



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Multi-objective feeder reconfiguration problem in the presence of distributed generation sources and capacitors units considering network voltage Security

Benyamin Katanchi¹, Ali asghar Shojaei^{1,*}, Mahdi Yaghoobi², Hossein Lotfi³

1.Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

2.Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

3.Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar

*Corresponding Author: a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 13 May 2022

Revised: 30 September 2022

Accepted: 15 March 2023

Keywords:

Feeder reconfiguration,
Distributed generation,
Voltage security,
Modified
gravitational search,

ABSTRACT

Distribution network reconfiguration is one of the well-known and effective strategies in the distribution networks which performs by the status management of the network switches in order to obtain a new optimal configuration for the feeders. This study formulates multi-objective distribution feeder reconfiguration in the presence of distributed generators and capacitors. Common objective functions in the Distribution network reconfiguration problem include power losses and voltage deviations, which are important goals in traditional distribution systems. Usually, less attention has been paid to the reliability and voltage security target functions. Therefore, the main objectives of this study are to improve the reliability and maintenance of voltage by solving the problem of Distribution network reconfiguration. The inherent complexities of the distribution network rearrangement problem have made it a serious challenge to provide a practical and robust solution to overcome the complexities of this problem, therefore, the improved gravitational search optimization algorithm to solve this problem Has been. In order to show the efficiency of the proposed method, it has been tested on a 33-bus test system.

© 2023 Published by Semnan University Press. All rights reserved.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27027.2266>

How to cite this article:

Katanchi, B., Shojaei, A., Yaghoobi, M., & Lotfi, H. (2023). Multi-objective feeder reconfiguration problem in the presence of distributed generation sources and capacitors units considering network voltage Security. Journal of Modeling in Engineering, 21(73),103 -118. doi: 10.22075/jme.2023.27027.2266

مساله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور بهینه منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در سیستم توزیع با توجه به اهمیت حفظ ولتاژ

بنیامین کتانچی^۱، علی اصغر شجاعی^{۲*}، مهدی یعقوبی^۳ و حسین لطفی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴</p> <p>واژگان کلیدی: تجدید آرایش شبکه توزیع، منابع تولید پراکنده، الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی، انرژی توزیع نشده، شاخص پایداری ولتاژ.</p>	<p>تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع یکی از راهبردهای شناخته شده و مؤثر در شبکه توزیع است که به منظور بدست آوردن یک پیکربندی بهینه جدید برای فیدرهای توزیع با مدیریت وضعیت سوئیچ ها در شبکه توزیع انجام میگردد. در این مطالعه، مساله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور بهینه منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در قالب چند هدفه فرموله شده است. توابع هدف متداول در مساله تجدید آرایش شامل تلفات توان و انحراف ولتاژ میباشند که اهداف مهمی در سیستم های توزیع سنتی هستند، معمولاً به توابع هدف قابلیت اطمینان و حفظ ولتاژ توجه کمتری شده است. از این رو اهداف اصلی این مطالعه بهبود قابلیت اطمینان و حفظ ولتاژ از طریق حل مساله تجدید آرایش فیدرهای توزیع میباشد. به همین منظور، شاخص انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ به عنوان توابع هدف قابلیت اطمینان و حفظ ولتاژ تعریف شده اند. پیچیدگیهای ذاتی مساله تجدید آرایش شبکه توزیع، ارائه یک راه حل کاربردی و مقاوم به منظور غلبه بر پیچیدگیهای این مساله را تبدیل به یک چالش جدی کرده است، به همین منظور، الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته جستجوی گرانشی برای حل این مساله بهینه سازی ارائه شده است. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، بر روی سیستم تست ۳۳ باسه تست شده است، همچنین نتایج حاصل از بهینه سازی با نتایج سایر الگوریتم های تکاملی از قبیل اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است.</p>

۱- مقدمه^۱

شبکه های توزیع انرژی الکتریکی برای افزایش سطح قابلیت اطمینان، کاهش مدت زمان خاموشی و ... به صورت حلقوی طراحی می شوند ولی بواسطه هماهنگی ساده تر و کم هزینه تر سیستم های حفاظتی و پایین آوردن سطح اتصال کوتاه به صورت شعاعی بهره برداری می شوند. در شبکه های توزیع آرایش فیدرهای شبکه توزیع به منظور برآورده کردن اهدافی از قبیل کاهش تلفات، بهبود پروفیل

ولتاژ و بهبود کیفیت توان در شبکه و ... تجدید می شود. در شبکه های توزیع، تعدادی سوئیچ در حالت عادی باز NO و ما بقی بسته NC می باشند. تغییر آرایش فیدرهای شبکه های توزیع توسط باز و بسته کردن سوئیچ های شبکه توزیع، تجدید آرایش نامیده می شود. در تجدید آرایش، فیدرهای توزیع بایستی قیود بهره برداری نظیر حفظ ساختار شعاعی، تغذیه تمام بارها، محدودیت افت ولتاژ، محدودیت بار گذاری خطوط و ترانسفورمرها رعایت گردد. مساله

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه آزاد نیشابور

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد نیشابور

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد مشهد

۴. پژوهشگر پسا دکتری مهندسی برق، دانشگاه حکیم سبزواری

زیست محیطی، توسعه فن‌آوری‌های نوظهور، ضرورت تولید مقرر به صرفه باعث شده است که استفاده از منابع تولید پراکنده افزایش یابد. ادغام منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع اثرات مثبتی در شبکه توزیع از قبیل کاهش تلفات، بهبود قابلیت اطمینان و ... دارد. در ادامه به بررسی مطالعات تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته شده است.

در [۱۳]، الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده به منظور کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. در [۱۴]، الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات- جهش قورباغه برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات و بهبود پایداری ولتاژ در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در [۱۵]، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع نامتعادل در حضور منابع تولید پراکنده با اهداف کاهش تلفات و بهبود شاخص پایداری ولتاژ ارائه شده است. در [۱۶]، الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده است. در [۱۷]، الگوریتم جستجوی گرانشی برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری و بهبود پایداری گذرا ارائه شده است. در [۱۸]، الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و انحراف ولتاژ ارائه شده است. در [۱۹]، یک روش جدید برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن قیود حفاظتی ارائه شده است.

اخیراً به دلیل رشد سریع تقاضا در شبکه‌های توزیع، موضوعاتی از جمله خاموشی‌های گسترده نگرانی اصلی صاحبان شبکه توزیع است. بنابراین، حفظ ثبات ولتاژ یکی از اهداف پژوهشگران در زمینه مطالعات شبکه‌های توزیع است. در همین راستا، تحقیقات بسیاری در سالهای اخیر انجام شده است. بنابراین، برخی از محققان افزایش پایداری ولتاژ را بر اساس جنبه‌های مختلف عملکرد شبکه توزیع بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، در [۲۰]، یک رویکرد جدید برای مکان و اندازه بهینه خازن بر اساس شاخص‌های

تجدید آرایش شبکه توزیع را می‌توان به عنوان یک مساله غیر خطی و محدب فرموله کرد. بنابراین روش‌های ریاضی به دلیل محدودیت‌های مربوط به توابع هدف و قیود این مساله از قبیل ناپیوستگی و مشتق پذیری، مناسب نیستند [۱]. بر این اساس، محققین روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های اکتشافی برای حل این مساله بهینه‌سازی ارائه کرده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. در [۲]، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه علف هرز برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته زنبور عسل در [۳] برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس‌ها ارائه شده است. در [۴]، یک روش ترکیبی متشکل از الگوریتم بهینه‌سازی سیستم ایمنی بدن و نظریه گراف برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در [۵] بر اساس یک نوع کدگذاری جدید برای حل مساله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع استفاده شده است. در [۶]، روش بهینه‌سازی الگوریتم اجتماع ذرات برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش سطح اتصال کوتاه بکار گرفته شده است. در [۷]، از یک الگوریتم جدید مبتنی بر مفاهیم کیهان‌شناسی برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان و آلایندگی‌ها استفاده شده است. در [۸]، یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر کاهش فضای جستجو برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ معرفی شده است. الگوریتم بهبود یافته باینری اجتماع ذرات به منظور حل مساله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان استفاده شده است [۹]. برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود کیفیت توان از الگوریتم تفاضلی استفاده شده است [۱۰]. در [۱۱]، الگوریتم بهبود یافته زنبور عسل برای حل مساله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس‌ها ارائه شده است.

