



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 3, 2024
pp. 1-14
Research Paper

A Scalable Ensemble Learning-Based Model for Optimal Placement of Circuit Breaker and Sectionalizer in Power Distribution Systems with the Aim of Reliability Improvement

Mehrdad Ebrahimi¹, Mohammad Rastegar^{*2}

¹ Ph.D., Department of Power and Control Engineering, School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Associate Prof., Department of Power and Control Engineering, School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract:

The number and location of switching devices (e.g., circuit breakers and sectionalizers) should be optimally determined in power distribution systems to reduce system interruptions and associated costs. However, existing mathematical optimization algorithms, such as classic and metaheuristic methods, cannot solve the optimal switch placement problem for large-scale systems. In this paper, a scalable model is proposed based on machine learning methods to determine the optimal number and location of switching devices according to system conditions. This paper proposes employing ensemble learning methods and explainable artificial intelligence tools to build an accurate data-driven model. Consequently, power distribution operators can determine the optimal number and location of circuit breakers, remote-controlled sectionalizers, and manual switches in large-scale systems without mathematical optimization algorithms. To validate its accuracy and scalability, the proposed model and a classic-based model are implemented on a real power distribution system in Fars province. The numerical results demonstrate that the proposed data-driven model can find a solution close to the globally optimal solution quickly, using a limited range of system data.

Keywords: Machine Learning, Optimal Switch Placement, Optimization, Power Distribution Systems, Protective Devices, Remote-Controlled Switch.



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



<https://doi.org/10.22108/IJEE.2024.141003.1682>

مدلی مقیاس پذیر مبتنی بر یادگیری گروهی برای جایابی بهینه کلید بریکر و سکسیونر در

سیستم های توزیع توان الکتریکی با هدف بهبود قابلیت اطمینان

مهرداد ابراهیمی^۱، محمد رستگار^{۲*}

۱- دانش آموخته دکتری، بخش مهندسی قدرت و کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز،

شیراز، ایران

me.ebrahimi@shirazu.ac.ir

۲- دانشیار، بخش مهندسی قدرت و کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز،

ایران

mohammadrastegar@shirazu.ac.ir

چکیده: تعیین بهینه تعداد و مکان تجهیزات کلیدزنی (مانند بریکرها و سکسیونرها) در سیستم های توزیع توان الکتریکی امری ضروری برای کاهش قطعی های برق و هزینه های مربوط است؛ با این حال، الگوریتم های بهینه سازی ریاضی موجود مانند روش های کلاسیک و فراابتکاری قادر به حل مناسب مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی برای سیستم های بزرگ نیستند. در این مقاله، مدلی مقیاس پذیر مبتنی بر روش های یادگیری ماشین پیشنهاد می شود که با توجه به شرایط سیستم های توزیع توان الکتریکی، مکان و تعداد بهینه تجهیزات کلیدزنی را مشخص می کند. در این راستا، استفاده از روش های یادگیری گروهی و هوش مصنوعی تفسیرپذیر برای ساخت یک مدل داده محور دقیق پیشنهاد می شود؛ در نتیجه، بهره برداران سیستم قدرت قادر خواهند بود تا بدون استفاده از الگوریتم های بهینه سازی ریاضی، مکان و تعداد بهینه بریکرها، سکسیونرهای قابل کنترل از راه دور و سکسیونرهای دستی را در سیستم های بزرگ با استفاده از روش پیشنهادی مشخص کنند. برای اعتبارسنجی دقت و مقیاس پذیری، مدل پیشنهادی به همراه یک مدل کلاسیک روی یک سیستم توزیع واقعی در استان فارس اجرا می شود. نتایج مطالعات عددی نشان می دهد مدل داده محور پیشنهادی با دریافت اطلاعات کمی از سیستم تحت بررسی قادر به یافتن پاسخی نزدیک به بهینه عمومی در زمانی بسیار کوتاه است.

واژه های کلیدی: بهینه سازی، تجهیزات حفاظتی، جایابی بهینه کلید، سیستم های توزیع توان الکتریکی، کلید قابل کنترل از

راه دور، یادگیری ماشین.

۱- مقدمه

توزیع توان الکتریکی با هدف تسهیل فرایند مدیریت

خاموشی نصب می شوند. از سوی دیگر، نصب بیش از حد تجهیزات کلیدزنی مقرون به صرفه نیست؛ زیرا فایده نصب آن ها کمتر از هزینه خرید و نگهداری شان می شود [۱].

همچنین، نصب آن ها در تمامی نقاط سیستم از نظر فنی

ممکن نیست [۲]؛ در نتیجه، مکان و تعداد تجهیزات

کلیدزنی در سیستم های توزیع توان الکتریکی باید به

صورت بهینه با در نظر گرفتن محدودیت های فنی و

اقتصادی مشخص شود. از سوی دیگر، به دلیل الف) ابعاد

تجهیزات کلیدزنی مانند بریکر، سکسیونر قابل کنترل از راه دور (RCS)^۱ و سکسیونر دستی (MS)^۲ در سیستم های

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

نام نویسنده مسئول: محمد رستگار

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده فنی و مهندسی برق و کامپیوتر

روش های بهینه سازی کلاسیک و فراابتکاری برای حل دقیق مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی برای سیستم های توزیع واقعی بزرگ ناکارآمد هستند. گفتنی است، در الگوریتم های بهینه سازی ریاضی، از دانش و تجربه های پیشین برای بهبود عملکرد مدل استفاده نمی شود. به عبارت دیگر، الگوریتم بهینه سازی ریاضی بدون توجه به تجربه های پیشین که از وقوع شرایط مشابه به دست آمده اند، مسئله را در شرایط مدنظر حل می کند.

امروزه، یادگیری ماشین این امکان را فراهم آورده است تا مدل هایی برای حل مسائل واقعی با بهره وری از دانش و تجربه های پیشین ساخته شوند. در سال های گذشته، از روش های یادگیری ماشین برای کنترل، برنامه ریزی و توسعه سیستم های قدرت (برای مثال، پخش بار بهینه [۱۷]، توزیع اقتصادی توان بین واحدهای تولید [۱۸]، بازآرایی شبکه برای بهبود شاخص های بهره برداری [۱۹] و ...) استفاده شده است. در این راستا، نتایج مطالعه ها نشان می دهد روش های یادگیری ماشین به دلیل الف) بهره وری از دانش و تجربه های پیشین، ب) قدرت پردازش حجم زیاد اطلاعات، پ) انعطاف پذیری در طراحی مدل با اهداف مختلف، ت) شناسایی الگوهای پیچیده و پنهان و ... برای حل مسائل بهینه سازی پیچیده مناسب هستند. برای مثال، در مرجع [۲۰]، از شبکه عصبی پیچشی برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع توان الکتریکی به صورت پویا با هدف بهبود شاخص های بهره برداری مانند تلفات و افت ولتاژ استفاده شده است. اگرچه در مطالعه های پیشین مسئله های بهینه سازی متنوعی با استفاده از روش های یادگیری ماشین حل شده اند، مدلی داده محور برای حل مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی ارائه نشده است.

بر اساس مرور مطالعه های پیشین، شکاف های پژوهشی

در زمینه جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی عبارت اند از:

- مدل های مبتنی بر الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری به پاسخی دور از بهینه عمومی برای سیستم های توزیع توان الکتریکی واقعی دست پیدا می کنند.
- مدل های مبتنی بر برنامه ریزی ترکیب شده با

بزرگ سیستم های توزیع توان الکتریکی، ب) تنوع متغیرهای تصمیم گیری، پ) تنوع شروط فنی و اقتصادی و ت) غیرخطی بودن، مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی از نظر محاسباتی پیچیده است [۳]. گفتنی است، فضای جست و جوی مسئله با افزایش ابعاد سیستم به صورت نمایی افزایش می یابد [۴]؛ بنابراین، ارائه الگوریتم های بهینه سازی با قدرت محاسباتی زیاد برای حل دقیق مسئله در سیستم های بزرگ حائز اهمیت است.

