1000, July 2000 (doi: 10.11591/ijeecs.v14.i2.ppab-cd).
- [3] D.S. Rani, N. Subrahmanyam, M. Sydulu, "Multi-objective invasive weed optimization—an application to optimal network reconfiguration in radial distribution systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 932-942, Dec. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.06.020).
- [4] T.T. Nguyen, "Optimization of distribution network configuration with multi objective function based on improved cuckoo search algorithm", *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 1685-1693, Aug. 2020 (doi: 10.11591/eei.v9i4.1886).
- [5] F. Alonso, D. Oliveira, A.Z. Souza, "Artificial immune systems optimization approach for multiobjective distribution system reconfiguration", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 840-847, Mar. 2015 (doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381120).
- [6] V. Roberge, M. Tarbouchi, F. Okou, "New encoding based on the minimum spanning tree for distribution feeder reconfiguration using a genetic algorithm", *Proceeding of the IEEE/ICEIT*, Tangiers, Morocco, May 2016 (doi: 10.1109/EITech.2016.7519574).

- [7] A. Roosta, H.-R. Eskandari, M. H. Khooban, "Optimization of radial unbalanced distribution networks in the presence of distribution generation units by network reconfiguration using harmony search algorithm", *Neural Computing and Applications*, vol. 31, pp. 7095-7109, Nov. 2019 (doi: 10.1515/ijeeps-2021-0093).
- [8] A. Landeros, S. Koziel, M. F. Abdel-Fattah, "Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization", *Journal of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 589-598, May 2019 (doi: 10.1155/2020/2353901).
- [9] R. Pegado, Z. Naupari, Y. Molina, C. Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO", *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 206-213, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.epsr.2018.12.030).
- [10] H. Lotfi, R. Ghazi, M.B. Naghibi Sistani, "Multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability in the presence of distributed generators", *Electric Power Components and Systems*, vol. 50, no. 8, pp. 426-442, Nov. 2022 (doi:10.1080/15325008.2022.2134509).
- [11] J. Siahbalaee, N. Rezanejad, G.B. Gharehpetian, "Reconfiguration and DG sizing and placement using improved shuffled frog leaping algorithm", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 16-17, pp. 1475-1414, Jan. 2020 (doi: 10.1080/15325008.2019.1689449).
- [12] V. Fathi, H. Seyedi, B.M. Ivatloo, "Reconfiguration of distribution systems in the presence of distributed generation considering protective constraints and uncertainties", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 5, Article Number: e12346, Feb. 2020 (doi: 10.1002/2050-7038.12346).
- [13] S.R. Tuladhar, J.G. Singh, W. Ongsakul, "Multi-objective approach for distribution network reconfiguration with optimal DG power factor using NSPSO", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 12, pp. 2842-2851, Sept. 2016 (doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0587).
- [14] M.R. Narimani, A. Azizivahed, R. Azizipanah, M. Javidsharifi, "Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost", *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 8, no.1 pp. 55-69, Jan. 2014 (doi: 10.1049/iet gtd.2013.0117).
- [15] A. Azizivahed, H. Narimani, E. Naderi, M. Fathi, M.R. Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration", *Energy*, vol. 138, no. 1, pp. 355-373, July 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.07.102).
- [16] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, "Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1344-1353, Dec. 2013 (doi: 10.1109/T-PWRD.2013.2292951).
- [17] A. Zidan, E.F. El-Saadany, "Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation", *Energy*, vol. 59, pp. 698-707, July 2013 (doi: 10.1016/j.energy.2013.06.061).
- [18] R. Srinivasa Rao, K. Ravindra, K. Satish, S.V.L. Narasimham, "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 317-325, May 2012 (doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227).
- [19] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, "Multi-objective probabilistic distribution feeder reconfiguration considering wind power plants", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 680-691, Nov. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2013.10.028).
- [20] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M.H. Khooban, "Intelligent stochastic framework to solve the reconfiguration problem from the reliability view", *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 245-259, Sept. 2014 (doi: 10.1049/iet-smt.2013.0106).
- [21] E. Mahboubi-Moghaddam, M.R. Narimani, M.H. Khooban, A. Azizivahed, M. Javidsharifi, "Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 76, pp. 35-43, Oct. 2015 (doi: 10.1016/j.iepes.2015.09.007).
- [22] S. Heang, V. Vai, P. Hem, D. Eam, L. You, S. Eng, "Optimal network reconfiguration with DGs placement and sizing in a distribution system using hybrid SOE and GA", *Proceeding of the IEEE/ECTI-CON*, pp. 1-4, Prachuap Khiri Khan, Thailand, May. 2022 (doi: 10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795530).
- [23] J. Dias Santos, F. Marques, L.P.G. Negrete, G.A.A. Brigatto, J.M. López-Lezama, N. Muñoz-Galeano, "A novel solution method for the distribution network reconfiguration problem based on a search mechanism enhancement of the improved harmony search algorithm", *Energies*, vol. 15, no. 6, Article Number: 2083, 2022 (doi: 10.3390/en15062083).
- [24] R. Fathi, B. Tousi, S. Galvani, "Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm", *Applied Soft Computing*, vol. 132, pp. 109828, Dec. 2022 (doi: 10.1016/j.asoc.2022.109828).
- [25] M.R. Babu, C.V. Kumar, S. Anitha, "Simultaneous Reconfiguration and Optimal Capacitor Placement Using Adaptive Whale Optimization Algorithm for Radial Distribution System", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 181-190, Jan. 2021 (doi: 10.1007/s42835-020-00593-5).

