

Fuzzy Modeling of the Effects of Effective Factors on Non-technical Loss Reduction of Electrical Energy Distribution

Amirhossein Abdolalipour¹, Sajad Samsami²

1. Assistant Prof, Department of Industrial Management, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy, Iran.(Corresponding Author)
amirhpour@iau.ir
2. MSc. in MBA, Department of Management, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy,Iran.
sajjadsamsami82@gmail.com

Abstract

The objective of the present study is to design a framework for evaluating the impact of factors influencing the reduction of non-technical losses in electrical energy. The research method employed is exploratory-theoretical modeling, which has been practically implemented and validated within the West Azerbaijan Power Distribution Company. Through the analysis of non-technical loss statistics and expert interviews with professionals in the electricity distribution sector, the factors of “consumption damage” (arising from both overt and covert unauthorized electricity usage) and “consumption difference” (resulting from the replacement of faulty meters and calculation errors) were identified as system inputs, while “non-technical losses” of electrical energy were defined as the output of the proposed fuzzy system. Various membership functions—including Gaussian, bell-shaped, S-shaped, Z-shaped, and triangular—were utilized to determine the degree of membership for verbal input and output variables within fuzzy sets. By applying 21 final rules and considering the centroid of fuzzy sets, the system was able to generate clear and actionable outputs. Ultimately, the fuzzy system was validated through comprehensive rule testing and overall model evaluation. Sensitivity analysis revealed that the implemented fuzzy inference system effectively captured the logical relationships between inputs and outputs. The results of the modeling and sensitivity analysis indicated that the “consumption difference” variable (stemming from measurement and calculation errors) exhibits the highest sensitivity in reducing non-technical losses; thus, addressing this factor can significantly enhance the operational performance indicators of the network.

Keywords: Fuzzy Inference, Electric Energy, Consumption Difference, Non-Technical losses, Consumption Damage, West Azerbaijan Power Distribution Company.

Date of sending: 2024/06/01
Acceptance date: 2025/08/10

Corresponding author's name: Amirhossein Abdolalipour

Corresponding author's address: Department of Industrial Management, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy, Iran

مدل سازی فازی تأثیر عوامل مؤثر بر کاهش تلفات غیر فنی توزیع انرژی الکتریکی

نوع مطالعه: پژوهشی

امیرحسین عبدالعلی پور^۱، سجاد صمصامی^۲

1. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران (نویسنده مسئول).

amirhpour@iau.ir

2. دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

sajjadsamsami82@gmail.com

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر طراحی الگویی جهت ارزیابی تأثیر عوامل مؤثر بر کاهش تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی است. روش پژوهش حاضر برای مدل سازی اکتشافی - نظری است و به منظور صحت گذاری به صورت کاربردی در شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان غربی پیاده سازی شده است. با بررسی آمارهای تلفات غیر فنی و مصاحبه با خبرگان بخش توزیع انرژی الکتریکی، عوامل صدور «خسارت مصرف» انرژی از بابت استفاده غیرمجاز از برق به صورت آشکار و پنهان و صدور «تفاوت مصرف» انرژی از بابت تعویض کنتورهای معیوب و اشتباه در محاسبات به عنوان دروندادهای سیستم و «تلفات غیر فنی» انرژی الکتریکی به عنوان برون داد سیستم فازی مذکور تعیین گردید. از توابع عضویت مختلف گاوسین، زنگوله ای، S شکل، Z شکل و مثلثی برای تعیین درجه عضویت متغیرهای کلامی ورودی ها و خروجی ها به مجموعه های فازی استفاده گردید. با استفاده از ۲۱ قانون نهایی و با در نظر گرفتن مرکز ثقل مجموعه های فازی، خروجی واضح و قابل اجرا برای سیستم فراهم گردید. نهایتاً با بهره گیری از آزمون تمام قوانین و آزمون کل مدل، سیستم فازی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و با واکاوی حساسیت، مشخص گردید که سیستم استنتاج فازی بکار رفته، روابط منطقی بین دروندادها و برون داد را به نمایش می گذارد. نتایج مدل سازی و تحلیل حساسیت نشان داد که متغیر «تفاوت مصرف» (ناشی از خطاهای اندازه گیری و محاسباتی) بیشترین حساسیت را در کاهش تلفات غیر فنی دارد و اصلاح این عامل می تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود شاخص های عملکردی شبکه داشته باشد.

