

---

---

# Presenting an evolutionary improved algorithm for the multi-objective problem of distribution network reconfiguration in the presence of distributed generation sources and capacitor units with regard to load uncertainty

Hossein Lotfi<sup>1</sup>, Mohammad Ebrahim Hajiabadi<sup>2</sup>, Mahdi Samadi<sup>3</sup>

1- Postdoctoral Researcher, Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, [Hossein\\_lotfi95@yahoo.com](mailto:Hossein_lotfi95@yahoo.com)

2- Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

(Corresponding author), [Me.hajiabadi@hsu.ac.ir](mailto:Me.hajiabadi@hsu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, [Ma.samadi@hsu.ac.ir](mailto:Ma.samadi@hsu.ac.ir)

## Abstract:

Reconfiguration of distribution network feeders is one of the well-known and effective strategies in the distribution network to obtain a new optimal configuration for the distribution feeders by managing the status of switches in the distribution network. This study formulates the multi-objective problem of reconfiguration of a distribution network in the optimal presence of distributed generation sources and capacitor units in a multi-objective format. Also, the effect of uncertainty related to electric charge is included in the optimization process of the problem. The optimization problem of the distribution network reconfiguration is non-linear and non-convex, considering that the effect of distributed and capacitive generation units makes the optimization problem more complicated. For this purpose, an improved gray wolf optimization algorithm is presented to solve this optimization problem. Then, the values of the objective functions are normalized using fuzzy membership functions, and finally, fuzzy logic is used to find the most optimal solution among the Pareto solutions. To verify the effectiveness of the proposed method, it is tested on a test system of 33 pools, and the results of the optimization are compared with those of other evolutionary algorithms.

**Keywords:** Feeder reconfiguration, Distributed generation, Capacitor units, Energy not supplied, Modified grey wolf optimization method.

Submit date: 2022/07/02  
Accepted date: 2023/03/06

Corresponding author's name: Mohammad Ebrahim Hajiabadi

Corresponding author's address: Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

# ارائه یک الگوریتم بهبود یافته تکاملی برای مسئله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی با توجه به عدم قطعیت بار

نوع مطالعه: پژوهشی

حسین لطفی<sup>۱</sup>، پژوهشگر پسا دکتری، محمد ابراهیم حاجی آبادی<sup>۲\*</sup>، دانشیار، مهدی صمدی<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران

Hossein\_lotfi95@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران

Me.hajiabadi@hsu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران

Ma.samadi@hsu.ac.ir

**چکیده:** 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 می گیرد. در این مطالعه، مسئله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور بهینه منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در قالب چند هدفه فرموله شده است. همچنین اثر عدم قطعیت مربوط به بار الکتریکی نیز در فرایند بهینه سازی مسئله مورد نظر لحاظ شده است. توابع هدف متداول در مساله تجدید آرایش شامل تلفات توان و انحراف ولتاژ می باشند که اهداف مهمی در سیستم های توزیع سنتی هستند، معمولاً به تابع هدف قابلیت اطمینان توجه کمتری شده است. از این رو، اهداف اصلی این مطالعه بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات و آلودگی واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) از طریق حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع می باشد. مسئله بهینه سازی تجدید آرایش شبکه توزیع، یک مسئله غیر خطی و غیر محدب است، در نظر گرفتن اثر واحدهای تولید پراکنده و خازنی باعث پیچیدگی بیشتر مسئله بهینه سازی می شود. به همین منظور، الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته گرگ خاکستری برای حل این مسئله بهینه سازی ارائه شده است. در ادامه، مقادیر توابع هدف با استفاده از توابع عضویت فازی، نرمالیزه شده اند و در نهایت، از منطق فازی برای یافتن بهینه ترین جواب در میان جوابهای پارتو به دست آمده استفاده شده است. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، بر روی سیستم تست ۳۳ باسه تست شده، همچنین نتایج حاصل از بهینه سازی با نتایج سایر الگوریتم های تکاملی از قبیل اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است.

**واژه های کلیدی:** تجدید آرایش شبکه توزیع، منابع تولید پراکنده، الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری، انرژی توزیع نشده.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

نام نویسنده مسئول : محمد ابراهیم حاجی آبادی

نشانی نویسنده مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران

## ۱- مقدمه

به طور کلی بسیاری از عملیات کنترلی در سیستم‌های توزیع از جمله کنترل ولتاژ و حفاظت در شبکه‌های توزیع در ساختار شعاعی انجام میشود، اما در واقع این سیستم‌ها دارای توپولوژی حلقوی هستند. به همین دلیل تلفات خطوط و افت ولتاژ این شبکه‌ها بیشتر از شبکه‌های انتقال است. در سیستم‌های توزیع تعداد زیادی سوئیچ برای تغذیه باس‌های شبکه از مسیرهای مختلف وجود دارد، تجدید آرایش سیستم توزیع یک عملیات تعیین توپولوژی بهینه فیدرهای شبکه با مدیریت عملیات سوئیچینگ برای دستیابی به اهداف خاصی نظیر کاهش تلفات بدون تشکیل بخشی از شبکه به عنوان یک جزیره است (Lotfipour & Afrakhte, 2016). مسئله 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 مسئله از قبیل ناپیوستگی و مشتق پذیری، مناسب نیستند (Lotfipour & Afrakhte, 2016). بر این اساس، محققان روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های اکتشافی برای حل این مساله بهینه‌سازی ارائه کرده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه علف هرز برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است (Rani et al., 2015). الگوریتم جستجوی گرانشی پیشرفته برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود پایداری گذرا و کاهش هزینه بهره برداری و تلفات توان پیاده‌سازی شده است (Mahboubi-Moghaddam et al., 2016). الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک اصلاح شده مبتنی بر تغییر جمعیت برای حل مساله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است (Abdelaziz, 2017). الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب تاب فازی توسط (Kaur & Ghosh, 2016) برای حل مساله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع نامتعادل با هدف کاهش تلفات استفاده شده است. (Parizad et al., 2018) روش بهینه‌سازی الگوریتم اجتماع ذرات برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش سطح اتصال کوتاه بکار گرفته‌اند. (Reddy et al., 2018) از یک الگوریتم جدید مبتنی بر مفاهیم کیهان‌شناسی برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان و آلاینده‌ها استفاده کرده‌اند. یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر کاهش فضای جستجو برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ معرفی شده است (Landeros et al., 2019). الگوریتم بهبود یافته باینری اجتماع ذرات

به منظور حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان استفاده شده است (Pegado et al., 2019). یک روش ترکیبی مبتنی بر نظریه گراف و الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است (Alonso et al., 2014).

استقرار منابع تولید پراکنده با هدف بهبود وضعیت شبکه از لحاظ کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان مستلزم مطالعاتی در زمینه مدیریت بهینه این تأسیسات است (Lotfi, 2022). مطالعات زیادی به منظور حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع انجام شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه به منظور حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و هزینه بهره برداری ارائه شده است (Azizivahed et al., 2017). الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه توسط (Siahbalaee et al., 2019) برای حل مسئله مکانیابی واحدهای تولید پراکنده و تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است. بهینه‌سازی مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع و مکانیابی واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان پرداخته شده است (Roosta et al., 2019). الگوریتم رقابت استعماری توسط (Sedighizadeh et al., 2017) برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. الگوریتم ریشه دوندگی برای حل مسئله مکانیابی واحدهای تولید پراکنده و تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است (Viet et al., 2018). مسئله چند هدفه جدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در حضور واحدهای تولید پراکنده با استفاده از روش جستجوی گروهی سه بعدی بهینه‌سازی شده است (Teimourzadeh & Mohammadi-Ivatloo, 2020). الگوریتم جدیدی مبتنی بر پشته با ویژگی بهره برداری عمیق برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع و تخصیص بهینه واحدهای پراکنده با هدف کاهش تلفات ارائه شده است (A. M. Shaheen et al., 2022). الگوریتم اجتماع ذرات برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه شده است (Kumar & Bohre, 2022).