تا کنون، از الگوریتم های بهینه سازی ریاضی مختلف (مانند روش های کلاسیک و فراابتکاری) برای حل مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی استفاده شده است. مدل های بهینه سازی کلاسیک شامل روش های مبتنی بر برنامه ریزی غیرخطی ترکیب شده با عدد صحیح [۵]، [۶]، [۷]، برنامه ریزی خطی ترکیب شده با عدد صحیح [۸]، [۹]، [۱۰] و برنامه ریزی پویا [۱۱] می شوند. روش های کلاسیک عمدتاً بر تکنیک های جست و جوی شاخه و کران^۲، شاخه و برش^۳ و صفحه برشی^۴ برای کشف فضای حل و یافتن راه حل بهینه تکیه می کنند؛ با این حال، این تکنیک ها ممکن است زمانی که فضای جست و جو بسیار بزرگ و پیچیده باشد، ناکارآمد شوند؛ زیرا برای حل مسئله به زمان و حافظه زیادی نیاز دارند [۱۱]. در مطالعه های پیشین، از الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک [۱۲]، جست و جوی گرانشی [۱۳]، الگوریتم پرندگان [۱۴]، الگوریتم زنبور عسل بهبود یافته [۱۵]، الگوریتم ازدحام ذرات بهبود یافته [۱۶] و ... برای حل مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی استفاده شده است. در این راستا، الگوریتم های فراابتکاری ممکن است نتوانند فضای حل مسئله را به اندازه کافی کاوش کنند؛ زیرا فضای جست و جوی مسئله بزرگ است. همچنین، روش های فراابتکاری ممکن است نتوانند از راه حل های موجود به طور مؤثر برای رسیدن به جواب بهینه عمومی استفاده کنند. علاوه بر این، روش فراابتکاری ممکن است برای تکمیل فرایند جست و جو به حافظه بیش از حد نیاز داشته باشد [۳]. بر اساس توضیحات بالا، می توان نتیجه گرفت

RCS و MS در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی بزرگ با لحاظ شرایط واقعی سیستم را ارائه می‌کند.

• این مقاله ویژگی‌هایی از یک سیستم توزیع توان الکتریکی واقعی و نقاط کاندیدا برای نصب تجهیزات را معرفی می‌کند که می‌توان از آن برای ساخت هر مدل داده‌محور در زمینه جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی استفاده کرد.

• این مقاله از روش‌های یادگیری ماشین برای حل مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی استفاده می‌کند تا از تجربه‌ها و دانش پیشین به منظور ارائه مدلی مقیاس‌پذیر استفاده شود.

• این مقاله از روش‌های هوش مصنوعی تفسیرپذیر و یادگیری گروهی برای ساخت مدل داده‌محور جایگزین استفاده می‌کند تا مدلی دقیق طراحی شود.

۲- مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی

برای جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی با در نظر گرفتن شروط اقتصادی و فنی، باید یک مسئله بهینه‌سازی طرح‌ریزی و حل شود. یک سیستم توزیع توان الکتریکی شامل تعداد زیادی فیدر توزیع فشار متوسط است که وظیفه برق‌رسانی به نقاط بار را دارند. شکل (۱) یک فیدر توزیع فشار متوسط نمونه را نشان می‌دهد. به طور معمول، در ابتدای هر فیدر فشار متوسط یک کلید بریکر نصب شده است که وظیفه حفاظت از تجهیزات در برابر جریان‌های اتصال کوتاه را به عهده دارد. انتهای هر فیدر یک خط ارتباطی وجود دارد که فیدر را به فیدر مجاور توسط یک کلید نرمال باز وصل می‌کند. یک فیدر توزیع فشار متوسط شامل بخش‌های اصلی و فرعی است. در این مقاله، همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است، ابتدای یک بخش فرعی و ابتدا و انتهای یک بخش اصلی به عنوان نقاط کاندیدا برای نصب تجهیزات کلیدزنی در نظر گرفته شده‌اند.

عدد صحیح به دلیل حجم محاسباتی زیاد روی سیستم‌های واقعی قابل اجرا نیستند.

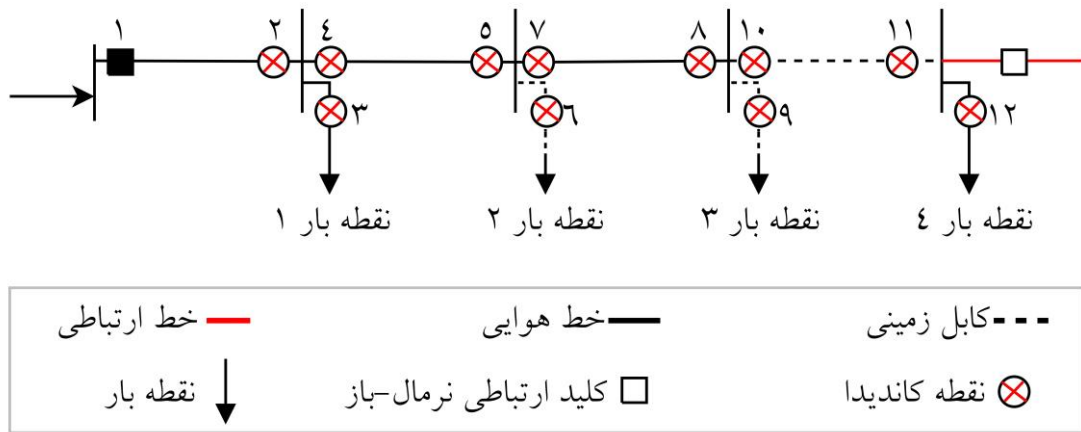
• مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا که در [۱۱] ارائه شده است، با وجود قابلیت اجرا در سیستم‌های بزرگ، فقط برای جایابی RCS مناسب است. همچنین، فرضیه‌های غیرواقعی (مانند در نظر نگرفتن خطوط ارتباطی میان فیدرهای توزیع فشار متوسط) به منظور کاهش حجم حافظه مورد نیاز برای حل مسئله لحاظ شده‌اند.

• مطالعه‌های موجود از دانش و تجربه‌های پیشین برای حل مسئله با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین بهره‌نگرفته‌اند.

به منظور پر کردن شکاف پژوهشی، این مقاله روشی مقیاس‌پذیر مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی پاسخ بهینه مسئله جایابی تجهیزات کلیدزنی در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی را ارائه می‌کند. در این راستا، مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی با هدف کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری تجهیزات کلیدزنی به همراه بهبود شاخص‌های متوسط انرژی تأمین‌نشده، متوسط زمان قطع برق مشترکین و متوسط تعداد دفعات قطع برق مشترکین حل می‌شود. بریکر، RCS و MS به عنوان تجهیزات کلیدزنی کاندیدا در نظر گرفته شده‌اند. هدف از حل مسئله تعیین بهینه تعداد و مکان تجهیزات کلیدزنی است. در روش پیشنهادی، جواب مسئله به طور مستقیم توسط مدل داده‌محور جایگزین پیش‌بینی می‌شود. در این مقاله، از روش‌های یادگیری گروهی و روش‌های تفسیرپذیری برای ساخت مدل داده‌محور جایگزین استفاده شده است. برای ارزیابی دقت، سرعت و مقیاس‌پذیری روش داده‌محور پیشنهادی در مقایسه با روش‌های ریاضی موجود (مانند برنامه‌ریزی خطی ترکیب شده با عدد صحیح)، از یک سیستم توزیع توان الکتریکی واقعی به عنوان سیستم آزمایش استفاده می‌شود. به طور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله در مقایسه با مطالعه‌های پیشین عبارت‌اند از:

• این مقاله مدلی مقیاس‌پذیر برای جایابی بهینه بریکر،

۴ مدلی مقیاس پذیر مبتنی بر یادگیری گروهی برای جایابی بهینه کلید بریکر و سکسیونر در سیستم های توزیع توان الکتریکی



شکل (۱): نمایش نقاط کاندیدا برای نصب تجهیزات کلیدزنی در یک فیدر توزیع فشار متوسط نمونه

$$Rel = \beta_1 \frac{\sum_{f \in F} EENS_f}{EENS} + \beta_2 \frac{\sum_{f \in F} SAIDI_f}{SAIDI} \quad (2)$$

$$+ \beta_3 \frac{\sum_{f \in F} SAIFI_f}{SAIFI}$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad (3)$$