استراتژی‌های بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع در دهه گذشته به علت نفوذ زیاد منابع تولید پراکنده در کنار سیستم‌های اتوماسیون به طور قابل توجهی تغییر کرده است [۱۲]. به عبارت دیگر، رشد تقاضای برق، نگرانی‌های

چندهدفه به جای یک جواب بهینه با مجموعه‌ای از جواب‌ها (جبهه پارتو) روبرو هستیم. به همین منظور یک مخزن بر برای ذخیره جواب‌های غیرغالب در نظر گرفته شده است. مشارکت اصلی این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- فرمول‌بندی تجدید آرایش شبکه توزیع و تعیین سائز بهینه منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در سیستم توزیع در قالب تک و چند هدفه.
- در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در ارزیابی توابع هدف مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع.
- در نظر گرفتن شاخص انرژی توزیع‌نشده به عنوان تابع هدف قابلیت اطمینان در این مطالعه و بهبود این شاخص توسط حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده.
- در نظر گرفتن شاخص پایداری ولتاژ به عنوان تابع هدف حفظ ولتاژ در شبکه توزیع، از مدار معادل تونن برای مدل سازی و فرمول‌بندی شاخص پایداری ولتاژ استفاده شده است. از ویژگی‌های این روش اجرا در شبکه‌های مش و شعاعی می‌باشد.
- ارائه الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته جستجوی گرانشی مبتنی بر استفاده از یک معادله سرعت ماکزیمم متعیر با زمان به منظور بهبود کارایی و قدرت جستجوی الگوریتم مورد نظر
- ارائه توپولوژی از فیدرهای شبکه توزیع با تلفات کم در یک سطح مطمئن قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم تعریف مسئله شامل متغیرهای مساله، توابع هدف و قیود مساله و استراتژی حل مسئله چندهدفه ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری در بخش‌های سوم و چهارم بیان شده است.

۲- تعریف مسئله پیشنهادی و چارچوب آن

X بردار متغیرهای کنترلی مسئله است. N_{DG} و N_{Cap} به ترتیب تعداد واحدهای تولید پراکنده و واحدهای خازنی می‌باشند. Tie_i بیانگر وضعیت سوئیچ i ام می‌باشد و مقدار متغیرهای مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به شرح زیر می‌باشد:

$$X = \left[X_{SW} \quad X_{Tie} \quad X_{PDG} \quad X_{Q_{Cap}} \right] \quad (1)$$

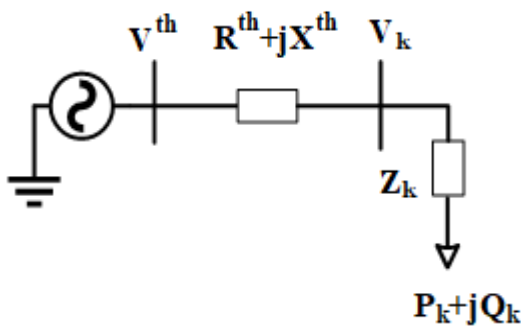
پایداری گره در شبکه توزیع ارائه شده است. در [۲۱]، به منظور بهبود پایداری ولتاژ در شبکه توزیع، روش جدیدی برای مکان بهینه خازن و منابع تولید پراکنده ارائه شده است. یک شاخص جدید پایداری ولتاژ برای افت ولتاژ حساس‌ترین گره‌ها در شبکه توزیع شعاعی ارائه شده است [۲۲]. با وجود تمام مطالعات فوق در مورد پایداری ولتاژ، به نظر می‌رسد نیاز به در نظر گرفتن اهمیت پایداری ولتاژ در تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده به شدت احساس می‌شود. بررسی تاریخ ادبیات مساله تجدید آرایش شبکه توزیع نشان می‌دهد که اکثر مطالعات تلفات توان و انحراف ولتاژ گره‌ها به عنوان توابع هدف مساله تجدید آرایش در نظر گرفته‌اند و توجه کمتری به تابع هدف قابلیت اطمینان نشان داده است. با این حال، در معدود مطالعاتی تابع هدف قابلیت اطمینان در مساله تجدید آرایش مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به اهمیت قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع، لازم است تا تأثیر این توابع هدف در حل مسایل مختلف توزیع، خصوصاً مسئله تجدید آرایش که مسئله بهینه‌سازی مورد نظر در این مطالعه، در نظر گرفته شود. برای این منظور، در پژوهش حاضر، شاخص انرژی توزیع نشده به عنوان تابع هدف قابلیت اطمینان، شاخص پایداری ولتاژ و تلفات توان به عنوان توابع هدف مساله تجدید آرایش شبکه توزیع معرفی شده‌اند.

مساله تجدید آرایش به طور ذاتی پیچیده و غیر محدب است، در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی مساله را نسبت به قبل پیچیده‌تر میکند. از این رو، حل مساله بهینه‌سازی چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی نیاز به یک روش حل دقیق و قدرتمند دارد. برای این منظور، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی چند هدفه برای مقابله با پیچیدگی مساله بهینه‌سازی در این مطالعه ارائه شده است. الگوریتم جستجوی گرانشی یکی از الگوریتم‌های نوظهور است که بر مبنای هوش جمعی کار میکند. این الگوریتم برای حل مسائل تک هدفه با متغیرهای پیوسته طراحی شده است. در این مقاله، نسخه‌ای از این الگوریتم برای حل مسائل چند هدفی طراحی و ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی برای برآورده کردن توابع هدف مساله به صورت همزمان از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است، زیرا در مسئله بهینه‌سازی

$$f_2(x) = \sum_{i=2}^{N_{Bus}} ENS_i \quad (۸)$$

• شاخص پایداری ولتاژ

یکی از اهداف مهم این مطالعه، بهبود پایداری ولتاژ از طریق تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع می‌باشد. به همین سبب شاخص پایداری ولتاژ به عنوان تابع حفظ ولتاژ شبکه تعریف شده است [۲۴]. این شاخص بر اساس مدار معادل تونن بیان و فرموله شده است. در شکل (۱) مدار معادل تونن برای تمام باس‌ها از دید باس k نشان داده شده است.



شکل ۱- مدار معادل تونن برای تمام باس‌ها از دید باس k

با توجه به تکنیک پخش بار، روابط (۹) و (۱۰) بدست می‌آیند. سپس رابطه (۱۱) از روابط قبل محاسبه می‌شود:

$$I_k = \frac{V_{th} - V_k}{R_{th} + jX_{th}} \quad (۹)$$

$$P_k - jQ_k = V_k \times I_k \quad (۱۰)$$

$$P_k - jQ_k = V_k \times \frac{V_{th} - V_k}{R_{th} + jX_{th}} \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۲) با توجه به روابط قبل بیان می‌شود. ضرائب B_k و C_k در روابط (۱۳) و (۱۴) تعریف شده است. با برقراری شرط $B_k^2 - 4C_k \geq 0$ رابطه VSI به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

R_{th} و X_{th} بیانگر مقاومت و راکتانس تونن از دید باس k ام در زمان t ام هستند. P_k و Q_k به ترتیب، توان اکتیو و راکتیو باس k ام هستند. V_k و I_k به ترتیب، ولتاژ و جریان باس k ام در زمان t ام می‌باشند. V_{th} بیانگر ولتاژ تونن از دید باس k ام می‌باشد.

