Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 19-30

Vol. 11/ No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Optimal location of protection devices based on the importance of reliability in distribution networks with an improved genetic algorithm

Mohammad Ebrahim Hajiabadi[1], Associate Professor, Mahdi Samadi[2], Associate Professor, Hossein Lotfi[3], Postdoctoral Researcher, Esmail Hosseinpor[4], Director of Research Office Bojnourd Electricity Distribution Company, Alireza Sabori[5], Managing Director Bojnourd Electricity Distribution Company

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
Email: Me.hajiabadi@hsu.ac.ir

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
Email: ma.samadi@hsu.ac.ir

3- Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
Email: Hossein_lotfi95@yahoo.com

4- Bojnourd Electricity Distribution Company
Email: E.hoseinpour@nkedc.ir

5- Bojnourd Electricity Distribution Company
Email: A.saboori@nkedc.ir

Abstract: Distribution networks are always exposed to many blackouts due to their sizes. Reducing downtime, reducing energy not supplied, increasing reliability, and thus, increasing customer satisfaction are important goals of distribution companies. The performance of power systems is affected by many factors such as various faults, network maneuvers, and unwanted equipment outages. Protective switches can reduce subscribers' downtime, energy not supplied, and associated costs by isolating faulty network points. On the other hand, due to the high costs of purchasing, installing, and maintaining protective equipment such as reclosers and sectionalizers, distribution companies seek to minimize these costs. Therefore, determining the minimum number of reclosers and sectionalizer switches required for reliable protection of the network and their optimal installation location is one of the basic needs of distribution network operators. The main purpose of this study is to determine the number and optimal location of recloser and sectionalizer switches in a distribution network using an improved genetic algorithm. The proposed objective function, which has been formulated to improve four reliability indices, consists of four terms, i.e., System Average Interruption Duration Index (SAIDI), Energy Not Supplied (ENS), Average Interruption Frequency Index (MAIFI), and System Average Interruption Frequency Index (SAIFI). Also, the limitations of operation are related to the number and installation place of protective devices. Considering the radiality of the feeders studied in this study, in order to implement the mentioned limitations, first all the branches and nodes under each branch in the feeder graph should be obtained. The nodes and branches under each branch in the network graph are the nodes and branches that will become isolated from the reference bus and lose their power if the branch is removed. Therefore, a practical method based on graph theory is presented to calculate all the nodes and branches under each branch.

The genetic algorithm is a very practical algorithm that is simple and efficient in solving complex and non-convex optimization problems, but in the optimization process, some defective genes may enter the next generation and the algorithm may face local optima. Therefore, the study adopts the elitism mechanism, so genes with higher competence enter the next generation before entering the crossover and mutation process. The proposed method is tested on one of the distribution feeders in Bojnourd city called Nader and its results are compared with other evolutionary methods such as the genetic algorithm, shuffled frog leaping, and particle swarm optimization. The results reveal that the proposed method outperforms other evolutionary algorithms.

Keywords: Protective equipment, Genetic algorithm, energy not supplied, Graph, Recloser, Sectionalizer
Submit date: 2022/02/10
Accepted date: 2022/08/22

Corresponding author Name: Mohammad Ebrahim Hajiabadi
Corresponding author address: Department of Electrical and computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۳۰-۱۹

Vol. 11 / No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

مکان‌یابی بهینه ادوات حفاظتی مبتنی بر اهمیت قابلیت اطمینان در شبکه توزیع با الگوریتم بهبودیافته ژنتیک

نوع مطالعه: پژوهشی

محمد ابراهیم حاجی ابادی[۱]، دانشیار، مهدی صمدی[۲]، دانشیار، حسین لطفی[۳]، پژوهشگر پسا دکتری،
اسماعیل حسین پور[۴]، مدیر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق بجنورد ، علی رضا صبوری[۵]، مدیر عامل شرکت توزیع نیروی برق بجنورد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران
Me.hajiabadi@hsu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران
Ma.samadi@hsu.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه حکیم سبزواری- سبزوار- ایران
Hossein_lotfi95@yahoo.com
۴- شرکت توزیع نیروی برق خراسان شمالی-بجنورد-ایران
E.hoseinpour@nkedc.ir
۵- شرکت توزیع نیروی برق خراسان شمالی-بجنورد-ایران
A.saboori@nkedc.ir

چکیده: شبکه توزیع به دلیل گستردگی همواره در معرض خاموشی‌های فراوانی قرار دارد. کاهش زمان خاموشی، کاهش انرژی توزیع نشده، افزایش قابلیت اطمینان و در نتیجه رضایت مشترکین از اهداف مهم یک شرکت توزیع می‌باشد. عملکرد سیستم‌های قدرت تحت تأثیر عوامل زیادی هم‌چون خطاهای مختلف، مانور شبکه و خروج ناخواسته تجهیزات از سرویس قرار دارد. کلیدهای حفاظتی می‌توانند با جداسازی نقطه معیوب شبکه، زمان خاموشی و انرژی توزیع نشده مشترکین و هزینه‌های مرتبط با آن را کاهش دهند. از طرفی با توجه به هزینه‌های بالای خرید، نصب و تعمیر و نگهداری تجهیزات حفاظتی مانند ریکلوزر و سکشن‌لایزر، شرکت‌های توزیع به دنبال حداقل کردن این هزینه‌ها هستند. بنابراین تعیین کمترین تعداد ریکلوزر و سکشن‌لایزر لازم جهت حفاظت مطمئن از شبکه و موقعیت بهینه نصب آن‌ها از جمله نیازهای اساسی بهره‌برداران شبکه‌های توزیع می‌باشد. هدف اصلی این مطالعه، تعیین تعداد و مکان بهینه قرار گرفتن تجهیزات حفاظتی ریکلوزر و سکشن‌لایزر در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم بهبود یافته ژنتیک می باشد. روش پیشنهادی بر روی یکی از فیدرهای توزیع در شهرستان بجنورد به نام نادر تست شده و نتایج آن با سایر روش های تکاملی نظیر ژنتیک، جهش قورباغه و اجتماع ذرات مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: ادوات حفاظتی، الگوریتم ژنتیک، انرژی توزیع نشده، گراف، ریکلوزر، سکشنالایزر