واژه های کلیدی: استنتاج فازی، انرژی الکتریکی، تفاوت مصرف، تلفات غیر فنی، خسارت مصرف، شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان غربی،

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

نام نویسنده مسئول: امیر حسین عبدالعلی پور

نشانی نویسنده مسئول: گروه مدیریت صنعتی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی

1. مقدمه

امروزه بخش قابل ملاحظه‌ای از تلفات صنعت برق کشور به تلفات غیر فنی شبکه اختصاص دارد. تلفات غیر فنی در سیستم توزیع برق به انرژی مؤثر عرضه شده اما اندازه‌گیری نشده یا ثبت نشده تجاری اشاره دارد (پیریا و همکاران، ۲۰۱۶؛ صادقی گرمارودی، ۱۳۹۵) که به صورت استفاده‌های غیرمجاز انرژی (آشکار و پنهان، مستقیم قابل‌رؤیت و غیرقابل‌رؤیت، غیرمستقیم قابل‌رؤیت و غیرقابل‌رؤیت) و ناکارآمدی در اندازه‌گیری مصرف انرژی برق است (بشکنی و اعظمی، ۱۳۹۸؛ رجبی مشهدی، ۱۳۹۵). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این تلفات عمدتاً ناشی از بهره‌برداری غیرمجاز از برق به صورت مخفی یا خرابی کنتورها است (ویگاس^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ شاهی مریدی، موسوی راد، میرحسینی و نیک پور، ۱۴۰۰؛ رجبی مشهدی، ۱۳۹۲). مصرف‌کنندگان غیرمجاز، علاوه بر تلفات اقتصادی ناشی از مصرف رایگان انرژی، باعث افزایش میزان بار عبوری از خطوط و تجهیزات شبکه می‌شوند که این امر به نوبه خود باعث آسیب به تجهیزات، فرسودگی زودرس آن‌ها و درنهایت از بین رفتن مدیریت شبکه می‌گردد (رجبانی و همکاران، ۱۳۹۹).

کاهش تلفات انرژی الکتریکی را به نوعی معادل تولید برق پاک و سبز می‌دانند که به طور مستقیم منجر به کاهش هزینه‌های توزیع برق می‌شود. این کاهش هزینه‌ها می‌تواند ناشی از کاهش میزان برق خریداری شده، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات و کاهش خسارات ناشی از حوادث مرتبط با استفاده غیرمجاز از برق باشد. (مراذخانی و رشیدبیگی، ۱۳۹۸). کاهش تنها یک درصد تلفات انرژی می‌تواند ۱۸۲۰ میلیون کیلووات ساعت انرژی الکتریکی معادل ۶۶۰ میلیون لیتر مصرف سوخت نیروگاهی، ۲/۱ میلیارد دلار نیاز به سرمایه‌گذاری احداث نیروگاه جدید و ۱/۸۲۸ میلیون تن آلاینده‌های زیست‌محیطی را کاهش دهد (صمصامی، ۱۳۹۸).

با وجود تلاش‌های گسترده برای کاهش تلفات فنی، کنترل و کاهش تلفات غیر فنی به دلیل ماهیت پنهان و پیچیده آن همواره یک چالش اساسی برای مدیران صنعت برق بوده است. کمینه کردن تلفات به دلیل عوامل مختلفی مانند خطاهای اندازه‌گیری، خطاهای ثبت، سرعت و تفاوت‌های زمانی چالش‌برانگیز است (ساشیرخا و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده غیرمجاز از برق به صورت پنهان (دست‌کاری لوازم اندازه‌گیری و خارج کردن کنتورها از مدار) می‌تواند منجر به خسارت‌های مالی برای شرکت توزیع برق شود و همچنین مخاطرات

جدی ایمنی و آتش‌سوزی را افزایش دهد. از مهم‌ترین شاخص‌های مرتبط با استفاده غیرمجاز از برق تعداد موارد شناسایی شده استفاده غیرمجاز از برق، میزان خسارت مالی ناشی از این اقدامات غیرقانونی، تعداد پرونده‌های تشکیل شده و مجازات اعمال شده برای متخلفان، میزان انرژی برق مصرف شده به صورت غیرمجاز و تعداد آتش‌سوزی‌ها و حوادث ناشی از دست‌کاری غیرمجاز تجهیزات برقی است.