تخصیص بهینه خازن‌ها به طور همزمان با مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع، مزایای مهمی از جمله بهبود کیفیت توان، پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات را برای شبکه توزیع به همراه دارد. از این رو، بخش‌های

- فرمول بندی تجدید آرایش شبکه توزیع و تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده و خازن ها در سیستم توزیع با در نظر گرفتن توابع تلفات، انرژی توزیع نشده و آلودگی.
  - در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در ارزیابی توابع هدف مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع.
  - در نظر گرفتن انرژی توزیع نشده به عنوان تابع قابلیت اطمینان در این مطالعه و بهبود این شاخص توسط حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع.
  - در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت مربوط به بار الکتریکی در حل مسئله بهینه سازی تجدید آرایش شبکه توزیع.
  - ارائه الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته گرگ خاک ستی مبتنی بر منطقه فازی بمنظور حل مسئله بهینه سازی تجدید آرایش شبکه توزیع در قالب تک و چند هدفه.
- این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم تعریف مسئله شامل متغیرهای مسئله، توابع هدف، قیود مسئله و مدل سازی عدم قطعیت ارائه شده است. ستراتیژی حل مسئله چندهدفه و نتایج شبیه سازی بترتیب در بخش های سوم و چهارم بیان شده است. نتیجه گیری نیز در بخش پنجم شده است.

## ۲- تعریف مسئله پیشنهادی و چارچوب آن

در این بخش فرض شده است یک شرکت صاحب تمام تجهیزات شبکه توزیع باشد، همچنین بهره برداری از شبکه بر عهده شرکت باشد. در ادامه متغیرهای مسئله، توابع هدف و قیود مسئله شرح داده شده است.

### ۲-۱- متغیرهای مسئله

متغیرهای مسئله بهینه سازی چند هدفه به شرح زیر می باشد:

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

$$X_{SW} = [SW_1, SW_2, \dots, SW_{N_{Tie}}] \quad (2)$$

$$X_{Tie} = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{N_{Tie}}] \quad (3)$$

$$X_{PDG} = [PDG_1, PDG_2, \dots, PDG_{N_{PDG}}] \quad (4)$$

$$X_{Q_{Cap}} = [Q_{Cap_1}, Q_{Cap_2}, \dots, Q_{Cap_{N_{Cap}}}] \quad (5)$$

$X$  بردار متغیرهای کنترلی مسئله است.  $N_{Cap}$  و  $N_{DG}$  به ترتیب تعداد واحدهای تولید پراکنده و واحدهای خازنی می باشد.  $Tie_i$  بیانگر وضعیت سوئیچ نام می باشد و مقدار آن صفر یا یک است.  $SW_i$  و  $N_{Tie}$  بیانگر شماره سوئیچ های بسته و تعداد سوئیچ های بسته هستند.  $PDG_i$  و  $Q_{Cap_j}$  به ترتیب مقدار توان اکتیو واحد تولید پراکنده آم و مقدار توان راکتیو واحد خازنی نام می باشد.

مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع را در حضور واحدهای خازنی مورد بررسی قرار داده اند.

روش بهینه سازی نهنگ تطبیقی برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع به همراه تخصیص بهینه خازن برای به حداقل رساندن تلفات توان و هزینه عملیاتی پیشنهاد شده است (Babu et al., 2021). روش بهینه سازی اکوسیستم مصنوعی برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع و اختصاص بهینه خازن و تولید پراکنده با هدف به حداقل رساندن تلفات شبکه پیشنهاد شده است (A. Shaheen et al., 2022). الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی اصلاح شده برای مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع به همراه تخصیص بهینه خازن بمنظور کاهش تلفات شبکه و بهبود مشخصات ولتاژ معرفی شده است (Hussain et al., 2019). الگوریتم باز پخت شبیه سازی شده مبتنی بر نظریه گراف توسط (Stojanović et al., 2023) برای مسئله تجدید آرایش شبکه در حضور واحدهای خازنی با هدف کاهش تلفات توان و انحراف ولتاژ ارائه شده است.

بررسی تاریخ ادبیات مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع نشان می دهد که اکثر مطالعات تلفات توان و انحراف ولتاژ گره ها به عنوان توابع هدف مسئله تجدید آرایش در نظر گرفته اند 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. همچنین در بخش از مطالعات که مسئله تجدید آرایش در حضور واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) حل شده به قید آلودگی واحدهای تولید پراکنده توجه نشده است که می تواند اثرات مخربی بر محیط زیست داشته باشد. برای این منظور، در پژوهش حاضر، شاخص انرژی توزیع نشده به عنوان تابع هدف قابلیت اطمینان، در کنار آلودگی و هزینه بهره برداری به عنوان توابع هدف مساله تجدید آرایش شبکه توزیع معرفی شده اند. همچنین در مطالعات مورد بررسی بالا، اثری از در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت نظیر بار الکتریکی دیده نشده و مسئله در فضای قطعی حل شده است.

مساله تجدید آرایش به طور ذاتی پیچیده و غیر محدب است، در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی مسئله را نسبت به قبل پیچیده تر میکند. از این رو، حل مسئله بهینه سازی 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 بهینه سازی بهبود یافته گرگ خاک ستی چند هدفه برای مقابله با پیچیدگی مساله بهینه سازی در این مطالعه ارائه شده است. در الگوریتم پیش سنها برای برآورده کردن توابع هدف مسئله به صورت همزمان از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است، زیرا در مسئله بهینه سازی چندهدفه به جای یک جواب بهینه با مجموعه ای از جواب ها (جبهه پارتو) روبرو هستیم. به همین منظور یک مخزن برای ذخیره جواب های غیر غالب در نظر گرفته شده است.

مشارکت اصلی این مطالعه به شرح زیر می باشد:

## ۲-۲-توابع هدف

در این مطالعه، توابع هدف شامل حداقل سازی انرژی توزیع نشده، هزینه بهره‌برداری و آلودگی واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) می‌باشد.

### ۱-۲-۲-هزینه بهره برداری

هزینه بهره برداری از رابطه (۶) محاسبه می‌شود ( Lotfi & Shojaei, 2022):

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{NDG} Price_{DG,j} \times P_{DG,j} + Price_{Sub} \times P_{Sub} + \sum_{i=1}^{NSW} Price_{SW,i} \times |S_i - S_{0i}| \quad (6)$$

Price<sub>DG,j</sub> و Price<sub>Sub,j</sub> به ترتیب بیانگر هزینه خرید برق از لامین تولید پراکنده و پست می‌باشند و Price<sub>SW,i</sub> نیز هزینه سوئیچینگ است. P<sub>Sub</sub> و P<sub>DG,j</sub> به ترتیب توان خریداری شده از لامین تولید پراکنده و پست را معرفی می‌کند. S<sub>i</sub> و S<sub>0i</sub> به ترتیب بیانگر حالت قبلی و فعلی سوئیچ می‌باشند.

### ۲-۲-۲-انرژی توزیع نشده

انرژی توزیع نشده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$ENS_i = P_i \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{i,j} + U'_{i,j}) \quad (7)$$

در رابطه فوق V مجموعه باس‌هایی است که از یک فیدر تغذیه می‌شوند. U<sub>i,j</sub> و U'<sub>i,j</sub> به ترتیب بیانگر زمان تعمیر (ساعت در سال) و زمان مربوط به جبران خسارت (ساعت در سال) شاخه‌های مرتبط با باس i می‌باشند. λ<sub>i,j</sub> و d<sub>i,j</sub> به ترتیب نرخ خرابی و طول خط هستند. t<sub>i,j</sub> و t'<sub>i,j</sub> به ترتیب میانگین مدت زمان تعمیر و میانگین مدت زمان بازیابی خط بین باس‌های i و j می‌باشند. رابطه نهایی انرژی توزیع نشده کل شبکه با در نظر نگرفتن گره مرجع از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (Lotfi & Shojaei, 2022):

$$f_2(x) = \sum_{i=2}^{N_{Bus}} ENS_i \quad (8)$$

### ۳-۲-۲-آلودگی

خطرات زیست محیطی ناشی از عدم رعایت برخی مقررات اجباری توسط واحدهای تولید برق و سایر بخش‌های صنعتی است. در نظر گرفتن تابع آلودگی باعث می‌شود ظرفیت تولید واحدهای تولید پراکنده مانند دیزل ژنراتور یا توربین گاز بهینه شود تا خطر کمتری برای محیط زیست ایجاد کند. این تابع به صورت زیر فرموله شده است:

$$f_3(x) = \sum_{i=2}^{NDG} (NO_x^{Grid} + CO_2^{Grid} + SO_2^{Grid}) + (NO_x^{DG} + CO_2^{DG} + SO_2^{DG}) \quad (9)$$

معادله فوق از دو بخش تشکیل شده است که به ترتیب آلودگی تولید شده توسط پست و آلودگی تولید شده توسط واحدهای تولید پراکنده می‌باشد.