$$||V_k|^4 - B_k|V_k|^2 + C_k = 0 \quad (۱۲)$$

$$B_k = |V_{th}|^2 - 2P_k R_{th} - 2Q_k X_{th} \quad (۱۳)$$

$$X_{SW} = [SW_1, SW_2, \dots, SW_{N_{tie}}] \quad (۲)$$

$$X_{Tie} = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{N_{tie}}] \quad (۳)$$

$$X_{PDG} = [PDG_1, PDG_2, \dots, PDG_{N_{DG}}] \quad (۴)$$

$$X_{Q_{Cap}} = [Q_{Cap_1}, Q_{Cap_2}, \dots, Q_{Cap_{N_{Cap}}}] \quad (۵)$$

X بردار متغیرهای کنترلی مسئله است. N_{DG} و N_{Cap} به ترتیب تعداد واحدهای تولید پراکنده و واحدهای خازنی می‌باشند. Tie_i بیانگر وضعیت سوئیچ t ام می‌باشد و مقدار آن صفر یا یک است. SW_i و N_{tie} بیانگر شماره سوئیچ‌های بسته و تعداد سوئیچ‌های بسته هستند PDG_i و Q_{Cap_j} به ترتیب مقدار توان اکتیو واحد تولید پراکنده t ام و مقدار توان راکتیو واحد خازنی j ام می‌باشند.

۲-۱- توابع هدف

در این مطالعه توابع هدف شامل حداقل سازی تلفات توان، انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ شبکه می‌باشد.

• تلفات انرژی

تلفات توان از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_{brch}} R_i \times |I_i|^2 \quad (۶)$$

R_i و I_i به ترتیب امپدانس و جریان حقیقی خط i ام هستند. N_{brch} بیانگر تعداد خطوط شبکه می‌باشد.

• انرژی توزیع نشده

انرژی توزیع نشده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$ENS_i = P_i \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{i,j} + U'_{i,j}) \quad (۷)$$

در رابطه فوق V مجموعه باس‌هایی است که از یک فیدر تغذیه می‌شوند. $U_{i,j}$ و $U'_{i,j}$ به ترتیب بیانگر زمان تعمیر (ساعت در سال) و زمان مربوط به جبران خسارت (ساعت در سال) شاخه‌های مرتبط با باس i می‌باشند. $\lambda_{i,j}$ و $d_{i,j}$ به ترتیب نرخ خرابی و طول خط هستند. $t'_{i,j}$ و $t_{i,j}$ به ترتیب میانگین مدت زمان تعمیر و میانگین مدت زمان بازیابی خط بین باس‌های i و j ام می‌باشند [۲۳]. رابطه نهایی انرژی توزیع نشده کل شبکه با در نظر نگرفتن گره مرجع از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

نام می‌باشند. Θ_{ij} و Y_{ij} به ترتیب بیانگر اندازه و زاویه ادیتمانس شاخه بین باس‌های i و j هستند.

- محدوده مربوط به ولتاژ باس‌ها

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (24)$$

V_{min} و V_{max} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ باس نام هستند. V_i بیانگر مقدار ولتاژ باس نام می‌باشد.

$$\begin{aligned} |I_{f,i}| &\leq I_{f,i}^{Max} \quad i \\ &= 1, 2, \dots, N_{feeder} \end{aligned} \quad (25)$$

$I_{f,i}$ و $I_{f,i}^{Max}$ به ترتیب دامنه جریان و حداکثر جریان فیدر نام می‌باشند. N_{feeder} بیانگر تعداد فیدرهای شبکه می‌باشد

- محدودیت سوئیچینگ

$$\begin{aligned} |S_i - S_{0i}| &\leq N_{switch}, i \\ &= 1, 2, \dots, N_{switch} \end{aligned} \quad (26)$$

S_i و S_{0i} به ترتیب حالت‌های اولیه و ثانویه سوئیچ نام هستند. N_{switch} بیانگر تعداد سوئیچ‌ها می‌باشد.

- محدودیت مربوط به منابع تولید پراکنده

$$P_{DG}^{min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG}^{max}, i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (27)$$

P_{DG}^{min} و P_{DG}^{max} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو واحد تولید پراکنده نام هستند [۲۶-۲۵]. N_{DG} بیانگر تعداد واحدهای تولید پراکنده می‌باشد.

- محدودیت مربوط به واحدهای خازنی

$$Q_{Cap}^{min} \leq Q_{Cap,i} \leq Q_{Cap}^{max}, i = 1, 2, \dots, N_{Cap} \quad (28)$$

Q_{Cap}^{min} و Q_{Cap}^{max} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز توان راکتیو واحد خازنی نام هستند. N_{Cap} بیانگر تعداد واحدهای خازنی می‌باشد.

۳- استراتژی حل مسئله چند-هدفه و الگوریتم پیشنهادی

در بهینه‌سازی تک هدفه، راه حل بهینه معمولاً به خوبی و وضوح، قابل تعریف است، اما در بهینه‌سازی چند هدفه نمی‌توان تنها یک راه حل را به عنوان بهترین جواب مساله معرفی کرد. در این گونه مسائل باید مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را که هر یک از اهداف را در سطح قابل قبولی

$$C_k = (P_k^2 + Q_k^2) \cdot (R_{th}^2 + X_{th}^2) \quad (14)$$

$$vsi_{k,t} = (|V_{th}|^2 - 2P_k R_{th} - 2Q_k X_{th})^2 - 4 \cdot (P_k^2 + Q_k^2) \cdot (R_{th}^2 + X_{th}^2) \quad (15)$$

به منظور برقراری شرط بهره‌برداری پایدار، شاخص VSI باید برای تمام گره‌ها بزرگتر از صفر باشد که در روابط زیر شرح داده شده است. پارامتر N یک عدد بزرگ است (مثلاً ۱۰۰۰۰۰) که به عنوان یک ضریب در فاکتور جریمه (penalty factor) استفاده شده است.

$$vsi = [vsi_2, vsi_3, \dots, vsi_{N_{bus}}] \quad (16)$$

$$cvsi_k = \begin{cases} 0 & vsi_k > 0 \\ 1 & vsi_k \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$Cvsi_k = [cvsi_2, cvsi_3, \dots, cvsi_{N_{bus}}] \quad (18)$$

$$\begin{aligned} penalty\ factor \\ = N \times sum(Cvsi_k) \end{aligned} \quad (19)$$

در نهایت، تابع هدف پایداری ولتاژ به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود:

$$VSI = \frac{1}{min(vsi)} + penalty\ factor \quad (20)$$

۳-۲- قیود مساله

- شرط شعاعی بودن

قید مربوط به شعاعی بودن شبکه از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$N_{branch} = N_{bus} - N_{source} \quad (21)$$

N_{bus} و N_{source} به ترتیب بیانگر تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه می‌باشند. N_{branch} تعداد خطوط شبکه می‌باشد

- معادلات پخش بار

قید معادلات پخش بار از روابط (۲۲) - (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$P_j = \sum_{i=1}^{N_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Q_j = \sum_{i=1}^{N_{bus}} V_i^t V_j^t Y_{ij} \sin(\Theta_{ij} - \delta_i \\ + \delta_j) \end{aligned} \quad (23)$$

P_j و Q_j به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس نام هستند. V_i و δ_i به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ

به اثبات رسیده است [۱۳ و ۱۷]. برای توضیح بیشتر این الگوریتم، سیستمی را به صورت مجموعه‌ای از m جرم در یک فضای n بعدی تصور کنید. موقعیت بعد d از جرم i با X_i^d نشان داده می‌شود.

$$X = (X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^n) \quad (۳۳)$$

موقعیت جرم، نقطه‌ای در فضا است که جوابی از مساله است. در ابتدای تشکیل سیستم، هر جرم به صورت تصادفی در یک نقطه از فضای جستجو قرار می‌گیرد. جرم هر عامل با توجه به تابع هدف تعیین می‌شود:

$$q_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (۳۴)$$

$$M_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_{j=1}^n q_j(t)} \quad (۳۵)$$