در رابطه (۲)، f و F به ترتیب بیانگر اندیس و مجموعه فیدرهای توزیع فشار متوسط در یک سیستم توزیع توان الکتریکی هستند. $EENS_f$ ، $SAIDI_f$ و $SAIFI_f$ به ترتیب نشان دهنده متوسط انرژی تأمین نشده، متوسط زمان خاموشی هر مشترک و متوسط تعداد خاموشی هر مشترک در طول یک سال برای فیدر f هستند. وزن های β_1 ، β_2 و β_3 اهمیت هر شاخص برای بهره بردار سیستم توزیع توان الکتریکی را نشان می دهند. از آنجا که شاخص های قابلیت اطمینان دارای واحد و اندازه متفاوت هستند، آن ها در رابطه (۲) بر مقادیر پایه مربوط تقسیم شده اند. برای محاسبه مقادیر پایه، شرایط سیستم قبل از کلیدگذاری جدید در نظر گرفته می شود و مدل ارزیابی قابلیت اطمینان اجرا می شود. مطابق رابطه (۳)، مجموع وزن های β_1 ، β_2 و β_3 برابر یک است.

هزینه های تجهیزات کلیدزنی شامل هزینه خرید و هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات در طول عمر آن ها هستند؛ از این رو، $Cost$ با رابطه زیر بیان می شود:

هدف مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی تعیین بهینه مکان و تعداد تجهیزات کلیدزنی برای نصب در نقاط کاندیدا است. در این مقاله، سه نوع تجهیزات کلیدزنی که عبارت اند از بریکر، RCS و MS، به عنوان تجهیزات کاندیدا در نظر گرفته شده اند؛ بر این اساس، چهار حالت برای یک نقطه کاندیدا وجود دارند: الف) عدم نصب تجهیز، ب) نصب بریکر، پ) نصب RCS و ت) نصب MS. مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی معمولاً با هدف کاهش هزینه های خرید، نصب و نگهداری تجهیزات کلیدزنی و بهبود شاخص های قابلیت اطمینان سیستم توزیع توان الکتریکی مانند متوسط انرژی تأمین نشده $(EENS)$ ، متوسط تعداد دفعات خاموشی سیستم $(SAIFI)$ و متوسط زمان خاموشی سیستم $(SAIDI)$ طرح ریزی می شود. در ادامه، تابع هدف مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی فرمول بندی شده است:

$$\min Obj = \alpha \times Rel + (1 - \alpha) \times Cost \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Obj ، Rel و $Cost$ به ترتیب بیانگر مقدار تابع هدف، مجموع وزن دار شاخص های قابلیت اطمینان در بنای واحد و مجموع هزینه های تجهیزات کلیدزنی در بنای واحد هستند. α ضریب وزنی برای تعیین میزان اهمیت کاهش هزینه های تجهیزات و بهبود شاخص های قابلیت اطمینان است. α عددی بین صفر و یک است. در ادامه، Rel فرمول بندی شده است:

مستقیم مکان بهینه نصب تجهیزات کلیدزنی را بر اساس ویژگی‌های سیستم توزیع و نقاط کاندیدا شناسایی می‌کند. مدل پیشنهادی که مدل داده‌محور جایگزین نام‌گذاری شده است، بهره‌برداران را از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ریاضی که از نظر سرعت و مقیاس پذیری ناکارآمد هستند، بی‌نیاز می‌کند. برای ساخت مدل داده‌محور جایگزین، ابتدا ویژگی‌های تأثیرگذار بر پیش‌بینی مکان بهینه نصب تجهیزات کلیدزنی با به‌کارگیری ابزارهای هوش مصنوعی توصیف‌پذیر شناسایی می‌شوند. سپس، مدل داده‌محور جایگزین بر اساس روش‌های یادگیری گروهی^{۱۰} آموزش داده می‌شود. چارچوب حل مسئله با استفاده از مدل داده‌محور جایگزین در شکل (۲) آورده شده است. در این مقاله، بریکر، RCS و MS به عنوان تجهیزات کلیدزنی کاندیدا در نظر گرفته شده‌اند. گفتنی است، نصب تجهیزات کلیدزنی جدید با در نظر گرفتن تجهیزات کلیدزنی از پیش نصب‌شده (مانند بریکر، فیوز، RCS و MS) در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی انجام می‌شود. مطابق شکل (۲)، الگوریتم حل مسئله شامل دو سطح است که در ادامه شرح داده شده‌اند.

در سطح اول، مدل‌های دسته‌بندی پایه آموزش داده می‌شوند. ورودی‌های هر مدل دسته‌بندی پایه ویژگی‌های یک نقطه کاندیدا هستند. همچنین، خروجی آن احتمال مناسب بودن نصب یک تجهیز ویژه در آن نقطه است. گفتنی است، احتمال نصب با عددی بین صفر و یک نشان داده می‌شود. مطابق شکل (۲)، سه مدل دسته‌بندی پایه نام‌های مدل دسته‌بندی پایه برای بریکر، مدل دسته‌بندی پایه برای RCS و مدل دسته‌بندی پایه برای MS آموزش داده می‌شوند که مبتنی بر الگوریتم دسته‌بندی باینری هستند. گفتنی است، ورودی‌های مدل‌های دسته‌بندی پایه با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی تفسیرپذیر متناسب با خروجی آن‌ها انتخاب می‌شوند. همچنین، معماری این مدل‌ها مطابق روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای شبکه‌های عصبی تعیین می‌شود؛ در نتیجه، ورودی، معماری و خروجی مدل‌های دسته‌بندی پایه متفاوت از یکدیگر هستند.

$$Cost = \frac{Inv + Mai}{Cost} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، Inv بیانگر هزینه خرید تجهیزات کلیدزنی و Mai نشان‌دهنده هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات کلیدزنی در طول عمر آن‌ها است.

مطابق توضیحات بالا، این مقاله از روش مجموع ضرایب وزن‌دار و روش معیار جامع برای تبدیل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده می‌کند [۲۱]. مطابق این روش، ابتدا اجزای تابع هدف مسئله به مقادیر در مبنای واحد تبدیل می‌شوند و سپس، برای هر جزء یک وزن اختصاص داده می‌شود. وزن‌های اختصاص داده‌شده میزان اهمیت هر هدف را برای تصمیم‌گیرنده مشخص می‌کنند. گفتنی است، روش پیشنهادی راهی مناسب برای تصمیم‌گیری بر اساس تقابل میان اجزای تابع هدف مطابق وزن‌های انتخاب‌شده است. همچنین، با در نظر گرفتن وزن‌های ثابت حین حل مسئله، به‌ازای هر مجموعه وزن، پاسخی یکتا در هر بار اجرا به دست می‌آید.

متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی مکان، تعداد و نوع تجهیزات کلیدزنی هستند. در مرجع [۲۲]، مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی ترکیب‌شده با عدد صحیح (MILP)^۹ برای حل مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف فرمول‌بندی شده در رابطه (۱) ارائه شده است. همچنین، شروط مسئله بهینه‌سازی مانند محدودیت بودجه، تعداد تجهیزات مجاز قابل نصب در هر فیدر و ... معرفی شده‌اند. از آنجا که هدف این مقاله ارائه روشی مبتنی بر یادگیری ماشین برای حل مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی است، از بازگویی مدل ریاضی مسئله خودداری شده است.