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : محمد ابراهیم حاجی آبادی

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

.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

۱- مقدمه

تداوم سرویس‌دهی و تامین انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان از مهم‌ترین اهداف صنعت برق از ابتدای شکل‌گیری آن بوده است که در همین راستا تمامی کارکنان این صنعت در جهت تامین برق مطمئن و پایدار همواره کوشیده‌اند. در بیشتر شبکه‌های توزیع در حوالی شهرها و روستاها به منظور کاهش هزینه‌های مربوط به احداث، حفاظت و بهره‌برداری شبکه از خطوط هوایی شعاعی استفاده می‌شود. با توجه به موقعیت قرارگیری این خطوط در شبکه، عوامل مختلفی هم‌چون شرایط محیطی، شرایط جوی، برخورد شاخ و برگ درختان، پرندگان و ... سبب بروز خطا می‌شود. درصد قابل توجهی از خطاهای شبکه توزیع را خطاهای گذرا تشکیل می‌دهند(Jamali & Shateri, 2005) . به منظور حذف و ایزوله کردن خطاهای گذرا در شبکه توزیع از تجهیزات حفاظتی مانند ریکلوزر و سکشن‌لایزر استفاده می‌شود. برطرف شدن این نوع خطاها در شبکه توزیع منجر به کاهش انرژی الکتریکی تامین نشده مشترکین و افزایش قابلیت اطمینان شبکه خواهد شد (Guerra Sánchez & Martínez Velasco, 2018). البته باید توجه داشت که این افزایش قابلیت اطمینان با صرف هزینه‌هایی همراه خواهد بود. بنابراین در مورد تاثیر استفاده از تجهیزات حفاظتی مانند ریکلوزرها بر هزینه‌های شرکت‌های توزیع لازم است مقایسه‌ای بین هزینه‌های صورت گرفته برای تجهیز شبکه به ادوات حفاظتی و کاهش هزینه‌های ناشی از افزایش قابلیت اطمینان سیستم انجام گیرد. با توجه به هزینه‌بَر بودن کاربرد تجهیزات حفاظتی در شبکه توزیع، تعیین حداقل تعداد این تجهیزات و موقعیت قرارگیری آن‌ها مورد توجه می‌باشد. در دنیا با توجه به اهمیت بیشتر شبکه تولید توان و انتقال توان، بیشتر مطالعات قابلیت اطمینان در این حوزه ها انجام گرفته است، اما در مورد شبکه‌های توزیع که بخش زیادی از خاموشی‌ها را در بر می‌گیرد مطالعات کمتری نسبت به بخش‌های تولید و انتقال توان انجام شده است. این موضوع می‌تواند دلایل مختلفی هم‌چون گستردگی و پیچیدگی شبکه‌های توزیع و نیز مشکلات مربوط به ثبت آمار خطاها داشته باشد. در نقاط مختلف یک شبکه توزیع شعاعی می‌توان اقدام به نصب ریکلوزر و سکشن‌لایزر نمود. هر چه تعداد این تجهیزات بیشتر باشد در صورت وقوع خطا نقاط بار کمتری قطع شده و انرژی توزیع نشده کمتر خواهد شد. این امر سبب افزایش قابلیت اطمینان شبکه و نیز افزایش هزینه‌ها خواهد شد. بنابراین باید مصالحه‌ای بین هزینه سرمایه‌گذاری جهت نصب و تعمیر و نگهداری و میزان سود ناشی از افزایش قابلیت اطمینان سیستم انجام گیرد. برای این منظور باید یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شود که می‌توان تابع هدف آن را از نوع هزینه تعریف کرد، هزینه‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه انرژی توزیع نشده می‌باشد. مسئله یافتن تعداد و محل قرارگیری ریکلوزرها در شبکه‌های توزیع شعاعی بزرگ، جزو مسائل بهینه‌سازی غیرخطی محسوب می‌شود. حل این‌گونه مسائل با روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی مرسوم مشکل است. از این رو، روش‌های متنوع تکاملی نیز جهت حل مسئله بهینه‌سازی مربوط به مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها استفاده شده است.در مراجع (Teng & Lu, 2002; Teng & Liu, 2003) از روش مبتنی بر محاسبات تحلیل و الگوریتم مورچگان برای حل مسئله مکان‌یابی بهینه کلیدها استفاده کرده‌اند. مراجع (Chen et al., 2006; Carvalho et al., 2005) برای مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها به ترتیب روش‌های تجزیه دو مرحله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی ایمنی پیشنهاد شده است. مراجع (Sardou et al., 2012; Dezaki et al., 2012) نیز با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی به منظور مکان‌یابی کلیدهای حفاظتی به ترتیب از روش مبتنی بر الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه و روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. مراجع (Moradi & Firuzabad, 2007; da Silva et al., 2008) به ترتیب از الگوریتم جستجوی ممنوعه و اجتماع ذرات برای یافتن موقعیت قرارگیری بهینه تجهیزات حفاظتی اعم از سکشن‌لایزر و ریکلوزر استفاده کرده است. علاوه بر تابع هدف قابلیت اطمینان که در بیشتر مطالعات به آن پرداخته شده است، توابع هدف دیگری نظیر هزینه سرمایه گذاری نصب تجهیزات و سود شرکت توزیع در مراجع دیگر ارائه شده است. مسئله مکان‌یابی تجهیزات کنترلی و حفاظتی توسط برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی مدل شده است(Alam et al., 2016). تابع هدف پیشنهادی، مجموع هزینه‌های ثابت ناشی از جایگذاری و جایگزینی کلیدها و تجهیزات حفاظتی و هزینه قطعی‌ها می‌باشد. به منظور مکان‌یابی ریکلوزر و سکشن‌لایزر و بهبود سطح قابلیت اطمینان از روش مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بهره برده است (Bernardon et al., 2011). (Zeinalzadeh et al., 2019) یک الگوریتم اجتماع ذرات به منظور مکان‌یابی ریکلوزر و سکشن‌لایزر با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه سرمایه گذاری بهینه ارائه کرده‌اند. (Amohadi & firuzabad, 2019) از روش ترکیبی اجتماع ذرات-تحلیل سلسله مراتبی به منظور مکان‌یابی بهینه تجهیزات حفاظتی ریکلوزر و سکشن‌لایزر در شبکه توزیع شعاعی استفاده کرده است. تابع هدف مطرح شده شامل هزینه سرمایه‌گذاری کلیدها، حفاظت کلیدها و انرژی تامین نشده می‌باشد. در (Ghosh et al., 2022) ابتدا توپولوژی بهینه فیدرها بر اساس کاهش تابع تلفات شناسایی شده، سپس مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها در توپولوژی جدید فیدرها با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کارایی شبکه انجام می‌شود. یک الگوریتم ژنتیک به منظور مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها در شبکه توزیع با هدف حداکثر کردن سود توسط بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان ارائه شده است(Alam et al., 2021). برای تعیین تعداد و مکان ریکلوزرها در شبکه توزیع با هدف بهبود قابلیت اطمینان از آنالیز هزینه-فایده استفاده شده است (Dhole et al., 2021). در مرجع (Sultan et al., 2019)، تلاش شده تا با مکان‌یابی بهینه ریکلوزر در فیدرهای شبکه توزیع بر اساس کمینه کردن شاخص‌های قابلیت اطمینان نظیر دفعات قطع سیستم (SAIFI)، متوسط زمان قطعی سیستم (SAIDI) و سود شبکه توزیع حداکثر شود. در بخش دیگری از مطالعات، اثر واحدهای تولید پراکنده در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر لحاظ شده است. به منظور مکان‌یابی بهینه سوئیچ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

های اتومات در شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده، یک رویکرد چند هدفه با هدف بهبود قابلیت اطمینان ارائه شده است (Pombo et al., 2016). یک روش بهینه‌سازی دو بخشی مبتنی بر الگوریتم جستجوی تفاضلی به منظور مکان‌یابی بهینه سوئیچ حفاظتی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه بهره برداری ارائه شده است(Velasquez et al., 2016). مدلی به منظور مکان‌یابی همزمان کلیدهای حفاظتی و منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن خطاهای گذرا، جهت کمینه کردن شاخص‌های دفعات قطع سیستم (SAIFI) و متوسط زمان قطعی سیستم (SAIDI) ارائه شده است(Pregelj et al., 2006).

بررسی مطالعات بالا نشان می‌دهد که بدست آوردن گراف درخت شبکه مخصوصا در سیستم‌های بزرگ نیاز به محاسبات پیچیده و زمانبر دارد. همچنین، به منظور مسیریابی بین دو نقطه از شبکه از الگوریتم‌های جستجو مبتنی بر تکرار استفاده کرده‌اند که بسیار پیچیده و زمانبر می‌باشد. نکته دیگر اینکه بیشتر مراجع از توابع هدفی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری نصب ادوات حفاظتی و یا شاخص‌های قابلیت اطمینان، اما بیشتر تحقیقات مسئله بهینه‌سازی مورد نظر را بصورت تک هدفه بهینه‌سازی کرده بودند، و اثر بهینه‌سازی دو تابع هدف مذکور را در مطالعات خود بررسی نکرده‌اند. بر اساس بررسی نقایص مطالعات بالا، نوآوری‌های مطالعه به شرح زیر می باشد.

- ارائه یک مدل بهینه‌سازی به منظور مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها و سکشن‌لایزرها با در نظر گرفتن توابع هدفی نظیر ENS، SAIDI ، SAIFI، MAIFI و هزینه سرمایه‌گذاری جهت نصب ادوات حفاظتی مورد نظر در یک فیدر تست واقعی.
- معرفی ENS، SAIDI ، SAIFI و میانگین تعداد وقفه‌های لحظه‌ای (MAIFI) به عنوان توابع قابلیت اطمینان در این مطالعه، همچنین بکارگیری سناریوهای مختلف بر اساس تعداد و هزینه سرمایه‌گذاری ادوات حفاظتی به منظور کمینه‌سازی شاخص‌های قابلیت اطمینان.
- ارائه الگوریتم بهبودیافته ژنتیک بر مبنای مکانیزم نحبه‌گرایی جهت بهینه‌سازی مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها و سکشن‌لایزرها و همچنین ارائه راهکار ضریب وزنی به منظور نشان دادن اهمیت هر یک از توابع هدف در تابع هدف کل.
- ارائه مدل ابتکاری ریاضی بر مبنای نظریه گراف برای بدست آوردن گره و شاخه های تحت هر شاخه درخت.
- ارائه دو قید بهره‌برداری بمنظور کوتاه کردن زمان محاسبات جهت مسیریابی بین دو نقطه از شبکه توزیع.

در ادامه و در بخش دوم فرمولاسیون مسئله ارائه شده است، الگوریتم بهینه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی در بخش های سوم و چهارم شرح داده شده اند. نتیجه‌گیری نیز در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- فرمولاسیون مسئله

در این بخش توابع هدف و قیود مسئله بهینه سازی مکان‌یابی بهینه ریکلوزرها و سکشن‌لایزرها ارائه میشود.

۲-۱ تابع هدف

تابع هدف جامع که تمامی سناریوهای مطرح جهت مکان‌یابی بهینه تجهیزات حفاظتی ریکلوزر و سکشن‌لایزر را در بر بگیرد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Min\ F = W_1 \times Cost_{inv} + W_2 \times Cost_{rel} + W_3 \times MAIFI + W_4 \times SAIFI + W_5 \times SAIDI + W_6 \times ENS \quad (۱)$$

توابع هدف SAIDI، SAIFI و MAIFI در رابطه (۱) بصورت روابط زیر فرموله میشوند:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_i \times \lambda_i}{\sum_{i=0}^{n} N_i} \quad (۲)$$

$$MAIFI = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_i \times \gamma_i}{\sum_{i=0}^{n} N_i} \quad (۳)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_i \times U_i}{\sum_{i=0}^{n} N_i} \quad (۴)$$

که در این روابط، λ_i و γ_i به ترتیب معرف متوسط نرخ خروج ماندگار در سال در نقطه i و متوسط نرخ خروج گذرا در سال در نقطه i می باشند(LOTFI & GHAZI, 2020b) . U_i و N_i به ترتیب معرف مدت متوسط زمان خاموشی ماندگار در نقطه i و تعداد مشترکین متصل به نقطه i می‌باشند. در روابط بالا مقادیر برحسب هر مشترک بدست می‌آید. همچنین در رابطه (۱)، $Cost_{inv}$ و $Cost_{rel}$ به ترتیب معرف هزینه سرمایه‌گذاری جهت خرید و نصب تجهیزات حفاظتی ریکلوزر و سکشن‌لایزر و سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان شبکه (هزینه خاموشی) می‌باشند. ضرایب W_1 تا W_6 ضرایب وزنی مربوط به هر کدام از شاخص‌ها هستند. مقادیر این ضرایب وزنی با توجه به سناریوی مورد بررسی تعیین خواهد شد. در مورد هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات حفاظتی باید به این نکته توجه نمود که این هزینه مربوط به یک طول عمر چند ساله (مثلا ۳۰ ساله) است. در حالیکه سایر هزینه‌ها به صورت سالانه محاسبه می‌شوند. بنابراین برای اینکه بتوان آن را با هزینه خاموشی سالانه جمع نمود، باید آن را از فرم ارزش فعلی به فرم سالانه تبدیل کرد. جهت این تبدیل از رابطه (۵) استفاده شده و ارزش فعلی به ارزش یکنواخت سالانه تبدیل می‌شود.