که در این رابطه $fit_i(t)$ میزان برازندگی عامل i را در زمان t نشان می‌دهد. $worst(t)$ و $best(t)$ به ترتیب نشان‌دهنده بدترین و بهترین مقدار برازندگی در کل جمعیت، در زمان t هستند. در این سیستم در زمان t به هر عامل i از سوی عامل j در جهت بعد d نیرویی ناشی از توده وزنی به اندازه $f_{i,j}^d(t)$ وارد می‌شود.

$$f_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} \times (X_j^d(t) - X_i^d(t)) \quad (۳۶)$$

که در آن:

$$R_{ij}(t) = \|X_j(t), X_i(t)\|_2 \quad (۳۷)$$

در رابطه (۳۶)، $M_i(t)$ و $M_j(t)$ به ترتیب جرم عامل i و جرم عامل j در زمان t هستند. $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t است، فاصله اقلیدسی بین دو عامل i و j توسط رابطه (۳۷) تعیین می‌شود. نیروی وارد بر عامل i در جهت بعد d در زمان t برابر مجموع ضرب‌های تصادفی از تمام نیروهایی است که سایر اجرام سیستم وارد می‌کنند.

$$f_i^d(t) = \sum_{\substack{j \in Kbest \\ j \neq i}} rand(0) \times f_{ij}^d(t) \quad (۳۸)$$

$rand(0)$ یک عدد تصادفی بین بازه صفر تا یک است. مجموعه‌ای از اولین عوامل K با بهترین شایستگی

برآورده می‌سازند، به عنوان مجموعه جواب بهینه معرفی کرد. به همین منظور در این مطالعه استراتژی چند هدفه معرفی شده است.

۳-۱- استراتژی چندهدفه

در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، روش بهینگی پارتو به منظور بدست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌ها استفاده شده است. مبنای این روش بر اساس مفهوم تسلط است. بردار X_1 بر X_2 غلبه می‌کند، زمانی که شرایط زیر برقرار باشد [۲۳ و ۲۷]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (۲۹)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (۳۰)$$

از آنجایی که توابع هدف در یک محدوده نیستند مجموعه‌های فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ اجرا می‌شوند. تابع عضویت μ_i برای هر تابع هدف به شرح زیر است:

f_i^{min} و f_i^{max} بیانگر حدود بالا و پایین تابع هدف می‌باشند، این مقادیر با استفاده از بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت جداگانه بدست می‌آیند. مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده برای هر عضو در مجموعه جواب‌ها از رابطه (۳۲)

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^{min} \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(x)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(x) \leq f_i^{max} \end{cases} \quad (۳۱)$$

محاسبه می‌شود [۲۳ و ۲۷]:

$$N_{\mu j} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (۳۲)$$

m و n به ترتیب تعداد راه‌حل‌های غیر غالب و تعداد توابع هدف می‌باشند. β_k وزن k امین تابع هدف است و بر اساس اهمیت تابع هدف انتخاب می‌شود.

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی بهبود یافته جستجوی

گرانشی

الگوریتم بهینه‌سازی گرانشی، با الهام از قانون جاذبه و نیروی گرانش در طبیعت معرفی و پارامترهای آن به صورت شهودی تنظیم شده‌اند. کارامدی این الگوریتم در بهینه‌سازی توابع محک استاندارد، برای مسائل تک هدفه

$$-V_{max} \leq V_i \leq V_{max} \quad (43)$$

که در آن V_{max} حداکثر سرعت مجاز است. حداکثر سرعت، حداکثر تغییری را که یک عامل می‌تواند در مختصات موقعیتی خود در طول تکرار متحمل شود را تعریف میکند [۱۷]. معمولاً مقدار V_{max} وابسته به مسئله است. اگر مقدار این پارامتر خیلی بزرگ باشد، ممکن است عوامل به صورت نامنظم در اطراف و یا دورتر از یک راه حل خوب حرکت کنند. از طرف دیگر، اگر خیلی کوچک باشد، حرکت عامل محدود شود و ممکن است راه حل بهینه حاصل نشود.

شبهه به دیگر الگوریتم‌های تکاملی، موفقیت الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی دیگر تا حدود زیادی به توازن دقیق دو هدف متضاد، اکتشاف و بهره برداری بستگی دارد. اکتشاف، توانایی گسترش جستجوی گلوبال در فضای جستجوی مساله است که در آن بهره‌برداری توانایی یافتن بهینه در مورد یک راه حل خوب است. در تکرارهای اولیه، الگوریتم برای جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی باید از اکتشاف استفاده کند. همچنان که روند جستجو ادامه می‌یابد، اکتشاف محو می‌شود و بهره‌برداری آشکارتر می‌شود. به منظور بهبود عملکرد جستجو و کنترل تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری، این مطالعه یک معادله سرعت ماکزیمم متغیر با زمان را به شرح زیر ارائه می‌دهد:

$$V_{max} = \left[1 - \left(\frac{iter}{iter_{max}} \right)^h \right] \times V_{max0} \quad (44)$$

که در آن عبارت نمایی h یک ثابت مثبت است و با آزمایش و خطا بدست می‌آید. V_{max0} حد سرعت اولیه است و به عنوان کسری از فاصله بین مرزهای فضای جستجو برای هر متغیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_{max0} = \partial \times (X_{max} - X_{min}) \quad (45)$$

$$0 \leq \partial \leq 1$$

معادله (۴۴) جستجوی گلوبال اولیه را با مقدار نسبتاً زیادی از V_{max} در حین تکرارهای اولیه تسهیل می‌کند. کاهش تدریجی V_{max} در تکرارها، دامنه نوسانات عامل را کاهش داده و اکتشاف الگوریتم را محدود می‌کند. این فرایند عوامل را تشویق میکند تا عملیات جستجو را در بهترین راه حل - های یافت شده تا کنون متمرکز کنند و در بخش دوم بهینه‌سازی به بهینه جهانی همگرا شوند. فلوجارت الگوریتم

و بیشترین جرم است که تابعی از زمان می‌باشد، در ابتدا با k_0 آغاز می‌شود و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در اینجا k_0 بر روی N (تعداد کل عوامل) تنظیم می‌شود و بصورت خطی به 1 کاهش می‌یابد.

طبق قانون دوم نیوتن، هر جرم در جهت بعد d شتابی میگیرد که متناسب است با نیروی وارد بر جرم در جهت بعد d تقسیم بر جرم اینرسی آن:

$$a_i^d(t) = \frac{f_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (39)$$

در رابطه فوق $a_i^d(t)$ شتاب عامل i ام در جهت بعد d در زمان t است. سرعت هر عامل برابر مجموع ضربی از سرعت فعلی جرم و شتاب جرم است که طبق رابطه (۴۰) تعریف می‌شود. مکان جدید هر عامل از مجموع مکان فعلی عامل و سرعت آن عامل طبق رابطه (۴۱) به دست می‌آید.

$$V_i^d(t+1) = rand(0) \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (40)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (41)$$

برای تنظیم ضریب گرانش از رابطه (۴۲) استفاده می‌شود که در این رابطه ضریب گرانش بصورت نمایی کاهش می‌یابد.

$$G(t) = G_0 \times \exp\left(\delta \times \frac{iter}{iter_{max}}\right) \quad (42)$$

که در آن G_0 و δ پارامترهایی ثابت هستند که مقادیر آنها با توجه به شرایط مساله روی 100 و 20 تنظیم می‌شود [۱۷]. $iter$ و $iter_{max}$ به ترتیب تکرار فعلی و تعداد ماکزیمم تکرار می‌باشند. G همانند K بر روی G_0 تنظیم می‌شود و سپس کاهش می‌یابد.