۳- ارائه روش داده‌محور پیشنهادی برای حل

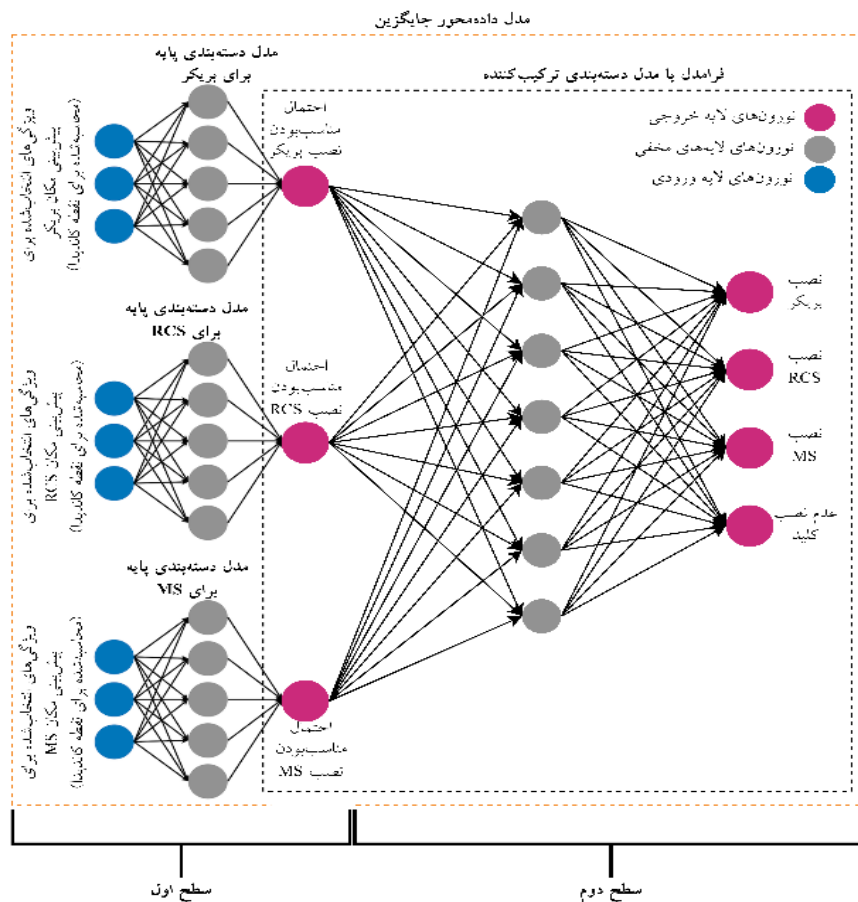
مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی

در این بخش، مدلی داده‌محور ارائه می‌شود که به طور

۶ مدلی مقیاس پذیر مبتنی بر یادگیری گروهی برای جایابی بهینه کلید بریکر و سکیونر در سیستم های توزیع توان الکتریکی

احتمال های به دست آمده از مدل های دسته بندی پایه، کلاس مناسب برای نقطه کاندیدا (نصب بریکر، نصب RCS، نصب MS و عدم نصب تجهیز) را پیش بینی می کند.

در سطح دوم، خروجی مدل های دسته بندی پایه توسط فرامدل^{۱۱} یا مدل ترکیب کننده^{۱۲} ترکیب شده و نوع تجهیز بهینه برای نصب در نقطه کاندیدای مدنظر پیش بینی می شود. فرامدل یک مدل دسته بندی چندکلاسی است که با گرفتن



شکل (۲): چارچوب حل مسئله با استفاده از مدل داده محور جایگزین

ویژگی های معرفی شده را با استفاده از اطلاعات در دسترس در شرکت های توزیع برق می توان محاسبه کرد. در مجموع، ۴۹ ویژگی معرفی شده اند که با به کارگیری روش های تفسیرپذیری، مهم ترین آن ها برای ساختن مدل های داده محور استفاده می شوند.

۳-۱- معرفی ویژگی های نقاط کاندیدا

در این مقاله، ویژگی های نقاط کاندیدا به عنوان ورودی های مدل های دسته بندی پایه در نظر گرفته شده اند. در جدول (۱) ویژگی های نقاط کاندیدا معرفی شده اند. همچنین، در جدول (۲)، اپراتورهای استفاده شده در تعریف ویژگی های نقاط کاندیدا معرفی شده اند. گفتنی است،

جدول (۱): ویژگی‌های نقاط کاندیدا

شماره	نام ویژگی	فرمول محاسبه ویژگی
۱	R_Len	نسبت (طول بخش‌ها) Sum به (طول بخش‌ها) Total
۲	R_CabLen	نسبت (طول کابل‌های زمینی) Sum به (طول بخش‌ها) Sum
۳	R_CabLen2	نسبت (طول کابل‌های زمینی) Sum به (طول بخش‌ها) Total
۴	R_CabPercen	نسبت (طول کابل‌های زمینی) Sum به (طول کابل‌های زمینی) Total
۵	R_OverPercen	نسبت (طول خطوط هوایی) Sum به (طول خطوط هوایی) Total
۶	N_LatLen	نسبت (طول انشعاب) Near به (طول بخش‌ها) Total
۷	Norm_LatLen	(طول انشعاب) Norm
۸	T_CabLen	(طول کابل‌های زمینی) Total
۹	T_OverLen	(طول خطوط هوایی) Total
۱۰	T_Len	(طول بخش‌ها) Total
۱۱	N_Load	نسبت (توان الکتریکی مصرفی) Near به (توان الکتریکی مصرفی) Total
۱۲	Norm_Load	(توان الکتریکی مصرفی) Norm
۱۳	R_LoadDens	نسبت (توان الکتریکی) Sum به (طول بخش‌ها) Sum (مصرفی)
۱۴	R_LoadPercen	نسبت (توان الکتریکی مصرفی) Sum به (توان الکتریکی مصرفی) Total
۱۵	T_load	(توان الکتریکی مصرفی) Total
۱۶	LoadDens	نسبت (توان الکتریکی مصرفی) Total به (طول بخش‌ها) Total
۱۷	N_Cus	نسبت (تعداد مشترکین) Near به (تعداد مشترکین) Total
۱۸	Norm_Cus	(تعداد مشترکین) Norm
۱۹	R_CusPercen	نسبت (تعداد مشترکین) Sum به (تعداد مشترکین) Total
۲۰	T_Cus	(تعداد مشترکین) Total
۲۱	CusDens	نسبت (تعداد مشترکین) Total به (طول بخش‌ها) Total
۲۲	N_ENS	نسبت (انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Near به (انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Total
۲۳	N_UnAva	نسبت (عدم دسترس‌پذیری) Near به (عدم دسترس‌پذیری) Total
۲۴	Norm_ENS	(انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Norm
۲۵	R_ENSDens	نسبت (انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Sum به (طول بخش‌ها) Sum
۲۶	R_ENSPercen	نسبت (انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Sum به (انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Total
۲۷	T_ENS	(انرژی تأمین‌نشده قبل از نصب کلید جدید) Total
۲۸	Position	مکان نقطه کاندیدا: یک: ابتدای یک بخش اصلی، صفر: انتهای یک بخش اصلی، دو: ابتدای یک بخش فرعی
۲۹	InCab	آیا نقطه کاندیدا در یک بخش متشکل از کابل زمینی قرار دارد؟ یک: بله، صفر: خیر
۳۰	LatCab	آیا انشعاب نزدیک به نقطه کاندیدا متشکل از کابل زمینی است؟ یک: بله، صفر: خیر
۳۱	InMain	آیا نقطه کاندیدا در یک بخش اصلی قرار دارد؟ یک: بله، صفر: خیر
۳۲	T_LoadPoint	(نقاط کاندیدا) Total
۳۳	T_CanPointInMain	(نقاط کاندیدا روی بخش‌های اصلی) Total
۳۴	FeederType	نسبت (طول کابل‌های زمینی) Total به (طول بخش‌ها) Total
۳۵	R_PD	نسبت (تجهیزات کلیدزنی حفاظتی) Sum به (تجهیزات کلیدزنی حفاظتی) Total
۳۶	R_CD	نسبت (تجهیزات کلیدزنی کنترلی) Sum به (تجهیزات کلیدزنی کنترلی) Total
۳۷	R_Br	نسبت (بریکر) Sum به (بریکر) Total
۳۸	R_Fu	نسبت (فیوز) Sum به (فیوز) Total
۳۹	R_RCS	نسبت (کلید کنترل از راه دور) Sum به (کلید کنترل از راه دور) Total