## ۳-۳-قیود مساله

### ۱-۳-۲-شرط شعاعی بودن

قید مربوط به شعاعی بودن شبکه از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$N_{branch} = N_{Bus} - N_{source} \quad (10)$$

N<sub>source</sub> و N<sub>Bus</sub> به ترتیب بیانگر تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه می‌باشند. N<sub>branch</sub> تعداد خطوط شبکه می‌باشد

### ۲-۳-۲-معادلات پخش بار

قید معادلات پخش بار از روابط (۱۱) - (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$P_j = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (11)$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_i^t V_j^t Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (12)$$

P<sub>j</sub> و Q<sub>j</sub> به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس i نام هستند. V<sub>i</sub> و δ<sub>i</sub> به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ i نام می‌باشند. Y<sub>ij</sub> و θ<sub>ij</sub> به ترتیب بیانگر اندازه و زاویه ادمیتانس شاخه بین باس‌های i و j هستند.

### ۳-۳-۲-محدوده مربوط به ولتاژ باس‌ها

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (13)$$

V<sub>max</sub> و V<sub>min</sub> بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ باس i نام هستند. V<sub>i</sub> بیانگر مقدار ولتاژ باس i نام می‌باشد.

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

I<sub>f,i</sub><sup>Max</sup> و I<sub>f,i</sub> به ترتیب دامنه جریان و حداکثر جریان فیدر i نام می‌باشند. N<sub>feeder</sub> بیانگر تعداد فیدرهای شبکه می‌باشد.

### ۴-۳-۲-محدودیت سوئیچینگ

$$|S_i - S_{0i}| \leq N_{switch}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{switch} \quad (15)$$

S<sub>0i</sub> و S<sub>i</sub> به ترتیب حالت‌های اولیه و ثانویه سوئیچ i نام هستند. N<sub>switch</sub> بیانگر تعداد سوئیچ‌ها می‌باشد.

### ۳- استراتژی بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر فازی

در این بخش، الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی و استراتژی فازی برای بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده است.

#### ۳-۱- بهینه‌سازی چند هدفه

در یک مسئله بهینه‌سازی که اهداف با هم یکسان نیستند، مسئله به صورت زیر فرموله می‌شود (Lotfi et al., 2021):

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T, G_1(X) \leq 0 \\ H_1(x) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$G_1(X)$  و  $H_1(X)$ ، قیود مساوی و نامساوی هستند.  $n$  و  $X$  به ترتیب، بیانگر توابع هدف و بردار متغیرهای بهینه‌سازی هستند. بردار  $X_1$  بر  $X_2$  غلبه می‌کند زمانی که شرایط زیر برقرار باشد (Lotfi et al., 2021):

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (20)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (21)$$

پس از محاسبه توابع هدف، از منطق فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ استفاده می‌شود. تابع عضویت فازی  $\mu_i$  برای هر تابع هدف به شرح زیر می‌باشد:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^{\min} \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(x) \leq f_i^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

$f_i^{\min}$  و  $f_i^{\max}$  به ترتیب بیانگر حدود بالا و پایین تابع هدف هستند. این مقادیر از بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت مجزا بدست می‌آید. مقدار نرمالیزه شده هر تابع برای هر عضو در جبهه پارتو از رابطه زیر بدست می‌آید (Lotfi & Shojaei, 2022):

$$N_{\mu_j} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (23)$$

$m$  و  $n$  به ترتیب جواب‌های غیر غالب و توابع هدف می‌باشند.  $\beta_k$  بیانگر وزن  $k$ امین تابع هدف است.

#### ۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری یکی از الگوریتم‌های تصادفی مبتنی بر هوش جمعی است که در سال ۲۰۱۴ توسعه یافته است. اساس این روش، ساختار سلسله مراتبی است که رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری را در طول شکار مدل می‌کند (Mohamed et al., 2016). گرگ‌های خاکستری به صورت گروهی زندگی می‌کنند و هر گروه به طور متوسط ۵ تا ۱۲ عضو دارد. اعضای هر گروه از سلسله مراتب خاصی

### ۳-۲-۵- محدودیت مربوط به منابع تولید پراکنده

$$P_{DG,i}^{\min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_{DG} \quad (16)$$

$P_{DG}^{\min}$  و  $P_{DG}^{\max}$  بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو واحد تولید پراکنده نام هستند.  $N_{DG}$  بیانگر تعداد واحدهای تولید پراکنده می‌باشد

### ۳-۲-۶- محدودیت مربوط به واحدهای خازنی

$$Q_{Cap,i}^{\min} \leq Q_{Cap,i} \leq Q_{Cap,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_{Cap} \quad (17)$$

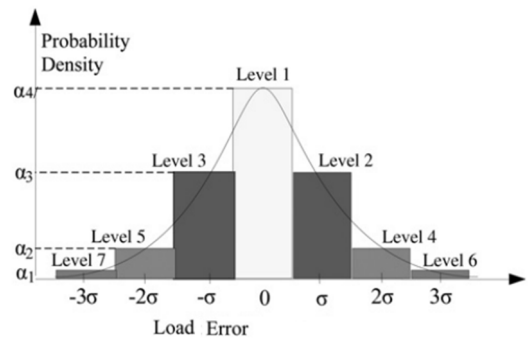
$Q_{Cap}^{\min}$  و  $Q_{Cap}^{\max}$  به ترتیب بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز توان راکتیو واحد خازنی نام هستند.  $N_{Cap}$  بیانگر تعداد واحدهای خازنی می‌باشد.

### ۲-۴- مدل‌سازی عدم قطعیت

در واقع همه پیش‌بینی‌ها دارای خطا هستند، به دلیل خطا در نمونه‌گیری یا اندازه‌گیری، همه اطلاعات و متغیرها نامشخص هستند. بنابراین، سیستم قدرت باید در یک محیط عدم قطعیت بررسی شود. این فضای جدید به یک ابزار قدرتمند برای انتقال متغیرها از یک محیط قطعی به یک محیط تصادفی نیاز دارد. در این مقاله، عدم قطعیت مربوط به بار الکتریکی به عنوان تابع توزیع نرمال با هفت احتمال مطابق شکل یک مدل شده است. تفاوت بین دو سطح مختلف برابر با انحراف معیار است. یک چرخ برای مدل‌سازی هر یک از سطوح ممکن متغیرهای تصادفی استفاده می‌شود. چرخ دارای هفت بخش است (هفت سطح تابع توزیع نرمال با احتمال وقوع مشخص). بدین ترتیب ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود، سپس عدد تولید شده در یکی از هفت سطح چرخ قرار می‌گیرد و مقدار متغیر با عدم قطعیت باید از آن سطح انتخاب شود. هر سناریویی که شامل متغیرهای عدم قطعیت باشد به صورت معادله (۱۸) بیان می‌شود (Lotfi, 2022).

$$[P_{load}^S] \text{ and } S = 1, \dots, N_S \quad (18)$$

$P_{load}^S$  و  $N_S$  به ترتیب مقدار کل بار در سناریوی  $S$  و تعداد کل سناریوها می‌باشند.