در هر مرحله از بروزرسانی الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد، این الگوریتم با تنظیم فاصله (سرعت) که هر عامل در هر بعد از فضای فوق مشکل حرکت می‌کند، پیش می‌رود. معادله (۴۰) نشان می‌دهد که سرعت هر عامل یک متغیر تصادفی است و بنابراین، با ایجاد مسیر کنترل نشده، اجازه می‌دهد تا عوامل از چرخه‌های گسترده‌تری در فضای مساله پیروی کند. به منظور کنترل این نوسانات و جلوگیری از واگرایی، در این مطالعه یک فاصله معقول برای محدود کردن سرعت عوامل براساس رابطه زیر تعریف شده است: [۱۷]:

- ۳- تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور خازنها
- ۴- تجدید آرایش شبکه در حضور خازنها
- ۵- تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور همزمان منابع تولید پراکنده و خازنها

۴-۱- شبکه ۳۳

سیستم ۳۳ باسه مورد نظر یک شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت فرضی با یک پست دو فیدر، ۳۲ باسه است [۱۳] که در شکل (۳) نشان داده شده است. مقدار تلفات اکتیو، انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ قبل از تجدید آرایش به ترتیب برابر ۲۰۲/۶۷ کیلووات، ۵۶۲۱۷/۰۶ کیلووات ساعت برسال و ۵/۶۷ پریونیت میباشد. تمام شبیه‌سازی‌های این مطالعه در نرم افزار متلب بر روی دستگاه لپ تاپ پردازنده چهار هسته‌ای با فرکانس ساعت ۱/۶ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت رم انجام شده است.

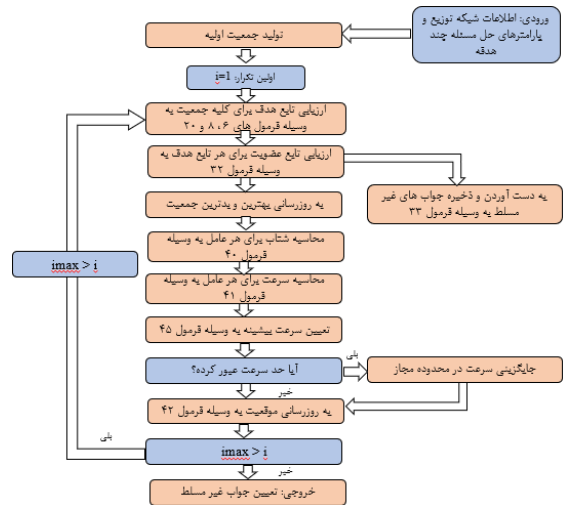
در این شبکه برای شبیه‌سازی ۵ سناریو ذکر شده از چهار منبع تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) و چهار واحد خازنی به شرح زیر در شبکه تست نصب شده است:

دو دیزل ژنراتورهای با حداکثر و حداقل ظرفیت‌های ۳۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس‌های ۷ و ۱۴ نصب شده و دو دیزل ژنراتور دیگر با حداکثر و حداقل ظرفیت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس‌های ۲۴ و ۳۰ قرار داده شده‌اند. همچنین چهار واحد خازنی با حداکثر و حداقل ظرفیت‌های ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس‌های ۴ و ۸ و ۲۵ و ۳۲ قرار داده شده‌اند.

در جدول ۱، به منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روشهای دیگر در این مطالعه و سایر مراجع در تجدید آرایش شبکه توزیع، نتایج بهینه‌سازی تابع تک هدفه تلفات توان در عدم حضور تولید پراکنده و خازنها در ۳۰ آزمایش مختلف نشان داده شده است، با توجه به نتایج جدول ۱، واضح است که روش پیشنهادی این مطالعه به نتایجی مشابه با سایر مراجع رسیده است، همچنین در مقایسه با سایر روش‌های به کار رفته در این مطالعه به نتایج بهتری رسیده است. مقدار تلفات توان در تجدید آرایش شبکه توزیع بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی از ۲۰۲/۶۷ کیلووات قبل از تجدید آرایش به ۱۳۹/۵۵ کیلووات رسیده است. به منظور بهینه‌سازی تلفات سوئیچ‌های ۷ و ۱۴ و ۹ و ۳۲ و ۳۷ باز شده‌اند.

شکل (۴) منحنی همگرایی تابع هدف تلفات بدست آمده حاصل از ۳ الگوریتم اجتماع ذرات، جهش قورباغه و

پیشنهادی برای حل مساله چند هدفه مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله چند هدفه

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی

برای حل مساله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع از شبکه تست ۳۳ باسه استفاده شده است. در این بخش از الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی برای بهینه‌سازی تک و چندهدفه استفاده شده است و نتایج آن با الگوریتم‌های اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است. پارامترهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شرح زیر است:

- ۱- الگوریتم اجتماع ذرات: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ می‌باشد.
 - ۲- الگوریتم جهش قورباغه: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ و تعداد مجموعه‌ها (گروه‌ها) برابر ۵ می‌باشد.
 - ۳- الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ می‌باشد. G_0 و δ پارامترهایی ثابت هستند که مقادیر آنها با توجه به شرایط مساله روی ۱۰۰ و ۲۰ تنظیم میشود. h و θ که مقادیر آنها با توجه به شرایط مساله روی ۰/۰۵ و ۰/۰۱ تنظیم میشود. تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ است.
- به منظور انجام تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده و خازنها در هر شبکه تست، پنج سناریو شبیه‌سازی شده است:

۱- حالت اولیه شبکه

۲- فقط تجدید آرایش شبکه توزیع

الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واضح است که الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته جستجوی گرانشی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های زودتر به جواب بهینه همگرا شده است.

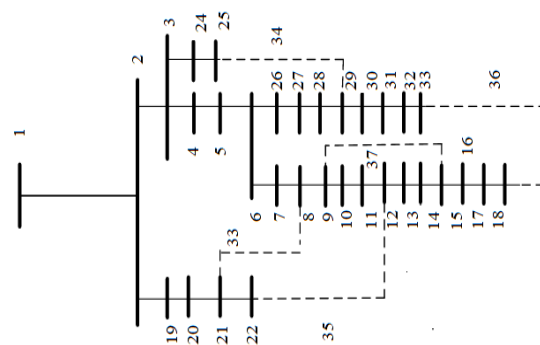
جدول ۱- نتایج بهینه سازی تابع تک هدفه تلفات توان در عدم حضور تولید پراکنده و خازن ۶ها

الگوریتم	تلفات توان (کیلووات)				کلیدهای باز شده	زمان پردازش (ثانیه)
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف معیار		
بهبود یافته جهش قورباغه [۱۸]	۱۳۹/۵۳	-	-	-	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	~ ۸
جستجوی هارمونی [۱۶]	۱۳۹/۵۳	-	-	-	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	~ ۸
جستجوی گرانشی [۱۳]	۱۳۹/۵۳	-	-	-	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	~ ۸
بهبود یافته جستجوی گرانشی [۱۷]	۱۳۹/۵۳	-	-	-	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	۶/۸۳
ترکیبی اجتماع ذرات - جهش قورباغه [۱۴]	۱۳۹/۵۳	-	-	-	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	~ ۸
اجتماع ذرات	۱۴۰/۲۸۲	۱۴۱/۷۸۱	۱۴۳/۹۴	۱/۳۸۰	۳۷ و ۳۴ و ۹ و ۳۰ و ۷	۱/۵۹۲
جهش قورباغه	۱۳۹/۹۸۲	۱۴۰/۴۳۵	۱۴۱/۹۲۱	۰/۵۲۹	۲۸ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	۱/۵۷۷
بهبود یافته جستجوی گرانشی	۱۳۹/۵۳	۱۳۹/۵۳	۱۳۹/۵۳	۰	۳۷ و ۳۲ و ۹ و ۱۴ و ۷	۱/۵۶۵

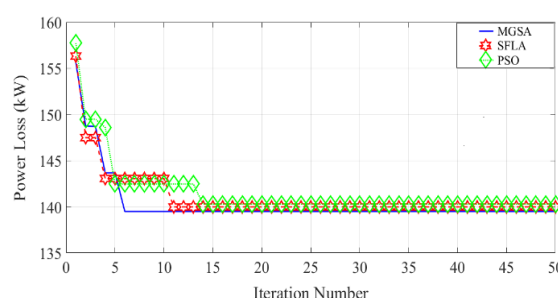
پیشنهادی در چند سناریوی مختلف در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جداول ۲ و ۳ نکات زیر قابل برداشت است:
 ۱- از مقایسه نتایج جدول‌های ۲ و ۳ واضح است که الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته جستجوی گرانشی به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های اجتماع ذرات و جهش قورباغه در بهینه‌سازی توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ رسیده است.