$$\left(A/P, i, n\right) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۵)$$

در این رابطه، n طول عمر تجهیز و i نرخ بهره سالانه می‌باشد. طول عمر تجهیزات و نرخ بهره سالانه در این مطالعه به ترتیب برابر با ۲۰ سال و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. هزینه سرمایه‌گذاری از دو ترم تشکیل شده که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Cost_{inv} = N_{recloser}.Cost_{inv}\left(A/P, i, T_{life_rec}\right) + N_{sectionlizer}.Cost_{sectionlizer}\left(A/P, i, T_{life_sec}\right) \quad (۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

هزینه‌های مربوط به تجهیز شبکه به هر عدد ریکلوزر و سکشن‌لایزر به ترتیب در ترم اول و دوم رابطه بالا نشان داده شده است. توجه شود که در این مطالعه، قیمت هر عدد ریکلوزر و سکشن‌لایزر به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۱۱۰ میلیون تومان در نظر گرفته شده است. هزینه ناشی از عدم قابلیت اطمینان شبکه معادل هزینه خاموشی شبکه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Cost_{rel} = ENS \times VOLL \quad (۷)$$

که در آن (VOLL) ارزش بار از دست رفته برحسب تومان بر کیلووات ساعت است. به طور معمول در منابع علمی مقدار VOLL حدود ۱۵۰ تا ۴۰۰ برابر قیمت فروش برق در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲ اعمال قیود بهره‌برداری از ریکلوزرها و سکشن‌لایزرها

با توجه به این‌که در بهره‌برداری از شبکه توزیع دستورالعمل‌هایی جهت نصب تجهیزات حفاظتی ریکلوزر و سکشن‌لایزر وجود دارد، می‌بایست این دستورالعمل‌ها را در مکان‌یابی بهینه تجهیزات مذکور لحاظ نمود. دو مورد از مهم‌ترین دستورالعمل‌های موجود (گروه مولفین،۱۳۹۰; کامیاب، ۱۳۸۵) عبارتند از:

- فاصله بین هر دو ریکلوزر در یک فیدر نباید از ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر کمتر باشد.
- هر ریکلوزر در نهایت می‌تواند با سه سکشن‌لایزر به صورت سری در فیدر هماهنگ شود، به عبارت دیگر تعداد سکشن‌لایزرهای تحت هر ریکلوزر نباید از سه عدد بیشتر باشد.

با توجه به شعاعی بودن فیدرهای مورد مطالعه در این مطالعه، جهت پیاده‌سازی دستورالعمل‌های مذکور ابتدا باید تمامی شاخه‌ها و گره‌های تحت هر شاخه در گراف فیدر بدست آید. منظور از گره‌ها و شاخه‌های تحت هر شاخه در گراف شبکه، گره‌ها و شاخه‌هایی هستند که در صورت حذف شاخه مذکور، نسبت به باس مرجع جزیره شده و تغذیه خود را از دست خواهند داد. بنابراین ابتدا روشی ارائه می‌گردد که به کمک آن بتوان کلیه گره‌ها و شاخه‌های تحت هر شاخه را محاسبه نمود.

- **محاسبه گره‌ها و شاخه‌های تحت هر شاخه**

در این روش ابتدا به کمک ماتریس اتصالات گراف شبکه (Net)، ماتریس تلاقی گره و شاخه (M) محاسبه می‌شود. دقت شود که ستون اول ماتریس Net شماره شاخه و ستون‌های دوم و سوم مربوط به گره‌های متصل به شاخه مربوطه هستند.

for k=1: Number of lines

$$M(Net(k,2),k) = 1 \quad (۸)$$
$$M(Net(k,3),k) = 1$$

با استفاده از ماتریس تلاقی گره و شاخه، ماتریس تلاقی گره و گره شبکه (N) محاسبه می‌شود.

$$N = sign(M^T \times M) \quad (۹)$$

چنان‌چه ماتریس تلاقی گره و گره به توان تعداد کل گره‌های شبکه رسیده و تحت تابع Sign قرار گیرد، ماتریسی حاصل می‌شود که به کمک آن به راحتی می‌توان جزیره بودن دو گره در شبکه نسبت به یکدیگر را بررسی نمود. بنابراین ابتدا ماتریس تلاقی گره و گره (N) به توان تعداد گره‌های شبکه (n) رسیده و تابع علامت روی حاصل آن اعمال می‌گردد.

$$NN = sign(N\hat{}n) \quad (۱۰)$$

در ماتریس بالا، یک بودن درایه‌های مربوط به یک ستون خاص (متناظر با یک گره خاص) نشان می‌دهد که شاخه متناظر با آن سطرها تحت گره مورد نظر هستند.

در نتیجه در ماتریس حاصل یعنی ماتریس NN و در سطر مربوط به گره مرجع (Sup)، هر درایه‌ای که برابر با یک باشد، گره متناظر با ستون مربوط به آن درایه توسط باس مرجع تغذیه و گره متناظر با ستون مربوط به درایه‌های برابر با صفر نسبت به باس مرجع جزیره هستند.

$$NN(Sup,:) == 1 \quad (۱۱)$$

همان‌گونه که می‌دانید در درحالت نرمال در یک شبکه توزیع شعاعی کلیه گره‌ها و شاخه‌ها، با واسطه یا بدون واسطه به باس مرجع متصل هستند، به عبارت دیگر هیچ گره یا شاخه جزیره با باس مرجع وجود ندارد. از همین اصل جهت بدست آوردن کلیه گره‌ها و شاخه‌های تحت هر شاخه استفاده می‌شود. بدین ترتیب که جهت بدست آوردن کلیه شاخه‌های تحت هر شاخه، کافی است شاخه مورد نظر از شبکه حذف و با گراف جدید ماتریس‌های تلاقی گره و شاخه و گره و گره محاسبه شود. فرض می‌شود که هدف، تعیین کلیه گره‌ها و شاخه‌های تحت یک شاخه خاص باشد. ابتدا این شاخه از گراف شبکه اولیه حذف و ماتریس NN برای شبکه جدید محاسبه می‌شود. حال هر گره ای که با باس مرجع جزیره باشد، جزو گره‌های تحت شاخه مورد بحث محسوب می‌شود.

$$NN(Sup,:) == 0 \quad (۱۲)$$

به همین ترتیب شاخه‌های تحت هر شاخه نیز تعیین می‌گردد.

- **حداقل فاصله ریکلوزرها**

ابتدا به مطالعه دستورالعمل مربوط به حداقل فاصله بین هر دو ریکلوزر پرداخته می‌شود. این محدودیت فاصله به علت هماهنگی حفاظتی مناسب بین ریکلوزرها اعمال می‌شود. به طور معمول جهت محاسبه فاصله بین دو نقطه از شبکه، از مسیریابی به کمک تئوری‌های گراف موجود استفاده می‌شود که همگی این تئوری‌ها بر مبنای الگوریتم جستجو کار می‌کنند، بنابراین مدت زمان اجرای برنامه طولانی خواهد بود. با توجه به این‌که جهت حل مسئله از الگوریتم بهبودیافته ژنتیک استفاده شده و خود الگوریتم بهبودیافته ژنتیک بسته به تعداد جمعیت اولیه و تعداد تکرارها زمان‌بر است، بنابراین بهره‌گیری از الگوریتم جستجو جهت مسیریابی منجر به طولانی شدن مدت زمان اجرای برنامه خواهد شد. با توجه به مشکلات مذکور در این مطالعه، روش جدیدی ارائه می‌گردد که به کمک آن می‌توان در کمترین زمان ممکن، مسیریابی در شبکه را انجام و در نتیجه فاصله بین هر دو نقطه دلخواه از یک شبکه شعاعی را محاسبه نمود.

ابتدا فرض می‌شود گراف شبکه مورد مطالعه در دسترس بوده و شبکه دارای n شاخه باشد. با توجه به گراف موجود، برای هر یک از خطوط

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

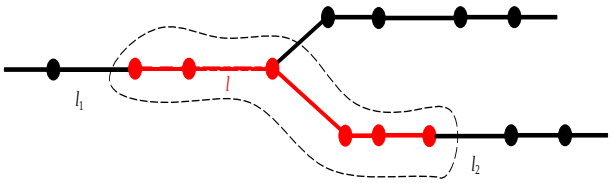
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

شبکه، کلیه خطوط تحت آن خط تعیین و در یک ماتریس مانند ماتریس L مشخص می‌گردد. بنابراین ماتریس L یک ماتریس مربعی خواهد بود که به تعداد شاخه‌های گراف، سطر و ستون دارد.

$$L=\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix}_{n\times n} \quad (۱۳)$$

در ماتریس L چنان‌چه شاخه شماره j تحت شاخه شماره i قرار داشته باشد، درایه مربوط به سطر i و ستون j یک می‌شود. درایه مربوط به سایر شاخه‌هایی که تحت شاخه i نیستند صفر خواهد بود.