شماره	نام ویژگی	فرمول محاسبه ویژگی
۴۰	R_MS	نسبت (کلید دستی) Sum به (کلید دستی) Total
۴۱	R_SD	نسبت (تجهیزات کلیدزنی) Sum به (تجهیزات کلیدزنی) Total
۴۲	T_Br	Total (بریکر)
۴۳	T_Fu	Total (فیوز)
۴۴	T_RCS	Total (کلید کنترل از راه دور)
۴۵	T_MS	Total (کلید دستی)
۴۶	Fu_InNext	آیا در ابتدای انشعاب بعد از نقطه کاندیدا فیوز وجود دارد؟ یک: بله، صفر: خیر
۴۷	Fu_InPre	آیا در ابتدای انشعاب قبل از نقطه کاندیدا فیوز وجود دارد؟ یک: بله، صفر: خیر
۴۸	Switch_InSec	آیا در بخشی که نقطه کاندیدا روی آن قرار دارد کلیدی از قبل نصب شده است؟ یک: بله، صفر: خیر
۴۹	SwitchDens	نسبت (تجهیزات کلیدزنی) Total به (طول بخش ها) Total

جدول (۲): معرفی اپراتورهای به کار گرفته شده در تعریف

ویژگی های نقاط کاندیدا

اپراتور	تعریف
Sum(Z)	مجموع Z از ابتدای فیدر تا نقطه کاندیدا
Total(Z)	مجموع Z در کل فیدر
Near(Z)	مقدار Z مربوط به نزدیک ترین نقطه بار به نقطه کاندیدا
Norm(Z)	نرمال شده مقدار Z مربوط به نزدیک ترین نقطه بار به نقطه کاندیدا

۲-۳- آموزش مدل داده محور جایگزین

مدل داده محور جایگزین شامل مدل های دسته بندی پایه و فرامدل است. برای آموزش مدل های دسته بندی پایه، مراحل زیر باید دنبال شوند:

مرحله ۱) فیدرهای توزیع مختلف با ساختار متفاوت مدل سازی شوند.

مرحله ۲) مدل ریاضی مکان یابی تجهیزات کلیدزنی روی هر فیدر تولید شده در مرحله ۱ اجرا شود تا مکان بهینه بریکرها، RCSها و MSها در هر فیدر تعیین شود. از آنجا که مدل ریاضی پایه روی یک فیدر اجرا می شود، حل کننده های موجود می توانند آن را حل کنند.

مرحله ۳) ویژگی های نقاط کاندیدا بر اساس اطلاعات فیدرها در مرحله ۱ قابل محاسبه هستند. در مرحله ۲، تجهیز بهینه برای نصب در نقاط کاندیدا نیز مشخص می شود؛ بر همین اساس، جفت های ورودی - خروجی برای آموزش مدل های دسته بندی پایه ساخته شوند.

مرحله ۴) ویژگی های مهم از میان ویژگی های

معرفی شده در جدول (۱) برای ساخت مدل های دسته بندی پایه انتخاب شوند. در این راستا، از ابزارهای هوش مصنوعی تفسیرپذیر برای برآورد میزان مشارکت هر ویژگی در پیش بینی نوع تجهیز مناسب برای نصب در هر نقطه کاندیدا استفاده شود. در این مقاله، از روش Shapley Additive Explanations یا SHAP برای محاسبه ضریب مشارکت هر ویژگی در تولید خروجی و انتخاب ویژگی های مهم برای مدل های دسته بندی پایه استفاده شده است. به طور کل، SHAP روشی است که برای تفسیر پیش بینی های مدل های یادگیری ماشین استفاده می شود. ایده کلیدی SHAP محاسبه مقادیر Shapley برای هر ویژگی در مجموعه داده آموزش یک مدل یادگیری ماشین است. در این راستا، هر مقدار Shapley نشان دهنده مشارکتی است که هر ویژگی در تولید پیش بینی مدل یادگیری ماشین دارد. به عبارت دیگر، مقادیر Shapley میزان تأثیر هر ویژگی در تولید خروجی را نشان می دهند. این ضرایب مشارکت با یکدیگر جمع می شوند و پیش بینی مدل یادگیری ماشین برای نمونه ای مشخص را نشان می دهند. هر چقدر مقدار Shapley برای یک ویژگی بزرگتر از مقدار آن برای مابقی ویژگی ها باشد، نشان دهنده آن است که آن ویژگی تأثیری بیشتر بر خروجی نسبت به دیگر ویژگی ها دارد. برای انتخاب ویژگی های مهم به منظور ساخت مدل های دسته بندی پایه، در ابتدا، ویژگی ها بر اساس ضریب مشارکت آن ها مرتب و سپس، ویژگی ها با ضریب مشارکت زیاد انتخاب می شوند. در این مقاله، ۲۵ ویژگی با بیشترین ضریب مشارکت انتخاب شده اند و مابقی ویژگی ها که

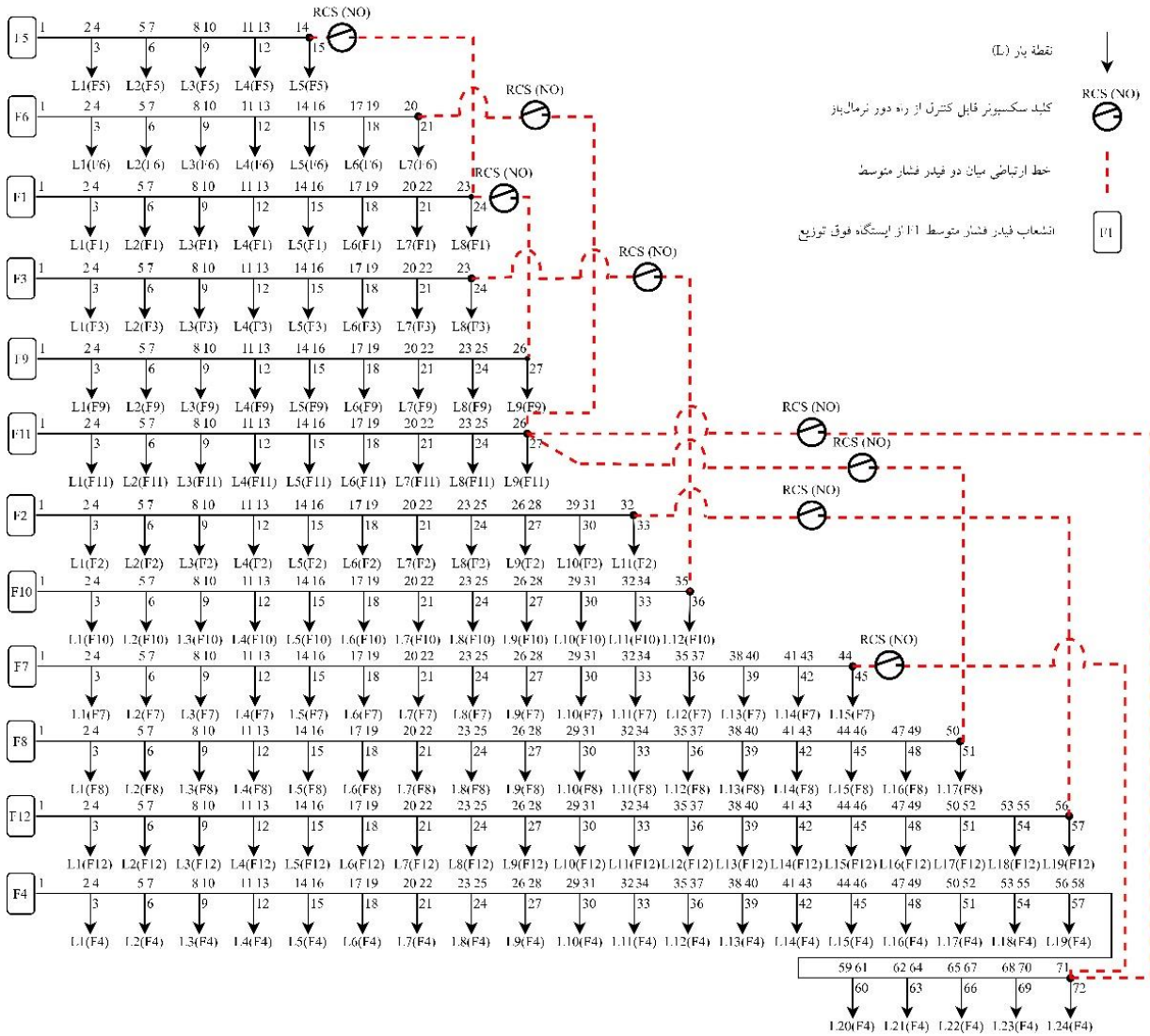
دسته‌بندی چندکلاسی است. خروجی فرامدل الف) نصب بریکر، ب) نصب RCS، پ) نصب MS و ت) عدم نصب تجهیز در نقطه کاندیدا است.