- [26] A. N. Hussain, W.K. Shakir Al-Jubori, H.F. Kadom, "Hybrid design of optimal capacitor placement and reconfiguration for performance improvement in a radial distribution system", *Journal of Engineering*, vol. 2019, pp. 1–15, Dec. 2019 (doi: 10.1155/2019/1696347).
- [27] A. Shaheen, A. Elsayed, A. Ginidi, R. El-Sehiemy, E. Elattar, "Reconfiguration of electrical distribution network-based DG and capacitors allocations using artificial ecosystem optimizer: Practical case study", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 6105-6118, Aug. 2022 (doi: 10.1016/j.aej.2021.11.035).
- [28] M.M. Sayed, M.Y. Mahdy, S.H.A. Aleem, H.K. Youssef, T.A. Boghdady, "Simultaneous distribution network reconfiguration and optimal allocation of renewable-based distributed generators and shunt capacitors under uncertain conditions", *Energies*, vol. 15, no. 6, pp. 2299, Mar. 2022 (doi: 10.3390/en15124244).
- [29] H. Lotfi, R. Ghazi, M.B. Naghibi-Sistani, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration along with capacitor allocation using a new hybrid evolutionary algorithm", *Energy Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 779-809, Aug. 2020 (doi: 10.29252/iejqp.8.3.22).
- [30] H. Lotfi, A. A. Shojaei, "A dynamic model for multi-objective feeder reconfiguration in distribution network considering demand response program", *Energy Systems*, pp. 1-30, Mar. 2022, (doi: 10.1007/s12667-022-00507-6).
- [31] H. Lotfi, R. Ghazi, M.B. Naghibi-Sistani, "Providing a novel approach for dynamic feeder reconfiguration considering importance of reliability and grid's security", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 40, pp. 13-22, Aug. 2020 (doi: 10.1001.1.23223871.1398.10.40.2.2).
- [32] H. Hasanshahi, M. Nafar, M. Simab, "Operation of micro-grid for provide clean energy constrained to system optimal reliability", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 50, pp. 133-148, Sept. 2022 (doi: 10.1001.1.23223871.1401.13.50.9.0).
- [33] T.M. Shami, A.A. El-Saleh, M. Alswaiti, Q. Al-Tashi, M.A. Summakieh, S. Mirjalili, "Particle swarm optimization: A comprehensive survey", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10031-10061, Jan. 2022 (doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142859).
- [34] H. Lotfi, M. Samadi, A. Dadpour, "Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using an improved particle swarm optimization algorithm", *Proceeding of the IEEE/EPDC*, Karaj, Iran, April 2016 (doi: 10.1109/EPDC.2016.7514799).
- [35] M. Eusuff, K. Lansey, F. Pasha, "Shuffled frog-leaping algorithm a memetic meta-heuristic for discrete optimization", *Engineering Optimization*, vol. 38, no. 2, pp.129-154, Jan. 2007 (doi: 10.1080/03052150500384-759).
- [36] J.G. Dugalakis, K.G. Margaritis, "On benchmarking functions for genetic algorithms", *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 77, no. 4, pp. 481-506, Mar 2007 (doi: 10.1080/00207160108805080).
- [37] H. Lotfi, R. Ghazi, "Optimal participation of demand response aggregators in reconfigurable distribution system considering photovoltaic and storage units", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 2233–2223, Feb. 2021 (doi: 10.1007/s12652-020-02322-2).
- [38] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 331-338, June 2006 (doi: 10.1016/j.ijepes.2005.0-8.018).
- [39] T. Niknam, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and HBMO algorithms for multi-objective distribution feeder reconfiguration", *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 8, pp. 2074-2082, Aug. 2009 (doi: 10.1016/j.enconman.2009.03.029).

زیر نویس ها

- | | |
|--|---|
| 1. Distribution network | 13. Power qualify |
| 2. Distribution feeder reconfiguration | 14. Power loss |
| 3. Distance measurement | 15. Hybrid search algorithm |
| 4. Brute-force | 16. Shuffled Frog Leaping Algorithm |
| 5. Meta-heuristics | 17. Gravitational search algorithm |
| 6. Invasive weed optimization | 18. Operation costs |
| 7. Root runner | 19. Voltage profile |
| 8. Cuckoo search algorithm | 20. Energy not supplied |
| 9. Minimum spanning tree algorithm | 21. Modified emperial competitive algorithm |
| 10. Improved selective binary PSO | 22. Whale adaptive algorithm |
| 11. Artificial immune system algorithm | 23. Gray wolf algorithm |
| 12. Buses voltage deviation | 24. Pareto soluti |