در حالت کلی مطابق شکل زیر جهت تعیین فاصله بین هر دو خط دلخواه l_1 و l_2، می‌بایست خطوط بین آن‌ها تعیین گردد. جهت تعیین این خطوط (lها) ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱. خطوط مستقیم مابین هر دو خط دلخواه

این خطوط دو ویژگی مهم دارند که عبارتند از:

- کلیه این خطوط تحت خط l_1 قرار می‌گیرند. در نتیجه در ماتریس L، درایه مربوط به سطر l_1 و ستون l یک خواهد شد.

$$\text{in matrix } L:\quad L(l_1,l)=1 \quad (۱۴)$$

- خط l_2 تحت این خطوط قرار می‌گیرد. در نتیجه در ماتریس L، درایه مربوط به سطر l و ستون l_2 یک خواهد شد.

$$\text{in matrix } L:\quad L(l,l_2)=1 \quad (۱۵)$$

این دو شرط را می‌توان به زبان ریاضی و به صورت زیر بیان نمود:

$$L_{\text{Route}_{l_1,l_2}}=\{\forall l|(l\in L_{l_1})\&\,(l_2\in L_l)\} \quad (۱۶)$$

که در آن منظور از L_{l_1} و L_l به ترتیب کلیه خطوط تحت خط l_1 و خط l بوده و $L_{\text{Route}_{l_1,l_2}}$ نیز کلیه خطوط مستقیم مابین دو خط l_1 و l_2 را بیان می‌کند.

جهت تحقق همزمان این دو شرط کافی است این دو درایه را در هم ضرب کرد:

$$L(l_1,l)\times L(l,l_2)=\begin{cases}0\times 0=0\\ 0\times 1=0\\ 1\times 0=0\\ 1\times 1=1\end{cases} \quad (۱۷)$$

این عبارت چهار حالت مختلف خواهد داشت:

- در حالت اول خط l تحت خط l_1 نبوده و l_2 نیز تحت خط l نیست.
- در حالت دوم با وجود آن‌که خط l_2 تحت خط l بوده اما خط l تحت خط l_1 نیست.
- در حالت سوم با وجود آن‌که خط l تحت خط l_1 بوده اما خط l_2 تحت خط l نیست.
- در حالت چهارم خط l تحت خط l_1 بوده و هم‌زمان خط l_2 نیز تحت خط l می‌باشد که حالت مطلوب محسوب می‌شود.

بنابراین در ماتریس L به کمک سطر مربوط به l_1 و ستون مربوط به l_2 می‌توان کلیه خطوط مستقیم بین دو خط l_1 و l_2 را تعیین نمود. لذا مجموع طول این خطوط، فاصله بین دو خط l_1 و l_2 را نتیجه خواهد داد.

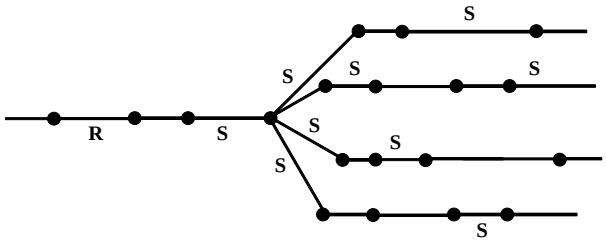
بنابراین در حالت کلی

$$L_{\text{Route}_{l_1,l_2}}=L(l_1,:)\ \odot\ L^t(:,l_2) \quad (۱۸)$$

- **حداکثر سکشن‌لایزرهای تحت هر ریکلوزر**

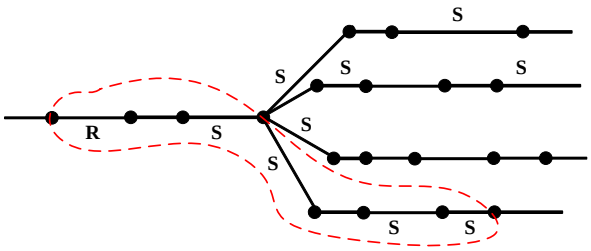
حال به مطالعه دستورالعمل مربوط به حداکثر سکشن‌لایزرهای تحت هر ریکلوزر پرداخته می‌شود. در ابتدا باید ریکلوزرهای تحت هر ریکلوزر تعیین شود که با توجه به بدست آوردن کلیه شاخه‌های تحت هر شاخه در بخش‌های قبلی، ریکلوزرهای تحت هر ریکلوزر مشخص می‌شوند.

حال برای هر ریکلوزر خاص، خطوطِ تحتِ ریکلوزرهای تحت آن ریکلوزر خاص از بین کلیه خطوط تحت آن حذف می‌شود. در نتیجه خطوط حفاظتی خاصّ هر ریکلوزر مشخص می‌گردد. در نهایت با توجه به مشخص بودن موقعیت قرارگیری سکشن‌لایزرها، سکشن‌لایزرهای تحت هر ریکلوزر تعیین می‌شود. اما نکته‌ای که باید به آن توجه داشت نحوه قرارگیری این سکشن‌لایزرها نسبت به یکدیگر در شبکه است.



شکل ۲. برقراری شرط حداکثر سکشن‌لایزرهای تحت یک ریکلوزر

به طور مثال چندین سکشن‌لایزر می‌توانند تحت یک ریکلوزر قرار داشته باشند ولی با این شرط که از میان کلیه این سکشن‌لایزرها، حداکثر سه سکشن‌لایزر به صورت سری با هم قرار گرفته باشند. در شکل ۳ تعداد ۹ سکشن‌لایزر تحت ریکلوزر قرار گرفته‌اند ولی هیچ‌گونه مشکلی پیش نخواهد آمد، چرا که حداکثر تعداد سکشن‌لایزر تحت ریکلوزر که به صورت سری با هم قرارگرفته‌اند برابر با ۳ می‌باشد. اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود این قید در شکل ۳ رعایت نشده است.



شکل ۳. نقض شرط حداکثر سکشن‌لایزرهای تحت یک ریکلوزر

جهت بررسی نحوه قرارگیری سکشن‌لایزرهای تحت هر ریکلوزر نسبت به یکدیگر کافی است با الگو گرفتن از بخش قبلی، خطوط مستقیم بین هر سکشن‌لایزر با ریکلوزر تعیین و این خطوط با موقعیت قرارگیری دیگر سکشن‌لایزرها مقایسه شود. بنابراین تعداد سکشن‌لایزرهای سری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

تحت هر ریکلوزر تعیین شده و چنان‌چه این تعداد بیشتر از ۳ باشد، در الگوریتم پیشنهادی ژنتیک جریمه‌ای اعمال خواهد شد.

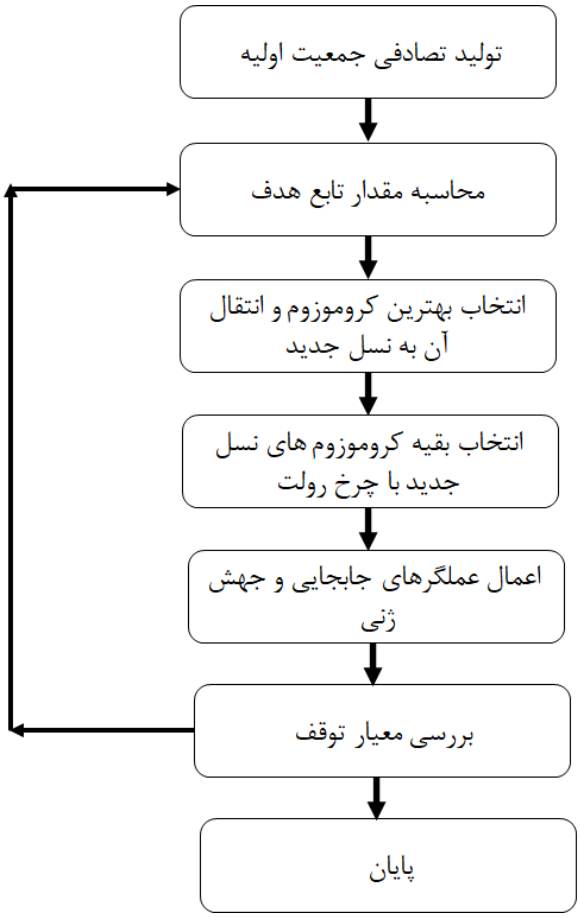
۳- الگوریتم بهبود یافته ژنتیک

الگوریتم ژنتیک رویکرد جستجوی تصادفی هستند که بر پایه مکانیسم ژنتیک و انتخاب طبیعی بنا شده اند. شکل معمول الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط گلدبرگ ارایه شد(Harik et al., 1999). الگوریتم ژنتیک از مجموعه ای از راه حل های تصادفی اولیه به نام (جمعیت) آغاز می شوند .هر جزء از جمعیت (کروموزوم) نامیده می شود که بیانگر یک پاسخ مسأله است. کروموزوم ها در تکرارهای موفق که (نسل) نامیده می‌شوند متحول می گردند. در هر نسل کروموزوم‌ها با محاسبه تابع برازش ارزیابی می شوند. برای ایجاد نسل بعد، کروموزوم‌های جدید که (فرزندان) نامیده می شوند به وسیله یکی از دو عملگر جابجایی و جهش ژنی ایجاد می‌شوند. نسل جدید نیز از روی انتخاب بر اساس مقدار تابع برازش والدین و فرزندان و یا حذف دیگران برای ثابت نگهداشتن جمعیت شکل می‌گیرد. بعد از چندین نسل الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم هدایت می شود که در بهترین حالت ارایه دهنده پاسخی شبه بهینه از مسأله است .به طور معمول انتخاب اولیه به صورت تصادفی انجام می‌شود. در نمونه گیری تصادفی تعداد واقعی کروموزوم‌های مورد تکثیر بر اساس احتمال زنده ماندن آن کروموزوم تعیین می‌شود. شناخته شده ترین این دسته روش‌ها (انتخاب نسبی هلند) یا (انتخاب برپایه چرخ رولت) است که احتمال زنده ماندن برای هر کروموزوم بر اساس مقدار تابع برازش آن تعیین می شود. برای کروموزوم k با تابع برازش f_k اجتمال انتخاب P_k به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$P_k = \frac{f_k}{\sum f_i} \qquad (۱۹)$$

جا به جایی مهمترین عملگر ژنتیک است که برای ترکیب دو کروموزوم از والدین و ایجاد فرزندان جدید انجام می‌شود. روش‌های جا به جایی برش یک نقطه‌ای، برش دو نقطه‌ای، برش چند نقطه‌ای و جا به جایی یکنواخت، از انواع متداول جابجایی است(Harik et al., 1999). در این عملگر آهنگ جا به جایی(P_c) به صورت نسبتی از تعداد فرزندان تولید شده از هر نسل به مقدار نسل حاضر تعریف می‌شود. جهش ژنی نیز عملگر دیگری است که می تواند تغییرهایی در یک یا چند ژن از یک کروموزوم به وجود آورد. در الگوریتم ژنتیک، جهش ژنی نقش حساسی را به یکی از دو شکل جا به جایی ژن‌های گمشده نسل در طول فرایند انتخاب به شکل یک کروموزوم جدید و یا داخل کردن ژنهایی که در نسل حاضر موجود نیستند به نسل جدید، ایفا می‌نماید. آهنگ جهش (P_m) به صورت درصدی از مجموعه ژن‌های هر نسل بیان می شود.