خسارت مصرف به معنی مصرف انرژی غیرقانونی یا استفاده نادرست از تجهیزات است که منجر به تلفات غیر فنی می‌شود. در سیستم جامع خدمات مشترکین شرکت توزیع، مجموع شاخص‌های استفاده غیرمجاز از برق مذکور با یک آیتام آماری تحت عنوان تعداد و میزان خسارت مصرف اعمال شده شناخته می‌شوند. از آنجائی که شناسایی میزان تلفات و تأثیرات تعویض لوازم اندازه‌گیری و صدور تفاوت مصرف ناشی از خطای کنتور و اشتباه در محاسبات با دقت و صحت مطلوب قابل‌بررسی نیستند و بسیاری از عوامل مرتبط با این موضوع دارای عدم قطعیت هستند، مدل‌سازی فازی می‌تواند با استفاده از مجموعه‌های فازی و قوانین فازی، به تحلیل و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده مانند تلفات غیر فنی شبکه‌های توزیع برق بپردازد... در شرکت‌های توزیع نیروی برق، نرم‌افزار سیستم جامع خدمات مشترکین جهت مکانیزه کردن تمامی فرآیندهای دسترسی مشترکین به انرژی تعبیه شده است. در این سیستم، شاخص‌های تعویض لوازم اندازه‌گیری و صدور تفاوت مصرف ناشی از خطای کنتور و اشتباه در محاسبات و صدور تفاوت مصرف ناشی از اشتباه در ضرایب نیز با یک آیتام آماری تحت عنوان تعداد و میزان تفاوت مصرف اعمال شده شناخته می‌شوند.

از بررسی متغیر «عدم قرائت و قرائت صحیح یا غلط» به عنوان یکی از عوامل غیر فنی تلفات انرژی بجهت اینکه قرائت‌های بعدی صحیح می‌تواند اثر قرائت اشتباه قبل از خود را جبران کند، صرف‌نظر گردید. این متغیر در آمار تلفات سالانه معمولاً تأثیری ندارد. مگر اینکه قرائت اشتباه بیش از یک سال ادامه داشته باشد که امری بعید است.

با توجه به سهم قابل توجه تلفات غیر فنی در شبکه توزیع برق کشور و پیامدهای اقتصادی و فنی ناشی از آن، شناسایی و ارزیابی دقیق عوامل مؤثر بر این نوع تلفات اهمیت ویژه‌ای دارد. بخش عمده‌ای از این تلفات ناشی از دو عامل کلیدی شامل استفاده غیرمجاز از برق (خسارت مصرف) و خطا یا خرابی در تجهیزات اندازه‌گیری (تفاوت مصرف) است که هر یک به شیوه‌ای متفاوت بر میزان تلفات غیرفنی تأثیر می‌گذارند. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و اعتبارسنجی یک مدل فازی به منظور ارزیابی و مقایسه میزان تأثیر خسارت مصرف و

^۱. Depuru

تفاوت مصرف بر کاهش تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی در شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان غربی است. تحلیل عوامل مؤثر بر تلفات غیر فنی در قالب متغیرهای زبانی و قواعد فازی، می‌تواند تصمیم‌گیری مدیریتی را در شرایط واقعی و با وجود داده‌های ناقص تسهیل کند. سؤال اصلی پژوهش نیز این است که کدام‌یک از این دو عامل نقش مؤثرتری در کاهش تلفات غیر فنی ایفا می‌کند و چگونه می‌توان با بهره‌گیری از مدل‌سازی فازی، تأثیر کمی و کیفی هر یک را به‌طور دقیق سنجش‌پذیر نمود؟