شکل ۱- نمونه تابع چگالی احتمال

مرحله جستجو دقیقاً برعکس حمله است: مطابق شکل ۲، در جستجو، گرگ‌ها برای ردیابی طعمه از یکدیگر دور می‌شوند ( $|A| > 1$ )، در حالی که پس از ردیابی طعمه، گرگ‌ها در مرحله حمله آنها به یکدیگر نزدیک می‌شوند ( $|A| < 1$ ). این فرآیند واگرایی در جستجو - همگرایی در حمله نامیده می‌شود (Mohamed et al., 2016).

الگوریتم گرگ خاکستری یک الگوریتم جدید است که توانایی ایجاد تعادل بین اکتشاف و بهره برداری را دارد. در نسخه فعلی الگوریتم، گرگ‌ها به چهار گروه طبقه بندی می‌شوند. گرگ آلفا نشان دهنده بهترین راه حل و وضعیت آلفا بهترین موقعیت است. موقعیت‌های به روز شده  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  به تعیین بهترین موقعیت کمک می‌کنند. اما ممکن است جواب مسئله در موقعیت گرگ  $\omega$  به دام بیفتد. بنابراین، موقعیت  $\omega$  باید به روز شود و همچنین باید به شناسایی بهترین راه حل کمک کند. در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که گرگ‌های دلتا ( $\delta$ ) و برخی از گرگ‌های امگا ( $\omega$ ) نیز در شکار شرکت کنند. از معادله (۳۱) برای تشکیل یک خانواده گرگ جدید  $\delta$  با کمک گرگ‌های دلتا  $\delta$  و امگا  $\omega$  استفاده می‌شود:

$$\overrightarrow{X_3(new)} = \frac{\overrightarrow{X_3} + \overrightarrow{X_4}}{2} \quad (31)$$

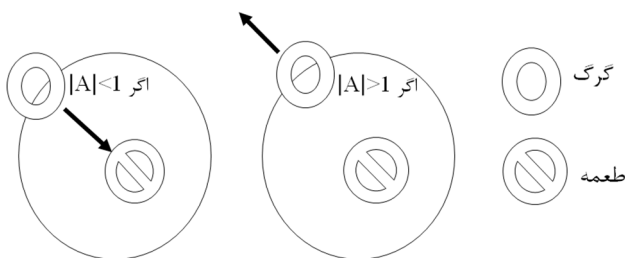
$\overrightarrow{X_4}$  موقعیت گرگ‌های  $\omega$  و  $\overrightarrow{X_3}$  وضعیت خانواده جدیدی از گرگ‌های  $\delta$  است. در الگوریتم بهبودیافته گرگ خاکستری، وضعیت گرگ‌های  $\omega$  مشابه گرگ‌های  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  به روز می‌شود. معادلات (۳۲) تا (۳۳) موقعیت به روز شده گرگ  $\omega$  را نشان می‌دهد. همچنین بهترین راه حل به روز شده در معادله (۳۴) نشان داده شده است.

$$\overrightarrow{\partial_\omega} = |\overrightarrow{\delta_4} \cdot \overrightarrow{X_\omega} - \overrightarrow{X}| \quad (32)$$

$$\overrightarrow{X_4} = \overrightarrow{X_\omega} - \overrightarrow{\varphi_4} \cdot (\overrightarrow{\partial_4}) \quad (33)$$

$$\overrightarrow{X(t+1)} = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3(new)}}{3} \quad (34)$$

شبه کد الگوریتم بهبودیافته گرگ خاکستری در شکل ۳ نشان داده شده است.



پیروی می‌کنند و با وظایف خود در گروه آشنا هستند. در هر گله، ۴ درجه گرگ برای شکار وجود دارد که به شرح زیر است:

- گرگ‌های رهبر که بر گله غالب هستند آلفا نامیده می‌شوند و می‌توانند هم‌نر و هم‌ماده باشند.
- گرگ‌های بتا به آلفا در تصمیم‌گیری‌ها و سایر فعالیت‌های گروهی کمک می‌کنند. این گرگ‌ها زمانی که آلفا خیلی پیر شده یا می‌میرد بهترین کاندید برای آلفا هستند.
- گرگ‌های دلتا تحت فرمان آلفا و بتا هستند اما برتر از امگا هستند.
- گرگ‌های با رتبه پایین در هر گروه، گرگ‌های امگا هستند. این گروه از گرگ‌ها نقش پیش از مرگ را در گروه ایفا می‌کنند. آنها باید از همه گرگ‌های دیگر اطاعت کنند و همچنین آخرین گرگ‌هایی هستند که غذا می‌خورند.

شکار گرگ خاکستری علاوه بر سلسله مراتب اجتماعی، سه مرحله را دنبال می‌کند: ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه.

برای مدل‌سازی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها، بهترین پاسخ از بین بهترین راه حل‌ها آلفا و دو گرگ دیگر با برابری کمتر نسبت به آلفا بترتیب بتا و دلتا در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت، بقیه پاسخ‌ها گرگ‌های امگا هستند. بهینه‌سازی توسط آلفا، بتا و دلتا انجام می‌شود و گرگ‌های امگا از این گروه‌ها پیروی می‌کنند (Yin & Sun, 2022).

$$\overrightarrow{D} = \overrightarrow{C} \cdot \overrightarrow{X_p}(t) - \overrightarrow{X}(t) \quad (24)$$

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) - \overrightarrow{A} \cdot \overrightarrow{D} \quad (25)$$

$t$  تعداد تکرارهای جاری را نشان می‌دهد.  $A$  و  $C$  بردارهای ضرائب،  $X$  و  $X_p$  به ترتیب بردار موقعیت شکار و بردار موقعیت گرگ هستند. از معادلات ۲۶ و ۲۷ برای تعریف بردارهای  $A$  و  $C$  استفاده می‌شود.

$$\overrightarrow{A} = \overrightarrow{a} \cdot (2\overrightarrow{r_2} - 1) \quad (26)$$

$$\overrightarrow{C} = 2\overrightarrow{r_1} \quad (27)$$

بردار  $a$  بصورت خطی از دو به صفر در طول تکرار کاهش پیدا می‌کند.  $\overrightarrow{r_1}$  و  $\overrightarrow{r_2}$  بردارهای تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. گرگ آلفا معمولاً شکار می‌کند، همچنین گاهی اوقات شکار توسط گرگ‌های بتا و دلتا انجام می‌شود. در مدل ریاضی رفتار شکار گرگ خاکستری، فرض بر این است که آلفا، بتا و دلتا در مورد وضعیت احتمالی طعمه شناخته شده باشند. سه راه حل اول به بهترین وجه ذخیره می‌شوند و عامل دیگر موظف است موقعیت‌های خود را مطابق با وضعیت بهترین عوامل جستجو مطابق معادلات زیر به روز کند.

$$\overrightarrow{D_\alpha} = |\overrightarrow{C_1} \cdot \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{X}|, \overrightarrow{D_\beta} = |\overrightarrow{C_2} \cdot \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{X}|, \overrightarrow{D_\delta} = |\overrightarrow{C_3} \cdot \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{X}| \quad (28)$$

$$\overrightarrow{X_1} = |\overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1} \cdot \overrightarrow{D_\alpha}|, \overrightarrow{X_2} = |\overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2} \cdot \overrightarrow{D_\beta}|, \overrightarrow{X_3} = |\overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3} \cdot \overrightarrow{D_\delta}| \quad (29)$$

$$\overrightarrow{X(t+1)} = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \quad (30)$$

## شکل ۲- فاز جستجو و حمله گرگ های خاکستری

## شکل ۳- شبه کد الگوریتم پیشنهادی

## ۴- نتایج شبیه سازی

برای حل مسئله بهینه سازی تجدید آرایش شبکه توزیع از شبکه تست ۳۳ باسه استفاده شده است. در این بخش از الگوریتم بهبود یافته گرگ

۱- مقدار اولیه جمعیت گرگ های خاکستری را تنظیم کنید:  $(X_i = 1, 2, \dots, N_{wolves})$   
 ۲- مقادیر اولیه  $A, C$  را مشخص کنید.  
 ۳- حداکثر تعداد تکرار را تعریف کنید.  
 ۴- مقدار تناسب هر عامل را ارزیابی کنید.  
 $X_{\alpha}$ : بهترین عامل جستجو  
 $X_{\beta}$ : دومین عامل جستجوی برتر  
 $X_{\delta}$ : سومین عامل جستجوی برتر  
 $X_{\omega}$ : عامل جستجوی باقیمانده  
 ۵- در حالی که  $i > \text{حداکثر تعداد تکرار}$   
 موقعیت هر عامل جستجو را با معادله (۲۸) به روز کنید.  
 $A, C$  را بروزرسانی کنید.  
 مقدار تناسب هر عامل را ارزیابی کنید.  
 $X_{\alpha}, X_{\beta}, X_{\delta}, X_{\omega}$  را بروزرسانی کنید.  
 $i=i+1$   
 ۶-  $X_{\alpha}$  را برگردان.