الگوریتم ژنتیک بسیار الگوریتم کاربردی و با کارایی ساده در حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده و غیر محدب می‌باشد، اما در پروسه بهینه سازی ممکن است بعضی از ژن‌های معیوب وارد نسل بعد شوند و الگوریتم را با بهینه‌های محلی مواجه کند. از این رو، در این مطالعه از مکانیزم نخبه‌گرایی استفاده شده است تا ژنهایی با شایستگی بالاتر قبل از ورود به پروسه برش و جهش وارد نسل بعد شوند. در این مکانیزم، پس از تولید تصادفی کروموزوم ها با در نظر گرفتن قیود مساله و به تعداد جمعیت پاسخ،کروموزوم ها بر اساس مقدار برازندگی مرتب شده و بهترین آنها به طور مستقیم به نسل بعد انتقال می یابد. سپس با استفاده از انتخاب چرخ رولت کروموزوم‌ها برای تکمیل نسل دوم از مجموعه جواب نسل قبل انتخاب می‌شوند. بعد از این مرحله عملگر جا به جایی وارد عمل شده و بر اساس احتمال مورد نظر (C_p) بر روی جفت کروموزوم‌های نسل جدید اعمال می شود، سپس عملگر جهش ژنی در مرحله بعد و بر اساس احتمال مورد نظر (M_p) روی ژن‌های مطالعاتی کروموزوم های نسل جدید اعمال خواهد شد. با پایان اعمال عملگرهای ژنتیکی، مجموعه ی پاسخ جدید بر اساس برازندگی مرتب شده و بهترین پاسخ گزارش می شود. فرایند بالا تا جایی ادامه می‌یابد که معیار توقف برنامه که در این حالت رسیدن به تعداد تکرار های ویژه است ارضاء شود. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ شان داده شده است.



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۴- نتایج شبیه سازی

در ابتدا روش پیشنهادی بر روی یک شبکه تست ۳۷ باسه (Lotfi et al., 2016) پیاده سازی می‌شود. سپس، روش مورد نظر بر روی یک فیدر واقعی به نام نادر تست می‌گردد.

۴-۱ شبکه ۳۷ باسه

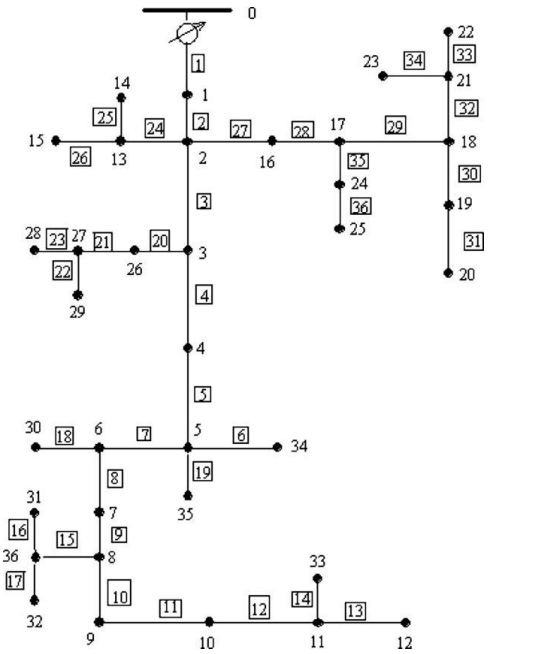
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

شکل ۵ نمودار تک خطی سیستم توزیع ۳۷ شینه را نشان می‌دهد. دو سناریو بر اساس تعداد ریکلوزرهای نصب شده در شبکه اجرا شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج الگوریتم های اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است. هر سه الگوریتم بهینه سازی بهبودیافته ژنتیک، اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای حل مسئله بهینه سازی در این مطالعه استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم‌های مورد نظر در جدول یک ارائه شده است. از نرم افزار متلب به منظور شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در این مطالعه استفاده شده است. جزئیات بیشتر راجع به الگوریتم های اجتماع ذرات و جهش قورباغه نظیر معرفی الگوریتم و ساختار بهینه سازی از مطالعات (Lotfi & Ghazi, 2020a; Lotfi, 2020) قابل برداشت است.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم‌های بهینه سازی مورد نظر

پارامترها	بهبودیافته ژنتیک	جهش قورباغه	اجتماع ذرات
جمعیت اولیه	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
ماکزیمم تکرار (تعداد نسل)	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
تعداد گروه	-	۱۰	-
r_1, r_2	[۰-۱]	[۰-۱]	[۰-۱]
C_1, C_2	-	-	[۱-۲]
P_c	[۰/۴-۰/۸]	-	-
P_m	[۰/۰۱-۰/۱]	-	-



شکل ۵. شبکه تست ۳۷ باسه

سناریو اول:

در سناریوی اول، مکان بهینه یک ریکلوزر توسط الگوریتم های مورد نظر در این مطالعه تعیین می شود .جدول ۲ مقادیر بهینه شاخص های قابلیت اطمینان و تابع هدف و همچنین مکان بهینه ریکلوزر را نشان می دهد. مقدار SAIFI، SAIDI و MAIFI قبل از نصب تجهیزات حفاظتی به‌ترتیب برابر است با ۱۴۵/۸۳، ۱۴۰/۰۴۳ و ۳۲/۰۹۳.

جدول۲. نتایج مکانیابی یک ریکلوز در شبکه تست

محل نصب	MAIFI	SAIDI	SAIFI	روش بهینه سازی
۱۵	۱۱/۱۵	۳۹/۸۳	۳۹/۱۹	اجتماع ذرات
۲۷	۸/۶۷	۳۷/۴۵	۳۵/۱۶	جهش قورباغه
۲۲	۶/۳۵	۳۰/۳۵	۲۹/۱۰	بهبود یافته ژنتیک

با توجه به جدول ۲، مقادیر SAIDI، SAIFI و MAIFI حاصل از الگوریتم بهبود یافته ژنتیک به ترتیب ۱۷/۲۳ درصد، ۱۹/۹۱ درصد و ۲۰/۱۱ درصد کمتر از مقادیر مربوط به الگوریتم جهش قورباغه است.

سناریو دوم:

در سناریوی دوم، نتایج بهینه سازی مکان‌یابی بهینه دو ریکلوزر توسط الگوریتم های مورد نظر در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳، مکان بهینه نصب ریکلوزرها در ۳ روش متفاوت است. مقدار SAIDI، SAIFI و MAIFI حاصل از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۲۹.۹۱ درصد، ۳۰.۱۱ درصد و ۲۸.۹۲ درصد کمتر از مقدار بدست آمده برای توابع هدف مذکور می‌باشد.

جدول۳. نتایج مکانیابی دو ریکلوز در شبکه تست

محل نصب	MAIFI	SAIDI	SAIFI	روش بهینه سازی
۳و۱۵	۱۰/۹۵	۳۸/۲۵	۳۰/۳۵	اجتماع ذرات
۲و۲۷	۸/۴۱	۳۶/۱۹	۲۷/۶۳	جهش قورباغه
۲و۲۲	۵/۸۵	۲۵/۶۵	۱۹/۸۳	بهبود یافته ژنتیک

بررسی نتایج بالا نشان میدهد که روش پیشنهادی در شبکه تست ۳۷ باسه به نتایج خوبی رسیده است. همچنین کارایی روش پیشنهادی در مقابسه با دو الگوریتم اجتماع ذرات و جهش قورباغه ثابت می‌شود.

۴-۲ فیدر نادر

به صورت مختصر به بررسی اطلاعات فیدر نادر پرداخته می‌شود. این فیدر دارای ۵۲۲ گره و ۵۲۱ شاخه است، تعداد ترانسفورماتورهای توزیع آن ۴۲ و مجموع بار مصرفی پیک آن برابر با ۴۱۶۵ کیلووات می‌باشد. این فیدر در مجموع یک ریکلوزر در خروجی پست فوق توزیع، یک بریکر، ۴۶ کات‌اوت فیوز و ۱۹ دیسکانکتور دارد. در مجموع دارای ۱۴۵ جامپر، ۲۴۱ خط هوایی توزیع و ۱۱ کابل زمینی است. این فیدر در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به اطلاعات حوادث ثبت شده در شرکت توزیع و تحلیل و بررسی این اطلاعات، متوسط نرخ خطای ماندگار خطوط ۰/۵۵۵ خطا بر کیلومتر بر سال و متوسط زمان تعمیرات ۰/۶۷۹ ساعت محاسبه شده است. ضمن اینکه متوسط نرخ خطای گذرای خطوط ۱/۱۷۶ می‌باشد. در مورد

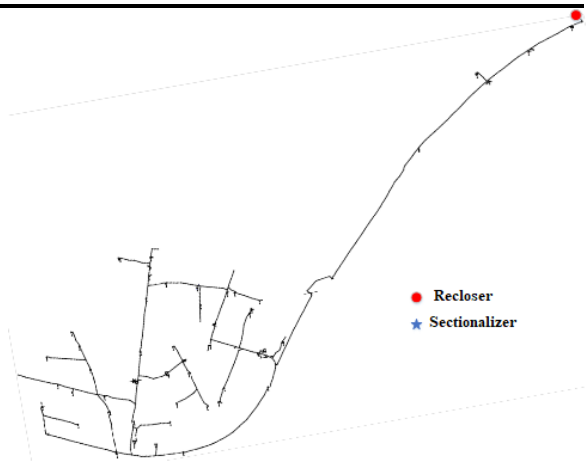
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

خطاهای مربوط به ترانسفورماتورها نیز متوسط نرخ خطای ماندگار و متوسط زمان تعمیرات به ترتیب ۰/۸۴۸ خطا بر سال و ۰/۷۳۱ ساعت محاسبه شده است. با توجه به اطلاعات مذکور شرایط فعلی شبکه از نظر شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی شده تا در ادامه و در خلال سناریوهای مختلف بتوان مقایسه‌ای بین شرایط جدید و اولیه انجام داد. مقادیر مربوط به انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان فیدر نادر در شرایط بهره‌برداری فعلی در جدول چهار مشخص شده است. با توجه به اینکه فیدر مورد نظر یک فیدر شهری است، نصب ریکلوزر در آن ممنوع بوده و تنها امکان نصب سکشن‌لایزر وجود دارد.