2. پیشینه پژوهش

مطالعه مونیدرو و همکاران¹ (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از شبکه‌های بیزی و داده‌کاوی، به کشف الگوهای جدید تلفات غیر فنی و تحلیل عدم قطعیت در شبکه‌های برق اسپانیا پرداخته است. نتایج نشان داد که مدل‌های بیزی در شرایط داده‌های ناقص و نامطمئن عملکرد مطلوبی دارند. وانگ و همکاران² (۲۰۲۴)، با استفاده از مدل یادگیری عمیق و داده‌های مصرف هوشمند، به شناسایی و پیش‌بینی تلفات غیر فنی در شبکه‌های توزیع برق چین پرداخته است. نتایج نشان داد که مدل‌های LSTM و CNN دقت بالایی در شناسایی الگوهای غیرمجاز مصرف دارند و می‌توانند به‌طور مؤثری در کاهش تلفات غیر فنی به کار روند. همچنین، آلمیدا و همکاران³ (۲۰۲۳) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و داده‌های کنتورهای هوشمند، به شناسایی سرقت برق و تلفات غیر فنی در شبکه‌های توزیع برزیل پرداخته اند. یافته‌ها نشان داد که ترکیب الگوریتم‌های Random Forest و XGBoost بهترین عملکرد را در شناسایی مشترکین مشکوک دارد. پژوهش صادقی و همکاران⁴ (۲۰۲۳) با رویکرد مدل‌سازی فازی، عوامل مؤثر بر تلفات غیر فنی برق در شبکه‌های توزیع ایران را بررسی و اولویت‌بندی کرده است. نتایج نشان داد که خطای کنتور و مصرف غیرمجاز دو عامل اصلی هستند و مدل فازی می‌تواند عدم قطعیت داده‌ها را به خوبی مدیریت کند. رحمان و همکاران⁵ (۲۰۲۳) در پژوهشی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های مصرف مشترکین، به پیش‌بینی و شناسایی تلفات غیر فنی در شبکه‌های توزیع جنوب آسیا پرداخته اند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی با دقت بالایی می‌تواند مشترکین غیرمجاز را شناسایی کند.

برخی مطالعات پیشینه ازجمله مطالعه بهرامی آذر (۱۳۹۷) با تمرکز بر تجربیات شرکت توزیع برق آذربایجان غربی در زمینه کاهش سرقت انرژی برق، در دوره پیش و پس از هدفمندی یارانه‌ها، راهکارهایی برای کنترل و کاهش سرقت انرژی برق ارائه کرده‌اند. این راهکارها شامل استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای ضد سرقت کردن کنتورها، نظارت مداوم بر مصرف برق و اجرای قوانین سخت‌گیرانه‌تر برای جلوگیری از سرقت است. این مطالعه نشان می‌دهد که پس از هدفمندی یارانه‌ها، تلاش‌های بیشتری برای کاهش سرقت برق انجام شده است. این شامل اقدامات فنی و مدیریتی برای جلوگیری از دست‌کاری کنتورها و لوازم اندازه‌گیری است. در همین راستا، مطالعه نوافر و همکاران⁶ (۲۰۲۲) به بررسی استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تلفات غیرفنی در سیستم‌های توزیع برق می‌پردازد. از یک مدل عصبی کانولوشنال برای ترکیب داده‌های فرایندهای عملیاتی کارکنان و داده‌های مصرف مشتری استفاده شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که عوامل مرتبط با کارکنان می‌توانند پیش‌بینی‌کننده‌های مهمی برای تلفات غیرفنی باشند. علاوه بر آن، وهاب‌زاده و همکاران⁷ (۲۰۲۰) یک مدل SOM فازی را برای تشخیص تقلب در شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای سیستم‌های فتوولتائیک سقفی پیشنهاد نمودند. ویگاس و همکاران (۲۰۱۸) بر ارائه روشی مبتنی بر داده برای شناسایی منابع سرقت و سایر خسارات ناشی از توزیع انرژی الکتریکی پرداخته‌اند. آن‌ها سعی در مقایسه مصرف مشترکین با الگوی مصرف تعریف‌شده و تعیین مشترکین با مصارف متفاوت با الگو جهت شناسایی و بررسی به‌عنوان مشترکین دارای مصرف غیرمجاز می‌باشند. قاسمی⁸ و همکاران (۲۰۱۸) مشتریان غیرقانونی انرژی الکتریکی را به دو دسته تقسیم می‌کنند. (۱) اگر مشتری تمام انرژی موردنیاز خود را در بخشی از روز به‌طور غیرقانونی مصرف کند، (۲) اگر مشتری بخشی از انرژی موردنیاز خود را به‌طور غیرقانونی مصرف کند. روش طبقه‌بندی الگوی مصرف انرژی مشتری بر اساس شبکه عصبی احتمالی و مدل ریاضی مبتنی بر روش Levenberg-Marquardt به ترتیب برای تشخیص نوع اول و دوم مصرف غیرقانونی استفاده می‌شود. نتایج تجربی برای نشان دادن اثربخشی این روش در تشخیص هر دو نوع مصرف غیرقانونی ارائه شده است. دیپورو¹ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی امکان و نقش الگوریتم‌های محاسبات با کارایی بالا در تشخیص مصرف‌کنندگان غیرقانونی می‌پردازد. بر اساس مطالعه رجبی مشهدی (۱۳۹۲) رتبه‌بندی مناطق بر اساس تلفات فنی و غیر فنی، شرکت‌های توزیع را

¹ Monedero et al.