۲- انجام تجدید آرایش شبکه توزیع در سناریو ۲ موجب کاهش شاخص انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ شده است. به عنوان مثال، مقادیر توابع هدف حاصل از الگوریتم پیشنهادی در این سناریو از ۵۶۲۱۷/۰۶ کیلووات ساعت بر سال و ۵/۶۷ پریونیت قبل از تجدید آرایش به ۵۳۲۹۹/۳۳۷ کیلووات ساعت بر سال و ۰/۸۵۹۳ پریونیت رسیده است. همچنین در نظر گرفتن خازن‌ها در حل مساله تجدید آرایش در سناریو ۴ در بهبود نتایج توابع هدف نسبت به قبل از تجدید آرایش موثر بوده است. به عنوان مثال، مقادیر توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی از ۵۶۲۱۷/۰۶ کیلووات ساعت بر سال و ۵/۶۷ پریونیت قبل از تجدید آرایش به ۵۳۲۹۹/۳۳۷ کیلووات ساعت بر سال و ۰/۸۶۶۳ پریونیت رسیده است. بهبود نتایج شبیه‌سازی در سناریو ۴ در مقایسه با سناریو ۲ تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۳- دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۳ باسه



شکل ۴- منحنی همگرایی تابع هدف تلفات بدست آمده حاصل از ۳ الگوریتم مختلف

برای مقایسه عملکرد الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی با سایر روش‌های پیشنهادی در این مطالعه، کلیه نتایج بهینه‌سازی توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ حاصل از الگوریتم‌های اکتشافی در این مطالعه از قبیل اجتماع ذرات، جهش قورباغه و نتایج روش

جدول ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای بهبود انرژی توزیع نشده

روش	متغیر های تصمیم و توابع هدف	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
اجتماع ذرات	کلیدهای باز شده	۳۷۳۵۱۹و۱۵و۱۲	۳۷۳۵۳۴و۱۹و۱۷	۳۷۳۵۳۴و۱۸و۱۷	۳۴۳۷و۱۵و۸و۶
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۵۴۶۶۲/۱۴	۳۰۷۰۲/۰۹	۵۴۱۸۳/۶۳	۳۱۱۸۰/۱۳
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰
	سایز خازن ها (کیلووار)	-	-	۲۰۰و۱۸۰و۱۶۰و۱۲۰	۲۰۰و۱۶۰و۱۶۰و۱۰۰
جهش قورباغه	کلیدهای باز شده	۳۷۳۵۱۹و۱۵و۱۳	۳۷۳۵۲۹و۱۹و۱۳	۳۷۳۵۱۹و۱۵و۱۳	۳۷۳۵۲۹و۱۹و۱۳
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۵۳۷۹۸/۱۹	۳۰۶۵۶/۹۶	۵۳۷۹۸/۱۹	۳۰۶۵۶/۹۶
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰
	سایز خازن ها (کیلووار)	-	-	۲۰۰و۱۸۰و۱۲۰و۱۰۰	۱۶۰و۱۶۰و۱۴۰و۱۲۰
بهبود یافته جستجوی گرانشی	کلیدهای باز شده	۳۷۳۵۳۴و۱۹و۱۷	۳۵۳۴و۲۹و۲۷و۱۹	۳۷۳۵۳۴و۱۹و۱۷	۳۷۳۵۳۴و۲۹و۱۹
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۵۳۲۹۹/۳۳۷	۳۰۵۰۵/۸۵	۵۳۲۹۹/۳۳۷	۳۰۵۰۵/۸۵
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰	-	۵۰۰و۵۰۰و۳۰۰و۳۰۰
	سایز خازن ها (کیلووار)	-	-	۲۰۰و۱۲۰و۱۴۰و۱۴۰	۱۰۰و۱۸۰و۱۴۰و۱۴۰

مقادیر توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی در این سناریو از ۵۶۲۱۷/۰۶ کیلووات ساعت بر سال و ۵/۶۷ پریونیت قبل از تجدید آرایش به ۳۰۵۰۵/۸۵ کیلووات ساعت بر سال و ۰/۶۱۲۸ رسیده است. از مقایسه نتایج بهینه سازی انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ در حل مساله تجدید آرایش در سناریو های ۳ و ۵ با سناریو های ۲ و ۴ واضح است که مقدار انرژی توزیع نشده از ۵۳۲۹۹/۳۳۷ کیلووات ساعت بر سال به ۳۰۵۰۵/۸۵ کیلووات ساعت بر سال رسیده است، همچنین مقایسه مقدار شاخص پایداری ولتاژ در سناریو های ۲ تا ۵ نشان میدهد که این شاخص از ۰/۸۵۹۳

۳- انجام تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده در سناریو ۳ باعث بهبود نتایج شاخص انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ شده است. به عنوان مثال، مقادیر توابع هدف حاصل از الگوریتم پیشنهادی در این سناریو از ۵۶۲۱۷/۰۶ کیلووات ساعت بر سال و ۵/۶۷ پریونیت قبل از تجدید آرایش به ۳۰۵۰۵/۸۵ کیلووات ساعت بر سال و ۰/۵۷۷۳ رسیده است. همچنین در نظر گرفتن اثر همزمان خازن‌ها و منابع تولید پراکنده در حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع در سناریو ۵ مانند سناریو ۳ موجب بهبود کمینه شدن توابع هدف نسبت به قبل از تجدید آرایش می‌شود. به عنوان مثال،

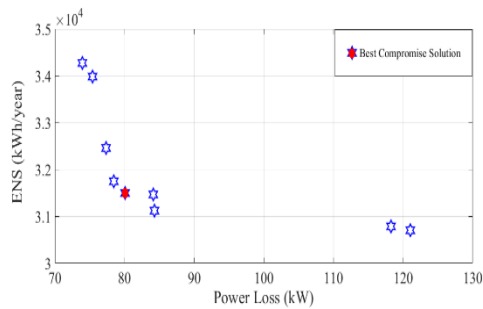
پریونیت و ۰/۸۶۶۳ پریونیت در سناریوهای ۲ و ۴ به
 ۰/۵۷۷۳ پریونیت و ۰/۶۱۲۸ پریونیت در سناریو های ۳ و
 ۵ رسیده است. کاهش شاخص انرژی توزیع نشده و پایداری
 ولتاژ در طول شبیه سازی در این چهار سناریو به عبارتی
 مترادف با بهبود توابع هدف قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ
 شبکه هستند.