جدول ۴ .شاخص‌های قابلیت اطمینان فیدر نادر (شرایط بهره‌برداری فعلی)

نوع شاخص	SAIFI	SAIDI	MAIFI	ENS (kWh/year)
مقدار	۵/۷۹	۳/۶۹	۱۲/۸۸	۱۵۸۸۶



شکل۶ .فیدر نادر (شرایط حال حاضر)

- **سناریوی اول: تعداد تجهیزات حفاظتی معلوم**

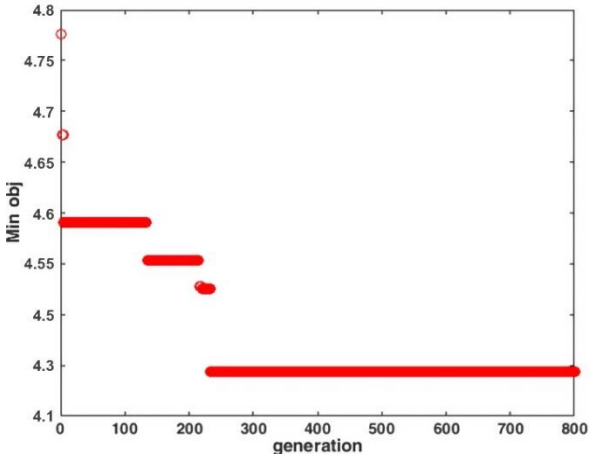
در این سناریو تعداد مشخصی ریکلوزر و سکشن‌لایزر موجود بوده و هدف تعیین مکان بهینه جهت نصب آن‌ها در شبکه است. در این سناریو می‌توان از توابع هدف مختلفی استفاده کرد. بنابراین لازم است در ابتدا شاخص مورد نظر بهره‌بردار جهت بهبود وضعیت تعیین و سپس با توجه به آن، اقدام به تعریف تابع هدف نمود. بنابراین اگر هدف بهره‌بردار، نصب تعداد محدودی ریکلوزر و سشکن‌لایزر بر مبنای بهترین شاخص‌های قابلیت اطمینان SAIFI، SAIDI، MAIFI و ENS باشد کافی است در رابطه اصلی ضرایب وزنی W_1 و W_2 صفر شود. بنابراین تابع هدف مسئله در حالت کلی عبارتست از:

$$Min\ F = W_3 \times MAIFI + W_4 \times SAIFI + W_5 \times SAIDI + W_6 \times ENS \quad (۲۰)$$

حال چنان‌چه هدف نصب تعداد محدودی ریکلوزر و سشکن‌لایزر بر مبنای بهترین شاخص SAIFI باشد، کافی است در رابطه بالا تمامی ضرایب وزنی بجز W_4 صفر شود. بنابراین تابع هدف مسئله جدید عبارتست از:

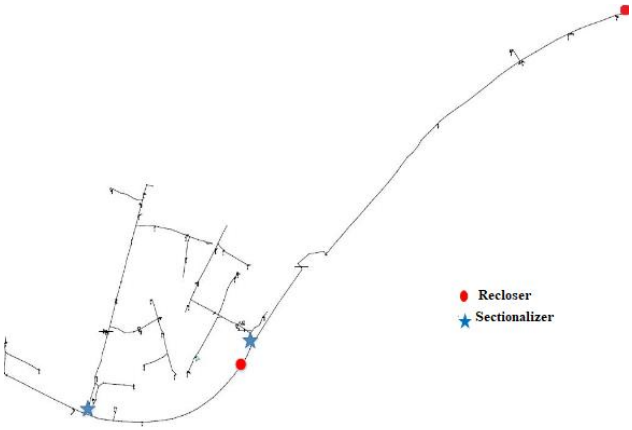
$$Min\ F = W_4 \times SAIFI \quad (۲۱)$$

با توجه به بهینه‌سازی تابع هدف SAIFI، روش بهینه‌سازی تعداد بهینه ریکلوزر و سکشن‌لایزر را یک و دو عدد بدست آورده است و محل آنها را نیز مشخص کرده، روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای تابع SAIFI به صورت شکل ۷ خواهد بود.



شکل ۷. روند همگرایی الگوریتم بهبود یافته ژنتیک جهت تعیین مکان بهینه ۱ ریکلوزر و ۲ سکشن‌لایزر

بدین ترتیب جهت بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه می‌بایست ریکلوزر را در شاخه شماره ۱۵۳ و دو سکشن‌لایزر را در شاخه‌های ۸۰ و ۱۴۷ قرار داد. محل قرارگیری این تجهیزات روی فیدر نادر در شکل ۸ مشخص شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین شاخص‌های قابلیت اطمینان پیش و پس از تجهیزات جدید در جدول ۵ انجام گرفته است: همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با تجهیز شبکه به ریکلوزر و سکشن‌لایزر جدید، شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه بهبود قابل توجهی داشته است. به طور مثال، شاخص خطاهای گذرا حدود ۲۲ درصد کاهش یافته است. با توجه به جدول۵، بیشترین و کمترین بهبود حاصل بعد از نصب اداوات حفاظتی به ترتیب مربوط به توابع SAIF و MAIFI با ۲۷ و ۲۱/۷ درصد می‌باشد.



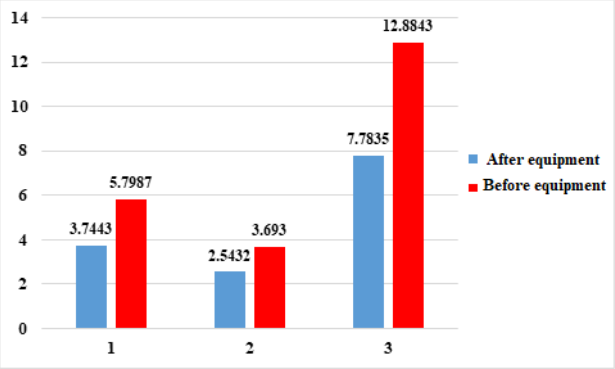
شکل ۸.موقعیت بهینه یک ریکلوزر و دو سکشن‌لایزر در سناریوی اول

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

جدول۵. مقایسه بین شاخص های قابلیت اطمینان قبل و بعد از تجهیز

نوع شاخص	پیش از تجهیز فیدر	پس از تجهیز فیدر	میزان بهبود (برحسب درصد)
SAIFI	۵/۷۹	۴/۲۳	۲۷
SAIDI	۳/۶۹	۲/۸۴	۲۳
MAIFI	۱۲/۸۸	۱۰/۰۸	۲۱/۷
ENS	۱۵۸۸۶	۱۲۱۶۸	۲۳/۴



شکل ۹.مقایسه شاخص‌های قابلیت اطمینان پیش و پس از تجهیز شبکه به یک ریکلوزر و دو سکشن‌لایزر 1-SAIFI 2-SAIDI 3-MAIFI

- **سناریوی دوم: بودجه معلوم**

در این سناریو بودجه مشخصی جهت تجهیز شبکه تصویب شده و هدف تعیین تعداد تجهیزات، نوع و مکان بهینه جهت نصب در شبکه است. بنابراین در این سناریو نیز شاخص‌های قابلیت اطمینان تابع هدف را تشکیل خواهند داد.