² Wang et al.

³ Almeida et al.

⁴ Sadeghi et al.

⁵ Rahman et al.

⁶ Nwafor

⁷ Vahabzadeh et al.

⁸ Ghasemi

چگونگی محاسبه و اعمال آن در سیستم، یکی از عمده چالش‌های کارکنان و کاربران سیستم خدمات مشترکین است. موارد مذکور، برای انشعابات با قدرت‌های بالا، حساسیت و تأثیرگذاری به مراتب بیشتری به همراه خواهد داشت. شاخص‌های مربوط به تعویض کنتورها و صدور تفاوت مصرف ناشی از خطای کنتور و اشتباهات محاسباتی، تحت عنوان «تعداد و میزان تفاوت مصرف اعمال شده» دسته‌بندی می‌شوند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات پیشین به همراه روش، نتایج کلیدی و خلأهای پژوهشی ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه مطالعات پیشین در زمینه عوامل مؤثر بر تلفات

غیر فنی انرژی الکتریکی و خلأهای پژوهشی

نویسنده/ سال	روش	نتایج کلیدی	خلأ/ محدودیت
مونیدرو و همکاران (۲۰۲۴)	شبکه بیزی و داده کاوی	تحلیل عدم قطعیت و کشف الگوهای جدید	عدم تمرکز بر سیاست‌های اجرایی و منطقه‌ای
وانگ و همکاران (۲۰۲۴)	یادگیری عمیق (LSTM, CNN)	دقت بالا در شناسایی الگوهای غیرمجاز مصرف	تمرکز بر داده‌های هوشمند، عدم تحلیل عوامل مدیریتی
آلمیدا و همکاران (۲۰۲۳)	یادگیری ماشین (RF, XGB)	عملکرد عالی در شناسایی مشترکین مشکوک	عدم بررسی ابعاد کیفی و سیاست‌گذاری
صادقی و همکاران (۲۰۲۳)	مدل سازی فازی	اولویت‌بندی عوامل مؤثر، مدیریت عدم قطعیت	تمرکز بر ایران، عدم ارائه راهکار اجرایی
رحمان و همکاران (۲۰۲۳)	شبکه عصبی مصنوعی	شناسایی مشترکین غیرمجاز	عدم تحلیل ابعاد مدیریتی و اقتصادی
جانقلی و باقری فرد (۱۴۰۲)	تحلیل مدیریتی و فنی	اهمیت تخصیص منابع بهینه	عدم مدل سازی فازی و مقایسه عوامل
وهاب‌زاده و همکاران (۲۰۲۰)	مدل فازی SOM	افزایش دقت تشخیص تقلب	تمرکز بر شبکه‌های خاص و جدید، نه شبکه سنتی

قادر می‌سازد با کمترین بودجه به بیشترین بازده در حذف و کاهش تلفات دست یابد. در این روش، نواحی با بیشترین تلفات در اولویت برنامه‌ریزی‌های شرکت‌های توزیع قرار می‌گیرند. تخمین دقیق بار در ترانسفورماتورهای توزیع به عنوان اولین اقدام در رتبه‌بندی نواحی شبکه توزیع سنتی بر اساس تلفات شناخته می‌شود. میرزادی گوهری (۱۳۹۲) نیز بر شناسایی مشترکین اثرگذار بر تلفات غیر فنی با استفاده از داده کاوی پرداخته و نهایتاً ترکیبی از مدل‌های درخت تصمیم‌گیری C5، شبکه عصبی و شبکه بیزی برای دستیابی به بالاترین دقت انتخاب گردید.