۵۹۸۱۷/۰۶ کیلووات ساعت بر سال می باشد. تمام شبیه سازیهای این مطالعه در نرم افزار متلب بر روی دستگاه لپ تاپ پردازنده چهار هسته ای با فرکانس ساعت ۱/۶ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت رم انجام شده است.

به منظور شبیه سازی مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع، چهار منبع تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) و چهار واحد خازنی به شرح زیر در باس های شبکه تست نصب شده است:

دو دیزل ژنراتور های با حداکثر و حداقل ظرفیت های ۳۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس های ۷ و ۱۴ نصب شده و دو دیزل ژنراتور دیگر با حداکثر و حداقل ظرفیت های ۵۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس های ۲۴ و ۳۰ قرار داده شده اند. همچنین چهار واحد خازنی با حداکثر و حداقل ظرفیت های ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلووات به ترتیب در باس های ۴ و ۸ و ۲۵ و ۳۲ قرار داده شده. ضرائب آلودگی واحدهای تولید پراکنده از (Niknam et al., 2012) گرفته شده است.

## • سناریو ۱

به منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روشهای دیگر در این مطالعه و سایر مراجع در حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع، در جدول ۱ نتایج بهینه سازی تابع انرژی توزیع نشده در عدم حضور تولید پراکنده حاصل از روش های بهینه سازی مختلف و خازن ها در ۳۰ آزمایش ارائه شده است. انجام تجدید آرایش موجب بهبود قابلیت اطمینان شده

است. به عنوان مثال، مقدر انرژی توزیع نشده حاصل از روش پیشنهادی در حدود ۱۵ درصد نسبت به مقدار اولیه این شاخص قبل از تجدید آرایش کاهش یافته. با توجه به نتایج جدول ۱، مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی بهتر از نتایج بدست آمده از سایر روش های نظیر ژنتیک (Narimani et al., 2014)، اجتهام ذرات (Narimani et al., 2014) و جستجوی گران شنی (Narimani et al., 2014) است. همچنین، با توجه به این نتایج واضح است که الگوریتم پیشنهادی می تواند به انرژی توزیع نشده بهینه تری همگرا شود. به منظور ارزیابی تاثیر عدم قطعیت به بار الکتریکی در حل مسئله مورد نظر، ۳۰ سناریو به منظور مدل سازی عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه سازی انرژی توزیع نشده با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در جدول ۲ ارائه شده است.

## جدول ۱- نتایج بهینه سازی تابع هدف انرژی توزیع نشده در عدم

## حضور منابع تولید پراکنده و خازن ها

خاکستری برای بهینه سازی تک و چندهدفه استفاده شده و نتایج آن با الگوریتم های اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است. پارامترهای الگوریتم های بهینه سازی به شرح زیر است:

۱- الگوریتم اجتماع ذرات: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ می باشد.

۲- الگوریتم جهش قورباغه: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ و تعداد مجموعه ها (گروه ها) برابر ۵ می باشد.

۳- الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری: مقدار جمعیت اولیه ۳۰۰، تعداد تکرار ماکزیمم ۲۰۰ می باشد.

به منظور انجام تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده و خازن ها در شبکه تست، سه سناریو شبیه سازی شده است:

۱- تجدید آرایش شبکه توزیع بدون و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به بار الکتریکی

۲- تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و خازن ها در قالب تک هدفه

۳- تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور همزمان منابع تولید پراکنده و خازن ها در قالب چند هدفه

## ۴-۱- شبکه ۳۳ باسه

سیستم ۳۳ باسه مورد نظر یک شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت فرسی با یک پست دو فیدر، ۳۲ باسه است (Niknam et al., 2012) که در شکل ۴ نشان داده شده. مقدار انرژی توزیع نشده قبل از تجدید آرایش برابر



جدول ۲- نتایج بهینه سازی تابع هدف انرژی توزیع نشده با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به بار الکتریکی

روش‌ها	انرژی توزیع نشده				زمان اجرا (ثانیه)
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف معیار	
زمان اجرا (ثانیه)	۵۳۷۹۸/۳۸	۵۴۲۴۸/۰	۵۴۷۷۳/۹	۴۱۰/۵	۷-۹-۳۳
کلیدهای باز شده	۳۰-۳۷	۳۰-۳۷	۳۰-۳۷	۳۰-۳۷	۳۰-۳۷
انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۲۰۹/۳	۷-۱۹-۱۴
اجتماع ذرات	۵۳۹۸۶/۱۵	۵۳۹۸۶/۱۵	۵۳۹۸۶/۱۵	۳۳-۱۴-۳۵-۱۷-	۹/۳
جستجوی	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۰	۱۷-۱۹-۳۴-
جهش‌یابی	۵۳۶۵۹/۴۱	۵۳۶۵۹/۴۱	۵۳۶۵۹/۴۱	۳۳-۱۴-۱۱-۳۲-	۳۵-۳۷
اجتماع	۵۳۷۹۸/۳۸	۵۴۲۴۸/۰	۵۴۷۷۳/۹	۴۱۰/۵	۷-۹-۳۴-
پیشنهادی	۵۳۴۰۹/۱۹	۵۳۴۰۹/۱۹	۵۳۴۰۹/۱۹	۳۳-۳۴-۳۶-۱۱-	۳۰-۳۷
جهش	۵۳۲۹۸/۳۸	۵۳۴۴۱/۳	۵۳۵۱۹/۵	۱۸۷/۳	۷-۱۹-۱۴-
قورباغه	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۰	۱۷-۱۹-۳۴-
پیشنهادی	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۵۳۲۹۹/۳۸	۰	۱۷-۱۹-۳۴-
					۳۵-۳۷

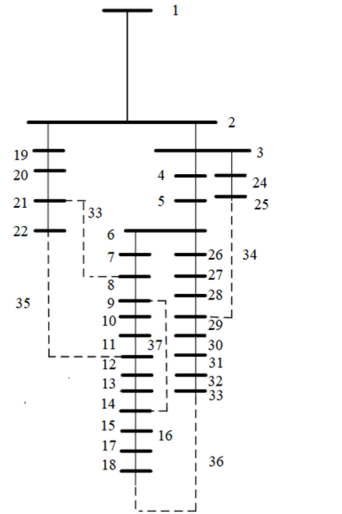
مورد نظر ارائه شده است. همچنین در جداول ۴ و ۵، به ترتیب مقایسه‌ای بین نتایج تابع هدف آلودگی و هزینه بهره‌برداری صورت گرفته است.

با توجه به نتایج جداول ۳ تا ۵، نکات زیر قابل برداشت است:

۱- در بهینه‌سازی مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی، الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته گرگ خاکستری به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های اجتماع ذرات و جهش قورباغه در بهینه‌سازی توابع هدف انرژی توزیع نشده، آلودگی و هزینه بهره‌برداری رسیده است. به عنوان مثال، مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۱۵۱ و ۶۷۵ کیلووات ساعت بر سال کمتر از مقدار بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات و جهش قورباغه می‌باشد.