جدول ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای بهبود شاخص پایداری ولتاژ

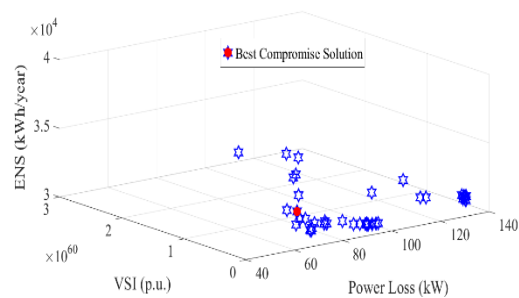
روش	متغیر های تصمیم و توابع هدف	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
اجتماع ذرات	کلیدهای باز شده	۳۰۱۳ و ۱۹ و ۲۳ و ۳	۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۳۲ و ۳۴	۵ و ۱۴ و ۱۶ و ۲۰ و ۳۵	۵ و ۱۱ و ۱۳ و ۱۵ و ۲۰
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۰/۹۶۰۳	۰/۵۹۷۸	۰/۹۷۲۳	۰/۶۸۶۴
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۱۳۳/۲۳ و ۲۷۱/۱۴ ۲۴/۱۰ و ۱۷۶/۷ و ۱۷ ۱	-	۲۳ و ۱۹۵/۱۹ و ۱۱۹/۱۰ و ۲۴۱/۵۰ و ۵/۶۲
	سایز خازن ها) (کیلووار)	-	-	۲۰۰ و ۱۴۰ و ۱۴۰ و ۱۴۰	۱۸۰ و ۱۶۰ و ۱۶۰ و ۱۰۰
جهش قورباغه	کلیدهای باز شده	۹ و ۱۶ و ۲۰ و ۲۴ و ۳۴	۸ و ۱۴ و ۱۶ و ۲۰ و ۲۳	۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۳۰ و ۳۴	۳ و ۱۲ و ۲۰ و ۳۵ و ۳۶
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۰/۹۲۹۰	۰/۵۸۶۱	۰/۹۰۸۱	۰/۶۸۰۴
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۱۴۷/۲۹ و ۱۴۰/۸۳ ۱۳ ۴۲۳/۹۷ و ۳۶/۸۱	-	۴۵۲/۹۸ و ۲۹۹/۷۷ و ۲۹۵/۸۰ و ۱۹ و ۵/۵۸
	سایز خازن ها) (کیلووار)	-	-	۲۰۰ و ۱۸۰ و ۱۴۰ و ۱۲۰	۱۸۰ و ۱۴۰ و ۱۰۰ و ۱۰۰
بهبود یافته جستجوی گرانشی	کلیدهای باز شده	۳ و ۱۳ و ۱۶ و ۱۸ و ۲۴ و ۵	۸ و ۱۴ و ۱۷ و ۲۰ و ۲۳	۱۱ و ۱۴ و ۲۰ و ۲۳ و ۳۱	۹ و ۱۴ و ۱۷ و ۱۸ و ۲۲
	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	۰/۸۵۹۳	۰/۵۷۷۳	۰/۸۶۶۳۴	۰/۶۱۲۸
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	-	۲۹۴/۱۶ و ۱۹۱/۱۰ و ۱۰۷/۸۱ و ۴۳/۳۵ و ۲۷	-	۸/۲۰۹۶۲/۱۰ و ۲۲۷ و ۷۲ و ۲۲۷/۳۴ و ۱۹
	سایز خازن ها) (کیلووار)	-	-	۱۶۰ و ۱۴۰ و ۱۲۰ و ۱۰۰	۱۴۰ و ۱۲۰ و ۱۰۰ و ۱۰۰

از الگوریتم بهبود یافته جستجوی گرانشی برای مساله
 بهینه‌سازی دو و سه هدفه تجدید آرایش در حضور منابع
 تولید پراکنده و واحدهای خازنی در شکل‌های (۵) تا (۷)
 نشان داده شده است.
 همچنین جواب مصالحه بین توابع هدف مختلف در هر
 جبهه پارتو در بهینه‌سازی دو و سه هدفه با رنگ قرمز
 مشخص شده است.

با توجه به اینکه ۳ تابع هدف مورد نظر در این مطالعه با هم
 در تضاد هستند، نمی‌توان با استفاده از مفهوم بهینگی تک
 هدفه جواب نهایی مساله را بدست آورد، زیرا این سه تابع به
 هم بهبود پیدا نمی‌کنند و به عبارتی ما با مجموعه‌ای از
 جواب‌ها به جای یک جواب سر و کار داریم. به همین منظور
 برای ارضا سه تابع هدف به صورت همزمان از مفهوم بهینگی
 پارتو استفاده شده است، جبهه‌های بهینه پارتو بدست آمده

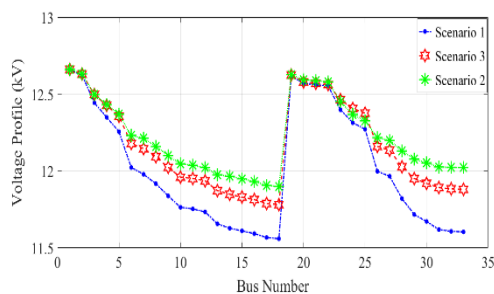


شکل ۶- جبهه پارتو دو هدفه برای شاخص پایداری ولتاژ و انرژی توزیع نشده



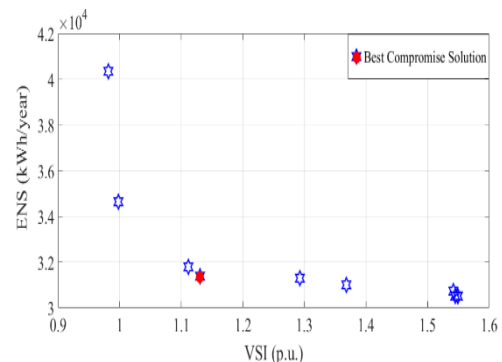
شکل ۷- جبهه پارتو سه هدفه برای شاخص های انرژی توزیع نشده و پایداری ولتاژ و تلفات توان

به منظور بررسی تاثیر تجدید آرایش و تولید پراکنده بر روی پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باسه، اثر تجدید آرایش در سناریو ۲ و اثر تجدید آرایش در حضور تولید پراکنده در سناریو ۳ بر روی پروفیل ولتاژ در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۸) مشخص است، تجدید آرایش در حضور تولید پراکنده اثر بهتری در بهبود پروفیل ولتاژ داشته است نسبت به تجدید آرایش در عدم حضور تولید پراکنده در هر دو شبکه تست.



شکل ۸- پروفیل ولتاژ در شبکه تست ۳۳ باسه

در جدول ۴، نتایج بهینه‌سازی ۳ هدفه تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی توسط الگوریتم های اکتشافی مورد نظر در این مطالعه بدست آمده است. همچنین جواب مصالحه حاصل از الگوریتم پیشنهادی که در شکل (۷) با رنگ قرمز مشخص شده بر اساس $(w_1=w_2=w_3=0.33)$ طبق رابطه (۳۲) می‌باشد، بر این اساس مشخص است که درجه وزنی یا اهمیت هر سه تابع هدف در رابطه (۳۲) در حل مساله چند هدفه یکسان می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۴ واضح است که الگوریتم پیشنهادی به نتایجی بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در حل مساله چند هدفه رسیده است، و این نشان‌دهنده توانایی روش مورد نظر در این مطالعه است. به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در بهینه‌سازی دو هدفه جبهه‌های پارتو دو مورد نظر بررسی شده اند. با توجه به شکل (۵) در بهینه‌سازی ۲ هدفه، مشخص است که مقدار توابع هدف انرژی توزیع نشده و تلفات توان در جواب مصالحه برابر است با $31466/44$ کیلووات ساعت بر سال و $80/5$ کیلووات، مقدار بهینه همین توابع در جبهه پارتو $30719/45$ کیلووات ساعت بر سال و $73/66$ کیلووات می‌باشد، اختلاف بین مقادیر توابع هدف در جواب مصالحه با مقادیر بهینه آنها در جبهه پارتو کمتر از ۲ درصد است که نشان از توانایی روش پیشنهادی در حل مسائل چند هدفه را دارد. همچنین در شکل (۶) نیز اختلاف مقادیر توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ در جواب مصالحه با مقادیر بهینه آنها در جبهه پارتو ناچیز است.