مشارکتی نزدیک به صفر داشته‌اند، حذف شده‌اند. مرحله ۵) بر اساس ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر مدل و اطلاعات مکان‌های بهینه هر تجهیز کلیدزنی، مدل‌های دسته‌بندی پایه آموزش داده شوند.

۴- ارزیابی عددی

در این بخش، روش داده‌محور پیشنهادی از نظر پیچیدگی محاسباتی و رسیدن به جواب بهینه با مدل بهینه‌سازی کلاسیک مقایسه می‌شود.

مرحله ۶) مطابق مراحل ۱ تا ۵، مدل‌های دسته‌بندی پایه آموزش داده شوند و وزن‌های آن‌ها ذخیره شوند. پس از آموزش مدل‌های دسته‌بندی پایه، از آن‌ها برای تولید ورودی‌های فرامدل استفاده می‌شود. فرامدل با پردازش اطلاعات ورودی خود، کلاس مناسب برای نقطه کاندیدای تحت بررسی را نشان می‌دهد. فرامدل مبتنی بر



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم ۱۴۴ نقطه بار نمونه

۱۰ مدلی مقیاس‌پذیر مبتنی بر یادگیری گروهی برای جایابی بهینه کلید بریکر و سکسیونر در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی

۱-۴- معرفی سیستم ۱۴۴ نقطه بار نمونه

هدف به ترتیب ۰/۵۱۶، ۰/۲۱۷ و ۰/۲۶۷ در نظر گرفته شده است. ^{۱۷} در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی ۰/۵ لحاظ شده است.

در این مقاله، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی [۲۷] برای انتخاب وزن‌های شاخص‌های قابلیت اطمینان استفاده شده است. مطابق این روش، در ابتدا، پرسشنامه‌هایی توسط بهره‌برداران سیستم توزیع توان الکتریکی تکمیل می‌شوند که نشان‌دهنده اهمیت نسبی شاخص‌های قابلیت اطمینان برای بهره‌برداران هستند. سپس، بر اساس پرسشنامه‌های تکمیل‌شده و تحلیل آن‌ها، وزن‌های شاخص‌های قابلیت اطمینان به‌ازای نظر هر بهره‌بردار تعیین می‌شوند. گفتنی است، با محاسبه نرخ سازگاری، از همخوانی پاسخ‌های داده‌شده توسط هر بهره‌بردار اطمینان حاصل می‌شود. پس از ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده، در نهایت، وزن‌های استخراج‌شده از نظر بهره‌برداران با استفاده از میانگین هندسی با یکدیگر ادغام می‌شوند و وزن‌های نهایی به دست می‌آیند.

در این مقاله، مدل‌های بهینه‌سازی کلید روی سیستم توزیع نمونه ۱۱ کیلوولت در استان فارس اجرا و نتایج مقایسه می‌شوند. سیستم تحت مطالعه ۱۲ فیدر توزیع فشار متوسط را شامل می‌شود که از یک ایستگاه فوق توزیع تأمین می‌شوند. در مجموع، ۱۴۴ نقطه بار تأمین می‌شوند. اطلاعات سیستم ۱۴۴ نقطه بار نمونه شامل میزان توان اکتیو و راکتیو مصرفی نقاط بار، تعداد مشترکین نقاط بار، طول و نوع بخش‌های اصلی و فرعی را می‌توان در مرجع [۲۳] یافت. شکل (۳) دیاگرام تک‌خطی سیستم ۱۴۴ نقطه بار نمونه را نشان می‌دهد. در شکل (۳)، خطوط ارتباطی که مجهز به یک RCS نرمال باز هستند، با خط‌چین نمایش داده شده‌اند. همچنین، نقاط بار و مکان‌های کاندیدا برای نصب تجهیزات کلیدزنی در هر فیدر با شماره مربوط نشان داده شده‌اند.

۲-۴- فرضیه‌ها و پارامترها

۳-۴- ساخت مدل داده‌محور جایگزین

در این مقاله، بیش از ۶۰۰۰ نمونه مربوط به نقاط کاندیدای فیدرهای توزیع مختلف تولید شده‌اند. برای ارزیابی دقت مدل‌ها، ۲۰ درصد داده‌ها به عنوان آزمایش به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌سازی بیزی ^{۱۳} برای تعیین نوع و تعداد لایه‌ها، تابع تبدیل نورون‌ها، نرخ خروج نورون‌ها، روش وزندهی اولیه و نرخ یادگیری مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. گفتنی است، تعداد نورون‌ها و تابع تبدیل آن‌ها در لایه خروجی مدل‌های داده‌محور به نوع مدل وابسته است. در مدل‌های دسته‌بندی پایه، یک نورون در لایه خروجی با تابع تبدیل سیگموئید قرار دارد. در فرامدل، چهار نورون در لایه خروجی قرار دارند که تابع تبدیل آن‌ها بیشینه‌هموار ^{۱۴} است.

۴-۴- نتایج عددی و تحلیل آن‌ها

در این مقاله، معیار امتیاز $F1^{15}$ به عنوان معیار ارزیابی مدل داده‌محور جایگزین در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، ماتریس‌های درهم‌ریختگی ^{۱۶} برای پیش‌بینی مکان‌های

در این مقاله، نرخ خرابی خطوط هوایی و کابل‌های زمینی به ترتیب ۰/۰۶۵ و ۰/۰۴۰ خرابی در هر سال در هر کیلومتر در نظر گرفته شده است [۲۴]. همچنین، تعمیر خطوط هوایی و کابل‌های زمینی به ترتیب سه و دوازده ساعت طول می‌کشد [۲۴]. مقاومت خطوط هوایی و کابل‌های زمینی ۰/۵ و ۰/۳ و راکتانس آن‌ها به ترتیب ۰/۴ و ۰/۲ اهم در هر کیلومتر است. ضریب توان مشترکین ۰/۸۵ فرض شده است. عملیات کلیدزنی دستی و کنترل از راه دور به ترتیب یک ساعت و پنج دقیقه طول می‌کشد [۲۵]. هزینه‌های خرید و نصب یک بریکر، RCS و MS به ترتیب ۶۰۰۰، ۴۷۰۰ و ۳۴۰۰ دلار در نظر گرفته شده است [۲۵]. هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه تجهیزات کلیدزنی ۲ درصد هزینه‌های خرید و نصب آن‌ها فرض شده است [۲۵]. نرخ نزول بهره ۸ درصد لحاظ شده است [۲۵]. بودجه برای خرید و نصب تجهیزات کلیدزنی ۱۵۰۰۰۰ دلار فرض شده است. افق برنامه‌ریزی ۱۵ سال است [۲۵]. گفتنی است، مقادیر بالا میانگین سالانه هستند. مطابق مراجع [۲۶] و [۲۷]، وزن شاخص‌های SAIFI، SAIDI، ENS و SAIPI در تابع

بهینه بریکرها، RCSها و MSها توسط مدل داده محور جایگزین در شکل (۴) گزارش شده اند. مطابق شکل (۴)، معیارهای پوشش^{۱۷}، صحت^{۱۸} و امتیاز F1 برای پیش بینی کلاس نصب بریکر، به ترتیب برابر ۸۰/۶۴، ۶۶/۳۷ و ۷۲/۸۱ درصد هستند. به عبارت دیگر، ۸۰/۶۴ درصد از نقاط بهینه برای نصب بریکر به درستی توسط مدل داده محور جایگزین پیش بینی شده اند. همچنین، ۶۶/۳۷ درصد از نقاطی که توسط مدل داده محور جایگزین برای نصب بریکر پیشنهاد شده اند، مکان های بهینه بوده اند. به همین صورت، معیار پوشش برای پیش بینی کلاس های نصب RCS، MS و عدم نصب تجهیز، به ترتیب برابر ۷۴/۰۰، ۷۷/۹۷ و ۹۷/۸۱ درصد است. برای مثال، این نتایج نشان می دهند برای ۹۷/۸۱ درصد از نقاطی که برای نصب تجهیز مناسب نبوده اند، به درستی کلاس عدم نصب کلید پیش بینی شده است. معیار صحت برای پیش بینی کلاس های نصب RCS، MS و عدم نصب تجهیز، به ترتیب برابر ۷۵/۵۰، ۷۹/۰۴ و ۹۸/۱۰ درصد است. مطابق این نتایج، در ۹۸/۱۰ از نقاطی که برای آن ها کلاس عدم نصب کلید پیش بینی شده است، نصب کلید بهینه نبوده است. متوسط معیار امتیاز F1 برای چهار کلاس که دقت مدل داده محور جایگزین را نشان می دهد، برابر ۸۱/۰۰ درصد است که دقتی مناسب است.