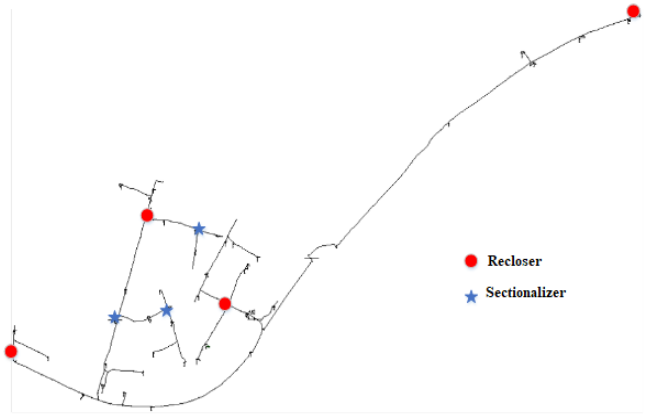
$$Min\ F = W_3 \times MAIFI + W_4 \times SAIFI + W_5 \times SAIDI + W_6 \times ENS \quad (۲۲)$$

در این تابع هدف، ضرایب وزنی با توجه به شاخص مورد نظر بهره‌بردار شبکه تعیین می‌شوند. برای مثال چنان‌چه هدف بهره‌بردار تنها کاهش زمان خاموشی و انرژی تامین نشده باشد، ضرایب وزنی W_3 و W_4 صفر می‌شوند. اگر بودجه اختصاص‌یافته برای تجهیز شبکه یک میلیارد تومان در نظر گرفته شود، با این شرط که قیمت هر عدد ریکلوزر و سکشن‌لایزر به ترتیب ۲۰۰ و ۱۱۰ میلیون تومان باشد، نتایج حاصل از اجرای برنامه نشان می‌دهد که با بودجه مذکور جهت نیل به بهترین شاخص‌های قابلیت اطمینان، نیاز به خرید ۳ ریکلوزر و ۳ سکشن‌لایزر وجود دارد که محل نصب آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی در سناریو دوم

تجهیز	تعداد	از گره	به گره
ریکلوزر	۳	۱۶	۵۳۵
		۵۱۰	۳۹۵
		۲۴۱	۲۴۰
		۴۳۷	۳۱۹
سکشن‌لایزر	۳	۱۸۹	۱۲۸
		۲۳۰	۲۸۸

محل قرارگیری این تجهیزات روی فیدر نادر در شکل ۱۰ مشخص شده است.



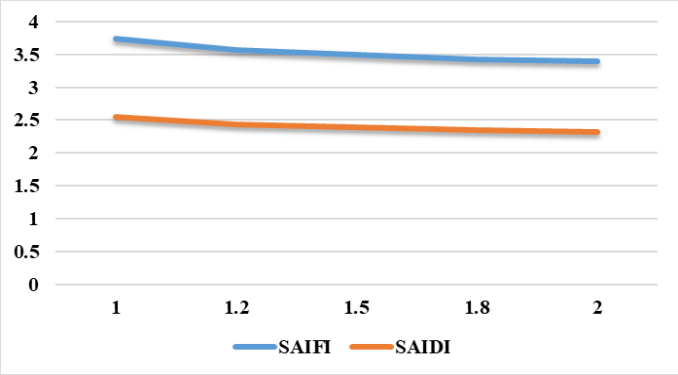
شکل ۱۰. موقعیت بهینه تجهیزات حفاظتی با بودجه یک میلیارد تومانی

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با بودجه یک میلیارد تومانی می‌توان فیدر را بگونه‌ای تجهیز کرد که شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه بهبود قابل توجهی داشته باشند، به طور مثال شاخص SAIFI حدود دو واحد کاهش یافته است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش بودجه اختصاص‌یافته جهت تجهیز شبکه، انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان بهبود می‌یابد. مقایسه نتایج سناریوهای یک و دو نشان از بهبودی شاخص‌های قابلیت اطمینان دارند. به عنوان مثال، مقدار SAIFI در سناریو ۲ بیست و سه درصد نسبت به سناریو یک کاهش یافته. همچنین، مقدار ENS در سناریو ۲ بیست و چهار درصد نسبت به سناریو یک کاهش یافته است. همچنین بهبود نتایج سناریو ۲ در مقایسه با شرایط اولیه محسوس تر می‌باشد.نتایج الگوریتم‌های مورد نظر در این مطالعه در هر دو سناریو در ۳۰ آزمایش مختلف به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی الگوریتم بهبودیافته ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر ژنتیک، اجتماع ذرات و جهش قورباغه، در جداول ۷ تا ۸ نشان داده شده است. بهترین جواب، بدترین جواب و انحراف معیار نیز در هر جدول نشان داده شده است. بهترین جواب برای تابع SAIFI در سناریو یک و دو دو به ترتیب برابر ۴/۲۳ و ۳/۴۵ می‌باشد.

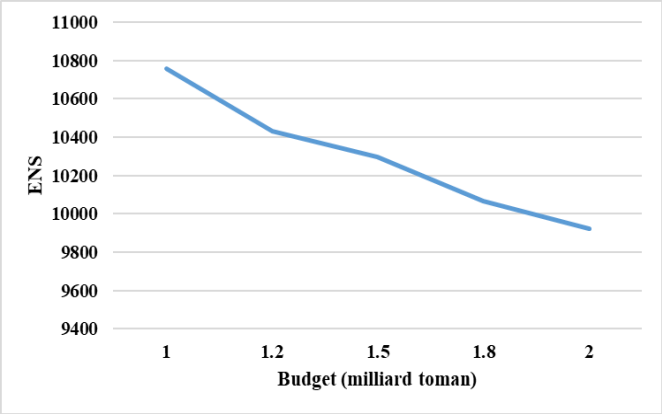
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی تابع هدف SAIFI به جواب‌های بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها همگرا شده است. به عنوان مثال، مقدار SAIFI حاصل از الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته در سناریو اول و دوم به ترتیب ٪۲۶ و ٪ ۳۸ نسبت به به مقادیر بدست آمده از الگوریتم جهش قورباغه کاهش یافته است.



شکل ۱۱ .روند بهبود شاخص‌های SAIFI و SAIDI با افزایش بودجه اختصاص یافته



شکل ۱۲ .روند بهبود شاخص انرژی تامین نشده (ENS) با افزایش بودجه اختصاص یافته

- **سناریوی سوم: دست‌یابی به شاخص‌های قابلیت اطمینان مشخص**

در این سناریو قید بودجه‌ای وجود نداشته و هدف تعیین کمترین تجهیزات حفاظتی جهت رسیدن به یک عدد مشخص برای هر یک از شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌باشد. در واقع در این سناریو تمامی ضرایب وزنی بجز W_1 برابر با صفر هستند.

$$Min\ F = W_1 \times Cost_{inv} \qquad (۲۳)$$

جدول ۷. مقایسه بین نتایج بهینه سازی تابع SAIFI حاصل از روش های مختلف در سناریو یک

روش	سناریو ۱ SAIFI		
	انحراف معیار	بدترین جواب	بهترین جواب
اجتماع ذرات	۰/۴۹	۶/۷۵	۵/۸۹
جهش قورباغه	۰/۴۱	۶/۲۵	۵/۳۱
ژنتیک	۰/۳۲	۵/۵۲	۴/۷۴
بهبودیافته ژنتیک	۰/۲۰	۴/۷۵	۴/۲۳

جدول ۸. مقایسه بین نتایج بهینه سازی SAIFI حاصل از روش‌های مختلف در سناریو دو

روش	سناریو ۲ SAIFI		
	انحراف معیار	بدترین جواب	بهترین جواب
اجتماع ذرات	۰/۵۴	۶/۲۶	۵/۵۱
جهش قورباغه	۰/۴۸	۵/۴۵	۴/۷۶
ژنتیک	۰/۳۷	۴/۷۵	۴/۱۹
بهبودیافته ژنتیک	۰/۲۵	۴/۰۹	۳/۴۵

خروجی الگوریتم پیشنهادی به منظور بهینه‌سازی رابطه (۲۳) با توجه به رسیدن به شاخص‌های SAIDI و MAIFI به ترتیب برابر با ۳ و ۹ نصب سه ریکلوزر و یک سکشن‌لایزر به عنوان حالت بهینه ارائه می‌دهد. همچنین محل نصب این ادوات در جدول ۹ نشان داده شده است.

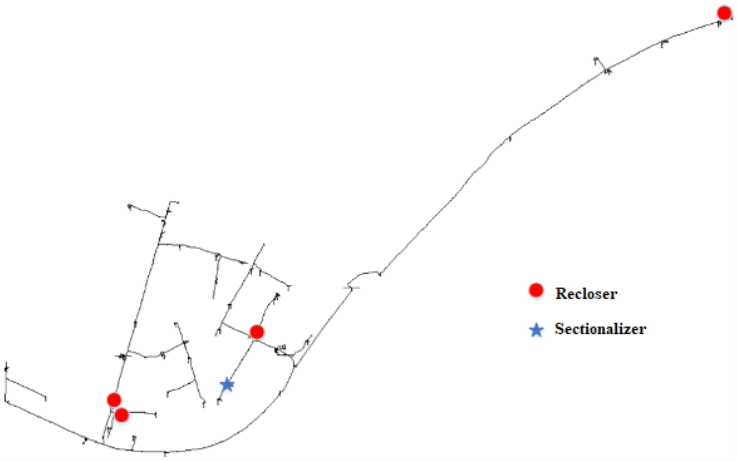
جدول ۹. تجهیزات مورد نیاز نصب در فیدر نادر در سناریو سوم

تجهیز	شماره شاخه محل نصب
۳ ریکلوزر	۷۹ - ۱۲۸ – ۱۳۴
۱ سکشن‌لایزر	۸۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

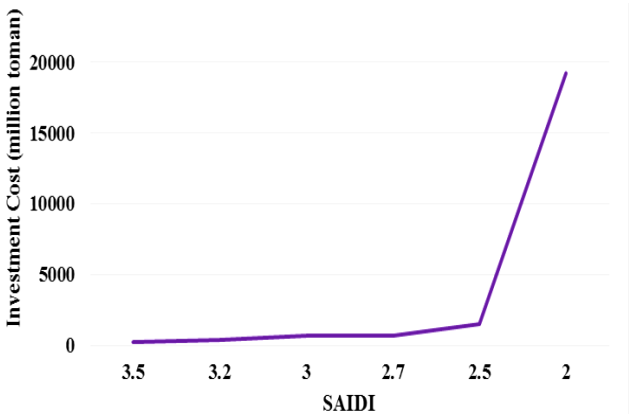
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

محل قرارگیری این تجهیزات روی فیدر نادر در شکل ۱۳ مشخص شده است.