۲- در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در حل مسئله بهینه‌سازی موجب شده است که مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از الگوریتم پیشنهادی در حدود ۷۴ درصد نسبت به مقدار بدست آمده در سناریو ۱ کاهش یابد. با توجه به نتایج جدول ۳، واضح است که واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) در حداکثر ظرفیت تولید خود کار می‌کنند، در حالیکه کمتر و بیشتری مقدار توان راکتیو تولیدی واحدهای خازنی ۱۰۰ و ۱۸۰ کیلووار می‌باشد.

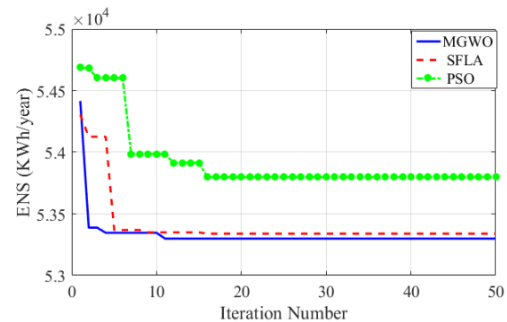
۳- مقایسه نتایج جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در نظر گرفتن توابع هدف آلودگی یا هزینه بهره‌برداری موجب می‌شود که واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) در مقایسه با بهینه‌سازی تابع انرژی توزیع نشده، نزدیک به مقدار حداکثر ظرفیت خود تولید نکنند. به عنوان مثال در بهینه‌سازی تابع هزینه بهره‌برداری حاصل از الگوریتم جهش قورباغه،



شکل ۴- دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۳ با سه

مقایسه نتایج جداول یک و دو نشان می‌دهد که در نظر گرفتن عدم قطعیت بار الکتریکی موجب می‌شود که شاخص انرژی توزیع نشده از مقدار بهینه خود دور شود و یک نقطه کار جدید ایجاد کند. به عنوان مثال، مقدار بهینه انرژی توزیع نشده قبل از در نظر گرفتن عدم قطعیت بار الکتریکی ۵۳۲۹۹/۳۸ کیلووات ساعت بر سال می‌باشد، در حالیکه مقدار این شاخص پس از در نظر گرفتن عدم قطعیت به ۵۳۴۰۹/۱۹ کیلووات ساعت بر سال رسیده است.

شکل ۵، منحنی همگرایی تابع هدف انرژی توزیع نشده بدست آمده حاصل از سه الگوریتم اجتماع ذرات، جهش قورباغه و الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واضح است که الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته گرگ خاکستری در مقایسه با سایر الگوریتم‌های زودتر به جواب بهینه همگرا شده است.



شکل ۵- منحنی همگرایی تابع هدف تلفات بدست آمده حاصل از سه الگوریتم مختلف

## سناریو ۲

به منظور نشان دادن کارایی منابع تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) و واحدهای خازنی در مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع، در جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی تابع هدف انرژی توزیع نشده حاصل از روش‌های

حداقل و حداکثر مقدار تولید واحدهای تولید پراکنده ۱۰۰ و ۴۸۵ کیلووات می‌باشد. در حالیکه در بهینه‌سازی تابع آلودگی حاصل از الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته گرگ خاکستری، حداقل و حداکثر مقدار تولید واحدهای تولید پراکنده ۲۲۵ و ۴۹۱ کیلووات می‌باشد، بیانگر این است که واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) در بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری میزان تولید کمتری در مقایسه با بهینه سازی دو تابع هدف دیگر دارند. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار تولید توان راکتیو خازن‌ها

جدول ۳- نتایج بهینه سازی تابع هدف انرژی توزیع نشده در حضور منابع تولید پراکنده و خازن‌ها

روش‌ها	متغیرهای کنترلی		انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)	کلیدهای باز شده
	خروجی منابع تولید پراکنده (کیلووات)	خروجی واحدهای خازنی (کیلووار)		
اجتماع ذرات	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۱۶۰-۱۶۰-۲۰۰-۱۰۰	۳۱۱۸۰/۱۳	۸-۶-۱۵-۳۴-۳۷
جهش قورباغه	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۱۴۰-۱۶۰-۱۶۰-۱۲۰	۳۰۶۵۶/۹۶	۱۳-۱۹-۲۹-۳۵-۳۷
پیشنهادی	۳۰۰-۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰	۱۴۰-۱۴۰-۱۸۰-۱۰۰	۳۰۵۰۵/۸۵	۱۵-۲۹-۳۴-۳۵-۳۷

جدول ۴- نتایج بهینه سازی تابع هدف آلودگی در حضور منابع تولید پراکنده

روش‌ها	متغیرهای کنترلی		آلودگی (تن)	کلیدهای باز شده
	خروجی منابع تولید پراکنده (کیلووات)			
اجتماع ذرات- زنبور عسل (Niknam et al., 2012)	۴۶۵-۲۸۵-۳۶-۳۹۲		۷۸۵۸/۴۴	۱۲-۱۶-۳۳-۳۵-۳۷
اجتماع ذرات- کلونی مورچه ها (Niknam et al., 2012)	۴۹۳-۵۲-۱۷۵-۴۶۶		۷۵۱۶/۸۵	۳۳-۱۲-۲۱-۳۶-۴
اجتماع ذرات	۲۰۹-۲۳۹-۴۶۹-۴۳۰		۷۵۳۵/۴۵	۳۳-۱۲-۳۶-۲۱-۳۷
جهش قورباغه	۲۸۰-۲۳۷-۴۴۱-۴۵۵		۷۴۹۶/۸۴	۳۳-۳۵-۳۶-۴-۲۱
پیشنهادی	۲۲۵-۲۲۲-۴۵۵-۴۹۱		۷۴۴۱/۶۱	۳۳-۳۵-۳۷-۱۵-۲۱

جدول ۵- نتایج بهینه سازی تابع هدف هزینه بهره‌برداری در حضور منابع تولید پراکنده و خازن‌ها

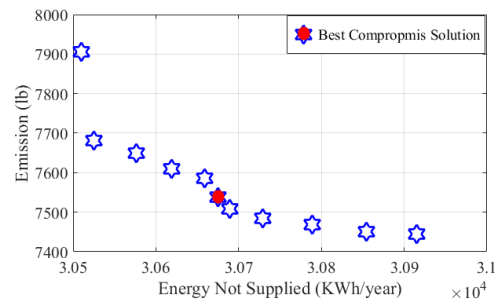
روش‌ها	متغیرهای کنترلی		هزینه بهره برداری (دلار)	کلیدهای باز شده
	خروجی منابع تولید پراکنده (کیلووات)	خروجی واحدهای خازنی (کیلووار)		
اجتماع ذرات	۱۰۰-۱۸۵-۴۸۵-۴۵۰	۱۸۰-۱۴۰-۲۰۰-۱۲۰	۱۶۱/۴۶	۷-۱۴-۳۱-۳۵-۳۷
جهش قورباغه	۱۰۰-۱۵۰-۴۸۹-۴۵۰	۲۰۰-۱۴۰-۱۸۰-۱۲۰	۱۵۹/۹۶	۷-۹-۱۴-۲۷-۳۲
پیشنهادی	۱۰۰-۱۰۰-۴۵۰-۵۰۰	۲۰۰-۱۶۰-۱۸۰-۱۴۰	۱۵۹/۵۵	۷-۹-۱۴-۲۸-۳۱

جدول ۶- بهترین جواب مصالحه به همراه متغیرهای کنترلی مربوط به مسئله چند هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع

روش‌ها	متغیرهای کنترلی		انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)	آلودگی (تن)	کلیدهای باز شده
	خروجی واحدهای خازنی (کیلووار)	خروجی منابع تولید پراکنده (کیلووات)			