بهینه بریکرها، RCSها و MSها توسط مدل داده محور جایگزین در شکل (۴) گزارش شده اند. مطابق شکل (۴)، معیارهای پوشش^{۱۷}، صحت^{۱۸} و امتیاز F1 برای پیش بینی کلاس نصب بریکر، به ترتیب برابر ۸۰/۶۴، ۶۶/۳۷ و ۷۲/۸۱ درصد هستند. به عبارت دیگر، ۸۰/۶۴ درصد از نقاط بهینه برای نصب بریکر به درستی توسط مدل داده محور جایگزین پیش بینی شده اند. همچنین، ۶۶/۳۷ درصد از نقاطی که توسط مدل داده محور جایگزین برای نصب بریکر پیشنهاد شده اند، مکان های بهینه بوده اند. به همین صورت، معیار پوشش برای پیش بینی کلاس های نصب RCS، MS و عدم نصب تجهیز، به ترتیب برابر

مقادیر واقعی	صفر	۹۷
	یک	۸۷۵۱
پیش بینی ها	صفر	۲۹۹
	یک	۱۰۵

(ب)

مقادیر واقعی	صفر	۳۸
	یک	۹۱۲۱
پیش بینی ها	صفر	۷۵
	یک	۱۸

(الف)

مقادیر واقعی	صفر	۱۶۰
	یک	۶۳۲
پیش بینی ها	صفر	۸۲۷۵
	یک	۱۸۵

(ت)

مقادیر واقعی	صفر	۶۱
	یک	۸۸۹۶
پیش بینی ها	صفر	۲۳۰
	یک	۶۵

(پ)

شکل (۴): ماتریس درهم ریختگی مربوط به مدل داده محور جایگزین برای پیش بینی کلاس های الف) نصب بریکر، ب) نصب RCS، پ) نصب MS و ت) عدم نصب کلید

کلیدگذاری پیشنهاد شده، میزان بهبود در تابع هدف مسئله بهینه سازی پس از اجرای طرح های پیشنهادی محاسبه و در جدول (۴) گزارش شده است. مطابق جدول (۴)، طرح کلیدگذاری به دست آمده از مدل کلاسیک باعث بهبود ۳۸/۳۰ درصد تابع هدف نسبت به مقدار آن قبل از کلیدگذاری می شود. همچنین، طرح کلیدگذاری به دست آمده از مدل داده محور جایگزین به ۳۱/۳۰ درصد بهبود تابع هدف منجر می شود. گفتنی است، در سیستم ۱۴۴ نقطه بار

در ادامه، مدل داده محور جایگزین و مدل کلاسیک روی سیستم توزیع ۱۴۴ نقطه بار نمونه اجرا و نتایج مقایسه می شوند. در جدول (۳)، مکان های تجهیزات کلیدزنی موجود به همراه مکان های تجهیزات جدید با به کارگیری مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک گزارش شده است. مطابق جدول (۳)، برخی از نقاط پیش بینی شده با مدل داده محور جایگزین یکسان یا نزدیک به نقاط به دست آمده از مدل کلاسیک هستند. برای ارزیابی اثربخشی طرح های

۱۲ مدلی مقیاس پذیر مبتنی بر یادگیری گروهی برای جایابی بهینه کلید بریکر و سکسیونر در سیستم های توزیع توان الکتریکی

نمونه، روش کلاسیک به جواب بهینه عمومی رسیده است؛ با این حال، رویکرد پیشنهادی با خطایی حدود ۷ درصد، به جوابی نزدیک به بهینه عمومی رسیده است. همچنین، از نظر زمان اجرا، رویکرد پیشنهادی بسیار سریع تر از مدل کلاسیک است. از سوی دیگر، با افزایش ابعاد سیستم

توزیع، روش کلاسیک به دلیل محدودیت منابع محاسباتی ناکارآمد خواهد شد؛ در حالی که زمان اجرا و بار محاسباتی روش پیشنهادی با افزایش ابعاد سیستم چندان تغییر نخواهند کرد.

جدول (۳): مکان های نصب تجهیزات کلیدزنی در سیستم توزیع ۱۴۴ نقطه بار نمونه

# فیدر	مکان تجهیزات موجود				مدل مبتنی بر الگوریتم کلاسیک			مدل داده محور پیشنهادی		
	بریکر	فیوز	RCS	MS	بریکر	RCS	MS	بریکر	RCS	MS
۱	-	-	۸	۱۰	-	-	-	-	۵	-
۲	-	۲۱، ۱۸	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	-	-	-	-	-	-	۷، ۵	-	۷	-
۴	۳۲	۵۷، ۱۵، ۹	۵۶	-	-	-	-	-	-	-
۵	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۱	-
۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۷	-	-	-	۱۴	-	-	-	-	۲۶	-
۸	-	۳۳	-	۲۹، ۱۳	-	-	-	-	۲۶	-
۹	-	-	-	-	-	-	۱۱	-	-	۸
۱۰	-	۱۲	-	۳۲	-	-	۱۷	-	-	-
۱۱	-	-	۱۰	-	-	-	۲۳	-	۲۳	-
۱۲	۱۶	۳۰، ۱۵	۵۰	۲۶	-	-	-	-	-	-

- بهینگی: اگرچه روش کلاسیک می تواند به راه حل بهینه عمومی در سیستم های مقیاس کوچک دست یابد، در سیستم های بزرگ ناکارآمد است؛ در حالی که رویکرد پیشنهادی به یک راه حل نزدیک به بهینه عمومی هنگام اجرا روی سیستم های بزرگ می رسد.
- زمان اجرا: استفاده از روش های یادگیری ماشین به طرز چشمگیر باعث کاهش زمان اجرای حل مسئله می شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی مبتنی بر یادگیری ماشین گروهی آموزش داده شد که به طور مستقیم مکان بهینه نصب بریکر، سکسیونر قابل کنترل از راه دور و سکسیونر دستی را پیش بینی می کند. نتایج مطالعات عددی نشان داد روش داده محور پیشنهادی مکان بهینه تجهیزات کلیدزنی را در

جدول (۴): مقایسه بین نتایج به دست آمده از اجرای مدل ها

روی سیستم توزیع ۱۴۴ نقطه بار نمونه

مدل	میزان بهبود در تابع هدف نسبت به قبل از کلیدگذاری (درصد)	زمان اجرا (دقیقه)
مدل کلاسیک	۳۸/۳۰	۹۶
مدل داده محور پیشنهادی	۳۱/۳۰	کمتر از یک دقیقه

در ادامه، جمع بندی از نتایج به دست آمده از منظرهای مختلف ارائه شده است:

- مقیاس پذیری: با افزایش اندازه ابعاد سیستم، روش کلاسیک نمی تواند مسئله جایابی را حل کند؛ در حالی که زمان حل رویکرد پیشنهادی نسبت به تغییر ابعاد سیستم چندان تغییر نمی کند. این مطلوبیت محاسباتی رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یادگیری ماشین را در حل مسئله برای سیستم های توزیع بزرگ تر و پیچیده تر نشان می دهد.