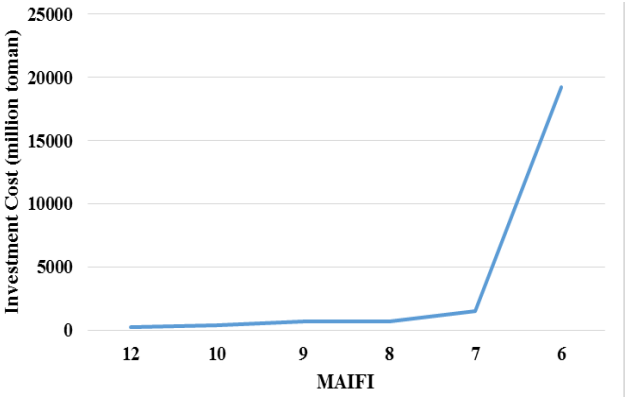


شکل ۱۳ .موقعیت بهینه تجهیزات حفاظتی نظیر ریکلوزر و سکشنلایزر در سناریو ۳

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با کاهش شاخص SAIDI مورد انتظار، تعداد تجهیزات مورد نیاز و به تبع آن بودجه مورد نیاز افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، برای رسیدن تابع SAIDI به مقدار ۲، هزینه سرمایه‌گذاری در حدود ۲۰ میلیارد تومان می‌باشد.



شکل ۱۴ .روند صعودی میزان سرمایه‌گذاری جهت بهبود شاخص SAIDI



شکل ۱۵ .روند صعودی میزان سرمایه‌گذاری جهت بهبود شاخص MAIFI

نکته جالب در شکل‌های بالا، افزایش قابل توجه بودجه مورد نیاز جهت دست‌یابی به شاخص SAIDI برابر با ۲ می‌باشد که به ناگهانی رشد زیادی داشته است.

با توجه به شکل۱۵، برای رسیدن به مقدار ۷ برای تابع MAIFI، هزینه سرمایه‌گذاری کمتر از ۵ میلیارد می‌باشد. در حالیکه، برای رسیدن تابع MAIFI به عدد ۶، هزینه سرمایه‌گذاری نزدیک به ۲۰ میلیارد می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور مکان‌یابی بهینه تجهیزات حفاظتی نظیر ریکلوزر و سکشن‌لایزر در یک فیدر واقعی در شهرستان بجنورد از الگوریتم بهبودیافته ژنتیک استفاده شده است. تابع هدف این مطالعه ترکیبی از شاخص‌های قابلیت اطمینان نظیر ENS، SAIFI، SAIDI، MAIFI و هزینه‌های مربوط به نصب تجهیزات و خاموشی می‌باشد، همچنین قیود بهره‌برداری مسئله مربوط به تعداد و محل نصب ادوات حفاظتی می باشد. در این مطالعه، روش کاربردی مبتنی بر نظریه گراف جهت بدست آوردن تعداد گره‌ها و شاخه‌های تحت هر شاخه ارائه شده است. همچنین به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم بهبودیافته ژنتیک بر اساس مکانیزم نخبه گرایی پیشنهاد شده است. به منظور بکارگیری روش بهبود یافته پیشنهادی، سه سناریو شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج سایر سناریوها مقایسه شده است، بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش بهبود یافته ژنتیک عملکرد بهتری در بهینه سازی توابع هدف داشته است، این ادعا توسط مقایسه نتایج شبیه‌سازی سناریو ۱ و ۲ در جداول ۶ تا ۷ اثبات می‌شود.

مقایسه نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد:

نصب ادوات حفاظتی نظیر ریکلوزر و سکشنالایزر بر تمامی شاخص‌های قابلیت اطمینان تاثیر گذاشته و سبب بهبود آن‌ها می‌شود. به عنوان مثال، مقادیر بدست آمده حاصل از روش پیشنهادی برای SAIFI، SAIDI و ENS در حضور یک ریکلوزر و دو سکشنالایزر به ترتیب ۲۹/۸۵، ۲۵/۵۲ و ۲۶/۶ درصد نسبت به شرایط اولیه بهبود می‌یابند. همچنین با افزایش بودجه اختصاص‌یافته جهت تجهیز شبکه به ادوات حفاظتی، انواع شاخص‌های قابلیت اطمینان نیز بهبود می‌یابند. به عنوان مثال، مقادیر بدست آمده حاصل از روش پیشنهادی برای SAIFI، SAIDI و ENS در حضور سه ریکلوزر و سه سکشنالایزر به ترتیب ۳۵/۴۲، ۳۱/۱۳ و ۳۲/۲۷ درصد نسبت به شرایط اولیه بهبود می‌یابند.

مراجع

Alam, A., Pant, V., & Das, B. (2016). Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates. *Electric Power Systems Research*, *140*, 619-630 .

Alam, A., Tariq, M., Zaid, M., Verma, P., Alsultan, M., Ahmad, S., Sarwar, A., & Hossain, M. A. (2021). Optimal placement of reclosers in a radial distribution system for reliability improvement. *Electronics*, *10*(24), 3182 .

Amohadi, M., & firuzabad, m. f. (2019). Optimal placement of switching and protection devices in radial distribution networks to enhance system reliability using the AHP-

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]

PSO method. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *27*(1), 181-196 .

Bernardon, D. P., Sperandio, M., Garcia, V. J., Canha, L. N., da Rosa Abaide, A., & Daza, E. F. B. (2011). AHP decision-making algorithm to allocate remotely controlled switches in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *26*(3), 1884-1892 .

Billinton, R., & Jonnavithula, S. (1996). Optimal switching device placement in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *11*(3), 1646-1651 .

Carvalho, P., Ferreira, L., & Da Silva, A. C. (2005). A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *20*(2), 1031-1036 .

Chen, C.-S., Lin, C.-H., Chuang, H.-J., Li, C.-S., Huang, M.-Y., & Huang, C.-W. (2006). Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm. *IEEE Transactions on power systems*, *21*(3), 1209-1217 .

da Silva, L. G. W., Pereira, R. A. F., Abbad, J. R., & Mantovani, J. R. S. (2008). Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm. *Electric Power Systems Research*, *78*(3), 372-381 .

Dezaki, H., Abyaneh, H., Agheli, A., & Mazlumi, K. (2012). Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems. *Journal of Electrical Engineering*, *63*(1), 47 .

Dhole, S., Mir, M., Hasan, K. N., Farhan, A., Yaghoobi, J., Veselov, A., & Dart, D. (2021). Optimal Recloser Placement in Power Networks Based on Reliability and Cost-Benefit Analysis. 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) ,

Ghosh, B., Chakraborty, A. K., & Bhowmik, A. R. (2022). Remodelling of an electric distribution network through optimal placement of auto-reclosers to enhance system reliability and efficiency. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(3), 3619-3631 .

Guerra Sánchez ,L. G., & Martínez Velasco, J. A. (2018). A review of tools, models and techniques for long-term assessment of distribution systems using OpenDSS and parallel computing. *AIMS Energy*, *6*, 764-800 .

Harik, G. R., Lobo, F. G., & Goldberg, D. E. (1999). The compact genetic algorithm. *IEEE transactions on evolutionary computation*, *3*(4), 287-297 .

Jamali, S., & Shateri, H. (2005). Optimal siting of recloser and sectionalizers to reduce non-distributed energy. 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific ,

Lotfi, H. (2020). Multi-objective energy management approach in distribution grid integrated with energy storage units considering the demand response program. *International Journal of Energy Research*, *44*(13), 10662-10681 .

Lotfi, H., & Ghazi, R. (2020a). Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration along with capacitor allocation using a new hybrid evolutionary algorithm. *Energy Systems*, *11*(3), 779-809 .

LOTFI, H., & GHAZI, R. (2020b). Optimum energy management strategy in smart distribution networks considering the effect of distributed generators and energy storage units .

Lotfi, H., Samadi, M., & Dadpour, A. (2016). Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using an improved Particle Swarm Optimization algorithm. 2016 21st Conference on electrical power distribution networks conference (EPDC) ,

Moradi, A., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2007). Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *23*(1), 271-279 .

Pombo, A. V., Murta-Pina, J., & Pires, V. F. (2016). A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources. *Electric Power Systems Research*, *130*, 34-45 .

Pregelj, A., Begovic, M., & Rohatgi, A. (2006). Recloser allocation for improved reliability of DG-enhanced distribution networks. *IEEE Transactions on power systems*, *21*(3), 1442-1449 .

Sardou, I. G., Banejad, M., Hooshmand, R & ,.Dastfan, A. (2012). Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in distribution automation system using a multi-objective fuzzy approach. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *6*(6), 493-502 .

Sultan, H., Ansari, S. J., Alam, A., Khan, S., Sarwar, M., & Zaid, M. (2019). Reliability improvement of a radial distribution system with recloser placement. 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) ,

Teng, J.-H., & Liu, Y.-H .(2003) .A novel ACS-based optimum switch relocation method. *IEEE Transactions on power systems*, *18*(1), 113-120 .

Teng, J.-H., & Lu, C.-N. (2002). Feeder-switch relocation for customer interruption cost minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *17*(1), 25 .254-59.

Velasquez, M. A., Quijano, N., & Cadena, A. I. (2016). Optimal placement of switches on DG enhanced feeders with short circuit constraints. *Electric Power Systems Research*, *141*, 221-232 .

Zeinalzadeh, A., Estebsari, A., & Bahmanyar, A. (2019). Multi-objective optimal placement of recloser and sectionalizer in electricity distribution feeders. 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe).

گروه مولفین. (۱۳۹۰) .اصلاح و بهینه سازی شبکه های برق با استفاده از فن آوری خط گرم فرمان از نزدیک فشار متوسط. چاپ اول، شرکت توزیع نیروی برق مشهد.

غلامرضاکامیاب.(۱۳۸۵).تعیین تعداد و محل بهینه نصب ریکلوزردر یک فیدر شعاعی فشارمتوسط. یازدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق،کرمان.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.5.1]