شکل ۹- جبهه پارتو دو هدفه برای انرژی توزیع نشده و تلفات توان

جدول ۴- بهترین جواب مصالحه به همراه متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به مسئله بهینه‌سازی سه هدفه

الگوریتم	متغیرهای کنترل		تلفات توان (کیلو وات)	انرژی تامین نشده (کیلووات ساعت/ سال)	شاخص پایداری ولتاژ (پریونیت)	کلیدهای باز شده
	سایز تولید پراکنده (کیلووات)	سایز خازن ها (کیلووار)				
اجتماع ذرات	۵۰۰ - ۲۷۹/۲ - ۱۹۸/۱۵	۱۶۰ - ۲۰۰ - ۱۲۰ ۱۰۰ -	۷۳/۲۸	۳۲۶۸۷/۵۴	۲/۴۱	۳۷ و ۱۳ و ۳۵ و ۲۹ و ۲۰
جهش قورباغه	۵۰۰ - ۵۰۰ - ۳۰۰ - ۳۰۰	۱۶۰ - ۲۰۰ - ۱۲۰ ۱۰۰ -	۶۴/۷	۳۲۷۶۳/۲۲	۲/۵۰	۳۷ و ۱۳ و ۳۵ و ۱۸ و ۲۹
بهبود یافته جستجوی گرانشی	۵۰۰ - ۵۰۰ - ۳۰۰ - ۳۰۰	۱۶۰ - ۲۰۰ - ۱۲۰ ۱۰۰ -	۶۱/۵۸	۳۲۵۸۷/۵۴	۱/۲۴۳	۳۷ و ۱۲ و ۳۵ و ۱۹ و ۱۵

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم قدرتمندی ارائه شده برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در قالب تک و چند هدفه، به نام الگوریتم بهبودیافته جستجوی گرانشی مبتنی بر ارائه یک معادله جدید سرعت ماکزیمم متغیر با زمان در سرعت. دلیل اصلی استفاده از الگوریتم پیشنهادی، حل مشکل همگرایی زودرس الگوریتم متداول جستجوی گرانشی است که در مواقعی منجر به همگرایی به جواب‌های غیر بهینه می‌شود. توابع هدف مسئله تشکیل شده از مینیمم کردن تلفات توان و انرژی توزیع نشده شبکه توزیع و همچنین شاخص پایداری ولتاژ. برای حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع در قالب چند هدفه، در الگوریتم پیشنهادی از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است. سیستم تست در

مقاله شبکه ۳۳ باسه می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده، الگوریتم بهبودیافته جستجوی گرانشی در مقایسه با الگوریتم‌های سایر مراجع و همچنین روش‌های اکتشافی مورد نظر در این مطالعه نتایج بهتری داشته است. نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با مقایسه با نتایج سایر مراجع این ادعا را ثابت می‌کند که روش پیشنهادی دارای دقت و کارایی بالایی برای حل مسئله تک و چندهدفه چندهدفه بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های آنها می‌باشد، همچنین الگوریتم پیشنهادی قادر به حل مسائل تک و آنها است. اثر منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع منجر به کاهش تلفات، انرژی توزیع نشده و بهبود شاخص پایداری ولتاژ شبکه شده است، همچنین استفاده از شاخص قابلیت اطمینان در کنار پایداری ولتاژ، شرایط ایمنی برای شبکه توزیع فراهم می‌کند.

مراجع

- [1] A. Azizivahed, H. Lotfi, M. J. Ghadi, S. Ghavidel, L. Li, and J. Zhang, "Dynamic feeder reconfiguration in automated distribution network integrated with renewable energy sources with respect to the economic aspect," IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia) conference, IEEE, 2019, pp. 2666-2671.
- [2] Rani, D.S., N. Subrahmanyam, and M. Sydulu, "Multi-objective invasive weed optimization—an application to optimal network reconfiguration in radial distribution systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 73, 2015, pp. 932-942.
- [3] T. Niknam, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and HBMO algorithms for multi-objective distribution feeder reconfiguration," Energy Convers. Manage, vol. 50, no. 8, 2009, pp. 2074-2082.
- [4] Alonso, F., D. Oliveira, and A.Z. de Souza, "Artificial immune systems optimization approach for multi-objective distribution system reconfiguration" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 2, 2015, pp. 840-847.

- [5] Roberge, V., M. Tarbouchi, and F. Okou. "New encoding based on the minimum spanning tree for distribution feeder reconfiguration using a genetic algorithm," International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), IEEE, May 2016.
- [6] Parizad, A., H. R. Baghaee, Amirnaser Yazdani, G. B. Gharehpetian, "Optimal distribution systems reconfiguration for short circuit level reduction using PSO algorithm," IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). IEEE, April 2018.
- [7] Reddy, A.S., M.D. Reddy, and Y.K. Reddy, "Feeder Reconfiguration of Distribution Systems for Loss Reduction and Emissions Reduction using MVO Algorithm," Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 12, no. 2, 2018, pp. 1-8.
- [8] Landeros, A., S. Koziel, and M.F. Abdel-Fattah, "Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019. 7(3): p. 589-598.
- [9] Pegado, R., Zocimo Ñaupari, Yuri Molina, Carlos Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO," Electric Power Systems Research, vol. 169, 2019, pp. 206-213.
- [10] Jazebi, S., Vahidi, B., "Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances," Electric Power Systems Research, vol. 91, 2012, pp. 9– 17
- [11] Olamaei, j., Niknam, T., and badali, S. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Minimization Based on Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm," Energy Procedia, 2012, 14, pp.304 – 311
- [12] H. Lotfi, "Optimal sizing of distributed generation units and shunt capacitors in the distribution system considering uncertainty resources by the modified evolutionary algorithm," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 13, 2022, pp. 4739-58.
- [13] Narimani, M. R., Azizvahed, A., Javid sharifi, M. "Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost," IET Generation, Transmission & Distribution, vol, 8, no. 1, 2014. pp. 55-69.
- [14] Azizvahed, A., Hossein Narimani, Ehsan Naderi, Mehdi Fathi, Mohammad Rasoul Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration," Energy, vol. 138, 2017, pp. 355-373.
- [15] Roosta, A., H.-R. Eskandari, and 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, no. 11, 2019, pp. 7095-09.
- [16] Srinivasa Rao, R., Ravindra, K., Satish, K., Narasimham. S. V. L. "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," IEEE Transactions on Power systems, vol. 28, no. 1, 2013, pp.317-325.
- [17] Mahboubi-Moghaddam, E., Narimani, M. R., Khooban, M. H, Azizvahed, A., Javid sharifi, M. "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," Electrical Power and Energy Systems, vol.76, 2016, pp.35–43.
- [18] J. Siahbalaee, N. Rezanejad, and 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, 2019, pp. 1475–1414.
- [19] V. Fathi, H. Seyedi and 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, 2020, pp. e12346.

[20] Hamouda, A. and S. Sayah, "Optimal capacitors sizing in distribution feeders using heuristic search-based node stability-indices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, 2013, pp. 56-64.

[21] Sajjadi, S.M., M.-R. Haghifam, and J. Salehi, "Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, 2013, pp. 366-375.

[22] H. Lotfi and 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, 2021, pp. 2223-2233.

[23] H. Lotfi, R. Ghazi, and 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, 2020, pp. 779-809.

[24] H. Lotfi, "Multi-objective energy management approach in distribution grid integrated with energy storage units considering the demand response program," *International journal of energy research*, vol. 44, no. 13, 2020, pp. 10662-10681.

[۲۵] رحیم فتحی، بهروز طوسی و سجاد گلوانی، "تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت بر اساس تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی با استفاده از الگوریتم اجتماع سالپ بهبودیافته"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۲۰، شماره ۶۸، بهار ۱۴۰۱.

[۲۶] قاسم میر بابایی، مسعود رادمهر و علیرضا ذکریزاده، "مدلسازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده" دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.

[۲۷] علی دهقانی و غلامرضا حسامیان، "یک روش پیشنهادی برای رتبه بندی فازی در تصمیم‌گیری چند شاخصه چند دوره ای در محیط فازی نوع ۲"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۴۷-۶۵.