- [6] D. Xie, M. Liu, L. Xu, W. Lu, "Optimal Coordinated Configuration of Distributed Generations and Sectionalizing Switches Using Bi-level Programming Approach", 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), pp. 734-739, 2020.
- [7] M. Isapour Chehardeh, C. Hatziaioniu, "Optimal Placement of Remote-Controlled Switches in Distribution Networks in the Presence of Distributed Generators", *Energies*, Vol. 12, No. 6, p. 1025, 2019.
- [8] M. Zare-Bahramabadi, M. Ehsan, H. Farzin, "An MILP Model for Switch, DG, and Tie Line Placement to Improve Distribution Grid Reliability", *IEEE Systems Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 1316-1327, 2023.
- [9] S. Azarhazin, H. Farzin, E. Mashhour, "An MILP Model for Reliability-Based Placement of Recloser, Sectionalizer, and Disconnect Switch Considering Device Relocation", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 35, p. 101127, 2023.
- [10] P. Salyani, R. Nourollahi, K. Zare, R. Razzaghi, "A New MILP Model of Switch Placement in Distribution Networks with Consideration of Substation Overloading During Load Transfer", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 32, p. 100944, 2022.
- [11] Z. Galias, "Tree-Structure Based Deterministic Algorithms for Optimal Switch Placement in Radial Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 6, pp. 4269-4278, 2019.
- [12] M. Safari, M. Haghifam, M. Zangiabadi, "A Hybrid Method for Recloser and Sectionalizer Placement in Distribution Networks Considering Protection Coordination, Fault Type and Equipment Malfunction", *IET Generation, Transmission, and Distribution*, Vol. 15, No. 15, pp. 2176-2190, 2019.
- [13] M. Shafik, H. Chen, G. Rashed, "Planning and Reliability Assessment to Integrate Distributed Automation System into Distribution Networks Utilizing Binary Hybrid PSO and GSA Algorithms Considering Uncertainties", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 30, No. 11, p. e12594, 2020.
- [14] F. Leite, A. Gomes, L. Melo, R. Sampaio, R. Leão, G. Barroso, J. Bezerra, "Efficient Switch Placement for Power Distribution Systems using Pareto Optimality Multiobjective Function", 2019.
- [15] H. Gholizade-Narm, Y. Damchi, M. Ghorbani Jouybari, "Optimal Switch Placement in Real Distribution Network considering Cut-out Fuses, the Importance of Feeders and Ring Points in the Presence of Distributed Generation using Improved Bee Algorithm (Case Study: Mazandaran Distribution Network)", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 4, Januray 2020.
- [16] M. Abedini, R. Eskandari, J. Ebrahimi, M. H. Zeinali, A. Alahyari, "Optimal Placement of Power Switches on Malayer Practical Feeder to Improve System Reliability Using Hybrid Particle

چند تانیه برای یک سیستم توزیع نمونه واقعی پیش‌بینی می‌کند؛ در حالی که روش مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی ترکیب شده با عدد صحیح بعد از ۹۶ دقیقه به جواب نهایی رسید. همچنین، نتایج نشان داد جواب پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی کمتر از ۷ درصد تا جواب بهینه عمومی فاصله دارد. گفتنی است، بار محاسباتی روش کلاسیک با افزایش ابعاد سیستم به صورت نمایی افزایش می‌یابد و مقیاس پذیر نیست؛ در حالی که روش داده‌محور پیشنهادی در هر سیستمی قابل اجرا است؛ بنابراین، روش داده‌محور پیشنهادی بهره‌برداران سیستم قدرت را قادر می‌سازد تا مسئله جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی را در سیستم‌های واقعی بزرگ بدون استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ریاضی حل کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۱۳۲۰۳» انجام شده است.

مراجع

- [1] A. Shahbazian, A. Fereidunian, S. D. Manshadi, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems: A High-Accuracy MILP Formulation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 11, No. 6, pp. 5009-5018, 2020.
- [2] T. Zhang, C. Wang, F. Luo, P. Li, L. Yao, "Optimal Design of the Sectional Switch and Tie Line for the Distribution Network Based on the Fault Incidence Matrix", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 6, pp. 4869-4879, 2019.
- [3] M. Jooshaki, S. Karimi-Arpanahi, M. Lehtonen, R. J. Millar, M. Fotuhi-Firuzabad, "An MILP Model for Optimal Placement of Sectionalizing Switches and Tie Lines in Distribution Networks With Complex Topologies", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 12, No. 6, pp. 4740-4751, 2021.
- [4] P. Gangwar, S. Keshewani, S. Chakrabarti, S. N. Singh, "Multiobjective Multiscenario Framework for RCS Placement in Unbalanced Distribution Systems Considering Uncertainty", *IEEE Systems Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 2811-2821, 2022.
- [5] N. Gholizadeh, S. Hosseinian, M. Abedi, H. Nafisi, P. Siano, "Optimal Placement of Fuses and Switches in Active Distribution Networks Using Value-Based MINLP", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 217, p. 108075, 2022.

- Systems: A MIP Model", IEEE Access, Vol. 7, pp. 122827-122837, 2019.
- [23] M. Ebrahimi, M. Rastegar, "Sample 11 kV substation data", 15 Mar. 2023. [Online]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/1JmmbgNqBKJx_Bby8dK1KLCKAhi2x4k-j?usp=share_link. [Accessed 15 Mar 2023].
- [24] M. Jooshaki, S. Karimi-Arpanahi, M. Lehtonen, R. J. Millar, M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability-Oriented Electricity Distribution System Switch and Tie Line Optimization", IEEE Access, Vol. 8, pp. 130967-130978, 2020.
- [25] M. Izadi, A. Safdarian, M. Moeini-Aghaie, M. Lehtonen, "Optimal Placement of Protective and Controlling Devices in Electric Power Distribution Systems: A MIP Model", IEEE Access, Vol. 7, pp. 122827-122837, 2019.
- [26] M. Amohadi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Placement of Switching and Protection Devices in Radial Distribution Networks to Enhance System Reliability using the AHP-PSO Method", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol. 27, No. 1, pp. 181-196, 2019.
- [27] R. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process—What It is and How It Is Used", Mathematical Modelling, Vol. 9, No. 3-5, pp. 161-176, 1987.
- Swarm Optimization with Sinusoidal and Cosine Acceleration Coefficients", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 11, No. 2, July 2020.
- [17] M. Gao, J. Yu, Z. Yang, J. Zhao, "A Physics-Guided Graph Convolution Neural Network for Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 39, No. 1, pp. 380-390, 2024.
- [18] J. Wu, P. B. Luh, Y. Chen, B. Yan, M. A. Bragin, "Synergistic Integration of Machine Learning and Mathematical Optimization for Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 39, No. 1, pp. 391-401, 2024.
- [19] T. Han, D. J. Hill, "Learning-Based Topology Optimization of Power Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 38, No. 2, pp. 1366-1378, 2023.
- [20] Z. Yin, X. Ji, Y. Zhang, Q. Liu, X. Bai, "Data-Driven Approach for Real-Time Distribution Network Reconfiguration", IET Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 14, No. 13, pp. 2450-2463, 2020.
- [21] M. Rastegar, "Impacts of Residential Energy Management on Reliability of Distribution Systems Considering a Customer Satisfaction Model", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 6, pp. 6062-6073, 2018.
- [22] M. Izadi, A. Safdarian, M. Moeini-Aghaie, M. Lehtonen, "Optimal Placement of Protective and Controlling Devices in Electric Power Distribution

-
- ¹ Remote-controlled switch
² Manual switch
³ Branch-and-bound
⁴ Branch-and-cut
⁵ Cutting-plane
⁶ Expected energy not supplied
⁷ System average interruption frequency index
⁸ System average interruption duration index
⁹ Mixed-integer linear programming
¹⁰ Ensemble learning
¹¹ Meta-model
¹² Blender
¹³ Bayesian
¹⁴ Softmax
¹⁵ F1-score
¹⁶ Confusion matrix
¹⁷ Recall
¹⁸ Precision