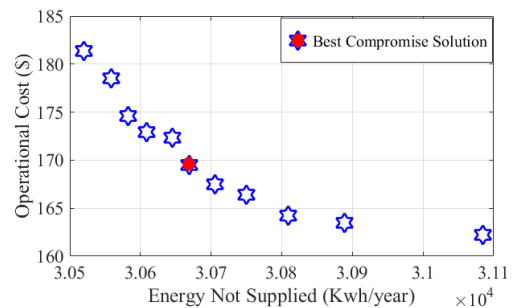
اجتماع ذرات	۱۹۸-۲۷۹-۴۸۶-۵۰۰	۱۰۰-۲۰۰-۱۶۰-۱۰۰	۱۷۰/۵۳	۳۰۷۰۹/۲۳	۷۶۴۸/۴۲	۱۳-۲۰-۲۹-۳۵-۳۷
جهش قورباغه	۲۹۵-۲۸۵-۴۸۹-۴۵۵	۱۲۰-۲۰۰-۱۶۰-۱۰۰	۱۶۹/۹۸	۳۰۶۸۸/۱۵	۷۵۹۵/۷۵	۱۳-۱۸-۲۹-۳۵-۳۷
پیشنهادی	۲۹۵-۲۹۰-۴۵۵-۴۸۵	۱۶۰-۲۰۰-۱۶۰-۱۰۰	۱۶۹/۴۵	۳۰۶۵۷/۲۵	۷۵۳۹/۵۱	۱۲-۱۵-۱۹-۳۵-۳۷

است. با توجه به شکل ۶ در بهینه سازی ۲ هدفه، مشخص است که مقدار توابع هدف انرژی توزیع نشده و آلودگی در جواب مصالحه برابر است با ۳۰۶۵۷/۵۵ کیلووات ساعت بر سال و ۷۵۳۹/۵ تن، همچنین مقدار بهینه همین توابع در جبهه پارتو ۳۰۵۱۰/۴۵ کیلووات ساعت بر سال و ۷۴۴۵/۶۶ تن می باشد، 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 مسئله بهینه سازی چند هدفه را دارد.



• سناریو ۳

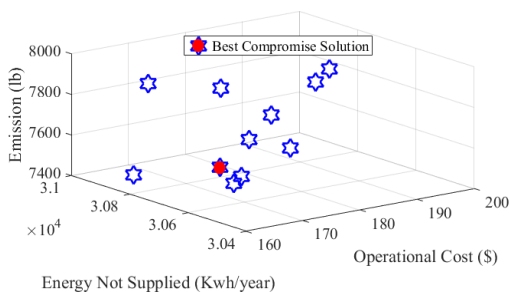
با توجه به اینکه سه تابع هدف مورد نظر در این مطالعه با هم در تضاد



شکل ۶- جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه سازی دو هدفه

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 مجموعه ای از جوابها به جای یک جواب بهینه سر و کار داریم. به همین منظور برای ارضا سه تابع هدف به صورت همزمان از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است، جبهه های بهینه پارتو بدست آمده از الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری برای مساله بهینه سازی دو و سه هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. همچنین جواب مصالحه بین توابع هدف مختلف در هر جبهه پارتو در بهینه سازی دو و سه هدفه با رنگ قرمز مشخص شده است.

شکل ۷- جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه سازی دو هدفه



شکل ۸- جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه سازی سه هدفه

در جدول ۶، نتایج بهینه سازی مساله سه هدفه تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی توسط الگوریتم های اکتشافی مورد نظر بر اساس  $(W_1=W_2=W_3=0.33)$  طبق رابطه (۲۳) بدست آمده است. با توجه به نتایج جدول ۶، واضح است که الگوریتم پیشنهادی به نتایجی بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها در حل مسئله چند هدفه رسیده است، و این نشان دهنده توانایی روش مورد نظر در مقایسه با سایر روش های به کار رفته در این مطالعه است. با توجه به جدول ۶، مقدار انرژی توزیع نشده در جواب مصالحه حدود ۷۳ درصد نسبت به مقدار این شاخص در سناریو یک کاهش یافته است.

در شکل های ۹ تا ۱۱، مقایسه ای بین مقادیر توابع هدف هزینه بهره برداری، آلودگی و انرژی توزیع نشده در بهینه سازی تک و چند هدفه ارائه شده است. با توجه به شکل ۹، مقدار بهینه هزینه بهره برداری به

به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در حل مسئله بهینه سازی چند هدفه، جبهه پارتو دو هدفه در شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته

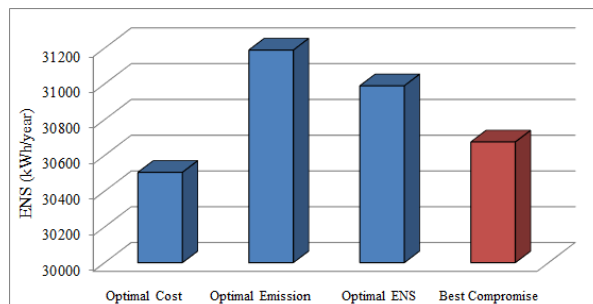
شکل ۱۲- پروفیل ولتاژ در شبکه تست ۳۳ باسه

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم قدرتمندی به نام الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و خازن ها در قالب تک و چند هدفه ارائه شده است. دلیل اصلی استفاده از الگوریتم پیشنهادی، حل مشکل همگرایی زودرس الگوریتم متداول گرگ خاکستری است که در مواقعی منجر به همگرایی به جواب های غیر بهینه می شود. توابع هدف مسئله تشکیل شده از مینیمم کردن آلودگی، انرژی توزیع نشده و همچنین هزینه بهره برداری. برای حل مسئله بهینه سازی تجدید آرایش شبکه توزیع در قالب چند هدفه، در الگوریتم پیشنهادی از مفهوم بهینگی پارتو مبتنی بر فازی استفاده شده است. سیستم تست در مقاله، شبکه ۳۳ باسه می باشد.

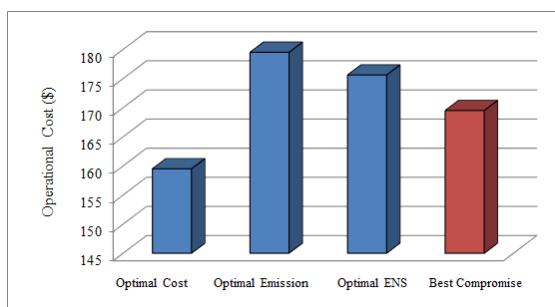
نتایج مهم این مطالعه به شرح زیر می باشد:

- طبق نتایج بدست آمده، الگوریتم بهبود یافته گرگ خاکستری در مقایسه با الگوریتم های سایر مراجع و همچنین روش های اکتشافی مورد نظر در این مطالعه نظیر اجتماع ذرات و جهش قورباغه نتایج بهتری داشته است. نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با مقایسه با نتایج سایر مراجع این ادعا را ثابت می کند که روش پیشنهادی دارای دقت و کارایی بالایی برای حل مسئله بهینه سازی تک و چندهدفه بدون در نظر گرفتن پیچیدگی های آنها می باشد.
- حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع باعث بهبود توابع مورد نظر در این مطالعه می شود. به عنوان مثال، مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از روش پیشنهادی در سناریو اول در حدود ۱۵ درصد نسبت به مقدار این شاخص قبل از تجدید آرایش شبکه توزیع کاهش یافته است.
- اثر منابع تولید پراکنده در حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع منجر به کاهش انرژی توزیع نشده در شبکه توزیع شده است، که به معنای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه توزیع می باشد. به عنوان مثال، مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از روش پیشنهادی در سناریو دوم در حدود ۷۴ درصد نسبت به مقدار این شاخص در سناریو اول کاهش یافته است.
- در نظر گرفتن هزینه بهره برداری در کنار تابع هدف آلودگی شرایطی را برای شبکه توزیع فراهم می کند که بهره برداری با هزینه معقول با توجه به خرید برق از واحدهای تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) و شرایط مناسب زیست محیطی از لحاظ آلودگی انجام بگیرد.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت در حل مسئله تجدید آرایش سیستم توزیع، اگرچه باعث دور شدن پاسخ سیستم از نقطه بهینه در حالت معین می شود، اما منجر به تصمیم صحیح برنامه ریز



ترتیب برابر است با ۱۵۹/۵، ۱۷۸/۴، و ۱۷۴/۸ دلار زمانیکه تابع هدف به ترتیب هزینه بهره برداری، آلودگی و انرژی توزیع نشده باشد. همچنین مقدار هزینه بهره برداری در بهینه سازی سه هدفه ۱۶۹/۴۵ دلار می باشد. اختلاف کم بین مقدار هزینه بهره برداری در بهینه سازی تک و چند هدفه نشان از عملکرد موثر روش پیشنهادی در حل مسئله بهینه سازی چند هدفه دارد.

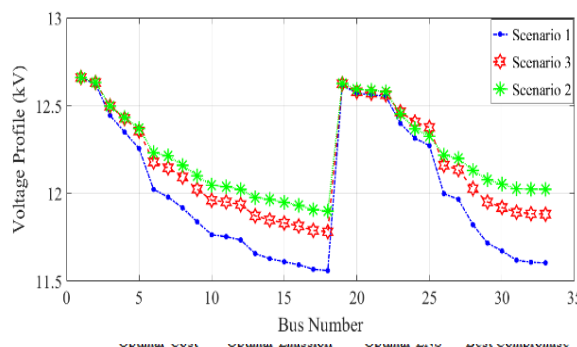
به منظور بررسی تاثیر تجدید آرایش و تولید پراکنده بر روی پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باسه، اثر تجدید آرایش در سناریو ۲ و اثر تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای خازنی در سناریو ۳ بر روی پروفیل ولتاژ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده واحدهای خازنی اثر بهتری در بهبود پروفیل ولتاژ داشته است نسبت به تجدید آرایش در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده و خازن ها در شبکه تست مورد نظر.



شکل ۹- مقایسه مقدار بهینه تابع هدف هزینه بهره برداری

شکل ۱۰- مقایسه مقدار بهینه تابع هدف آلودگی

شکل ۱۱- مقایسه مقدار بهینه تابع هدف انرژی توزیع نشده



Narimani, M. R., Azizi Vahed, A., Azizpanah-Abarghooee, R., & Javidsharifi, M. (2014). Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(1), 55-69.

Niknam, T., Farsani, E. A., Nayeripour, M., & Bahmani Firouzi, B. (2012). A new tribe modified shuffled frog leaping algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering distributed generator units. *European Transactions on Electrical Power*, 22(3), 308-333.

Parizad, A., Baghaee, H., Yazdani, A., & Gharehpetian, G. (2018). Optimal distribution systems reconfiguration for short circuit level reduction using PSO algorithm. *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2018.

Pegado, R., Naupari, Z., Molina, Y., & Castillo, C. (2019). Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO. *Electric Power Systems Research*, 169, 206-213.

Rani, D. S., Subrahmanyam, N., & Sydulu, M. (2015). Multi-objective invasive weed optimization—an application to optimal network reconfiguration in radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 932-942.

Reddy, A. S., Reddy, M. D., & Reddy, Y. K. (2018). Feeder reconfiguration of distribution systems for loss reduction and emissions reduction using MVO algorithm. *Majlesi journal of electrical engineering*, 12(2), 1-8.

Roosta, A., Eskandari, H.-R., & Khooban, M.-H. (2019). Optimization of radial unbalanced distribution networks in the presence of distribution generation units by network reconfiguration using harmony search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7095-7109.

Sedighzadeh, M., Esmaili, M., & Mahmoodi, M. (2017). Reconfiguration of distribution systems to improve reliability and reduce power losses using imperialist competitive algorithm. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 13(3), 287-302.

Shaheen, A., Elsayed, A., Ginidi, A., El-Sehiemy, R., & Elattar, E. (2022). Reconfiguration of electrical distribution network-based DG and capacitors allocations using artificial ecosystem optimizer: Practical case study. *Alexandria Engineering Journal*, 61(8), 6105-6118.

Shaheen, A. M., Elsayed, A. M., Ginidi, A. R., El-Sehiemy, R. A., & Elattar, E. (2022). A heap-based algorithm with deeper exploitative feature for optimal allocations of distributed generations with feeder reconfiguration in power distribution networks. *Knowledge-Based Systems*, 241, 108269.

Siahbalaee, J., Rezanejad, N., & Gharehpetian, G. B. (2019). Reconfiguration and DG sizing and placement using improved shuffled frog leaping algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 47(16-17), 1475-1488.

Stojanović, B., Rajić, T., & Šošić, D. (2023). Distribution network reconfiguration and reactive power compensation using a hybrid Simulated Annealing–Minimum spanning tree algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 147, 108829.

Teimourzadeh, H., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). A three-dimensional group search optimization approach for simultaneous planning of distributed generation units and distribution network reconfiguration. *Applied Soft Computing*, 88, 106012.

Viet Truong, A., Ngoc Ton, T., Thanh Nguyen, T., & Duong, T. L. (2018). Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm. *Energies*, 12(1), 106.

مستقل سیستم قدرت در فضای واقعی می شود. به عبارت دیگر یک نقطه کاری جدید برای سیستم ایجاد می کند.

## مراجع

Abdelaziz, M. (2017). Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size. *Electric Power Systems Research*, 142, 9-11.

Alonso, F., Oliveira, D. Q., & De Souza, A. Z. (2014). Artificial immune systems optimization approach for multi-objective distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on power systems*, 30(2), 840-847.

Azizivahed, A., Narimani, H., Naderi, E., Fathi, M., & Narimani, M. R. (2017). A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration. *Energy*, 138, 355-373.

Babu, M. R., Kumar, C. V., & Anitha, S. (2021). Simultaneous reconfiguration and optimal capacitor placement using adaptive whale optimization algorithm for radial distribution system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(1), 181-190.

Hussain, A. N., Shakir Al-Jubori, W. K., & Kadom, H. F. (2019). Hybrid design of optimal capacitor placement and reconfiguration for performance improvement in a radial distribution system. *Journal of Engineering*, 2019.

Kaur, M., & Ghosh, S. (2016). Network reconfiguration of unbalanced distribution networks using fuzzy-firefly algorithm. *Applied Soft Computing*, 49, 868-886.

Kumar, B., & Bohre, A. K. (2022). Optimal Planning of Renewable DG and Reconfiguration of Distribution Network Considering Multiple Objectives Using PSO Technique for Different Scenarios. *Hybrid Intelligent Approaches for Smart Energy: Practical Applications*, 83-106.

Landeros, A., Koziel, S., & Abdel-Fattah, M. F. (2019). Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(3), 589-598.

Lotfi, H. (2022). 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*, 13(10), 4739-4758.

Lotfi, H., Azizivahed, A., Shojaei, A. A., Seyedi, S., & Othman, M. F. B. (2021). Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration Along with Optimal Sizing of Capacitors and Distributed Generators Regarding Network Voltage Security. *Electric Power Components and Systems*, 1-17.

Lotfi, H., & Shojaei, A. A. (2022). A dynamic model for multi-objective feeder reconfiguration in distribution network considering demand response program. *Energy Systems*, 4 (13-14), 1130-42.

Lotfipour, A., & Afrakhte, H. (2016). A discrete Teaching–Learning-Based Optimization algorithm to solve distribution system reconfiguration in presence of distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, 264-273.

Mahboubi-Moghaddam, E., Narimani, M. R., Khooban, M. H., & Azizivahed, A. (2016). 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 & Energy Systems*, 76, 35-43.

Mohamed, A.-A. A., El-Gaafary, A. A., Mohamed, Y. S., & Hemeida, A. M. (2016). Multi-objective modified grey wolf optimizer for optimal power flow. *Eighteenth international middle east power systems conference (MEPCON)*, 2016.

Yin, L., & Sun, Z. (2022). Distributed multi-objective grey wolf optimizer for distributed multi-objective economic dispatch of multi-area interconnected power systems. *Applied Soft Computing*, 117, 108345.