بر اساس مطالعه جانقلی و باقری فرد (۱۴۰۲)، از مهم‌ترین روش‌های کاهش تلفات غیر فنی، استفاده از سیستم‌های مدیریتی برای کنترل روند اقدامات و سنجش پذیری دقیق میزان تلفات هر شرکت از طریق نصب کنتورهای مدیریت شبکه است. تفاضل انرژی اندازه‌گیری شده ورودی به شبکه از طریق کنتورهای نصب‌شده در مبادی شبکه و انرژی فروخته‌شده یا تحویل‌شده اندازه‌گیری شده، از رایج‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تلفات غیر فنی انرژی است (خداپرست پیرسرای، ۱۴۰۱). هرچه تجهیزات اندازه‌گیری در نقاط مختلف شبکه افزایش یابد امکان محاسبه تلفات و تفکیک مکانی آن‌ها بهتر انجام می‌گیرد (خداپرست پیرسرای، ۱۴۰۱). بخشی از تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی، از ناکارآمد بودن سیستم محاسبات و مشکلات جنبی به دلیل محاسبات نادرست و یا سایر اشتباهات در اندازه‌گیری انرژی الکتریکی نشأت می‌گیرد. این تلفات می‌تواند به صدور قبوض نادرست منجر شود و در نهایت به هدر دادن بخشی از بازگشت درآمد ناشی از فروش انرژی الکتریکی منجر گردد.

اصلاح یا تعویض لوازم اندازه‌گیری و اعمال انرژی ثبت‌نشده در جهت بهبود شاخص تلفات غیر فنی انرژی مهم است لکن نصب تجهیزات اندازه‌گیری کافی در شبکه فشار ضعیف نیاز به سرمایه‌گذاری زیادی دارد (مرادخانی و رشیدبیگی، ۱۳۹۸). بر اساس مطالعه جانقلی و باقری فرد (۱۴۰۲)، تخصیص منابع بهینه برای نصب کنتورهای مدیریت شبکه و استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند از مهم‌ترین استراتژی‌های کاهش تلفات غیر فنی است. با این حال، شناسایی و جایگزینی به موقع و سریع کنتورهایی که بنا به دلایلی دچار عیوب مختلف می‌گردند به جهت عدم وجود قطعات جایگزین، به سادگی امکان‌پذیر نخواهد بود. (روشن میلانی و ادهم، ۱۳۹۴). تعویض سریع و ثبت تفاوت مصرف ناشی از عملکرد ناصحیح کنتور، سازوکار دقیقی می‌طلبد (صمصامی، ۱۳۹۸). با توجه به محاسباتی بودن فرایند مذکور، تعیین مثبت یا منفی بودن اشتباه در ضرایب و

(منبع: یافته‌های پژوهش)

را به‌درستی مدل‌سازی نماید و خروجی‌های قابل اتکایی برای تصمیم‌گیری مدیریتی ارائه دهد. از اینرو، در این پژوهش، ادغام دو متغیر «تعداد و میزان خسارت مصرف» به عنوان یک متغیر واحد با عنوان «خسارت مصرف» و همچنین ادغام «تعداد و میزان تفاوت مصرف» به عنوان متغیر «تفاوت مصرف» انجام شده است. این ادغام به منظور ساده‌سازی تحلیل و مدل‌سازی فازی صورت گرفته است تا بتوان تأثیر این عوامل را به صورت جامع‌تر و قابل سنجش‌تری در کاهش تلفات غیر فنی انرژی بررسی کرد. به عنوان مثال، میزان واقعی مصرف غیرمجاز یا خطای کنتور اغلب بر اساس تخمین، قضاوت کارشناسان یا شرایط متغیر شبکه تعیین می‌شود. همچنین، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی معمولاً مبتنی بر ارزیابی‌های کیفی و زبانی است. دوم، داده‌های میدانی از طریق مصاحبه و پرسشنامه با ۱۰ نفر از خبرگان و مدیران شرکت توزیع برق که بر اساس طیف لیکرت ۹ درجه‌ای (نمره ۹ برای موافقت بسیار زیاد، نمره ۷ برای موافقت زیاد، نمره ۵ برای موافقت متوسط، نمره ۳ برای موافقت کم و نمره ۱ برای موافقت بسیار کم)، به ارزیابی میزان تأثیر هر عامل بر تلفات غیر فنی پرداختند.

برای مدل‌سازی، از سیستم استنتاج فازی ممدانی^۱ استفاده شد که طی آن دامنه متغیرها با تحلیل داده‌ها و نظر خبرگان تعیین و متغیرها به سطوح زبانی تقسیم شدند. بنابراین، پس از اخذ نظرات خبرگان مذکور و با تفسیر نمودارهای پراکندگی حاصله، رابطه منطقی بین متغیرهای موردبررسی و مقدار تابع عضویت ایجاد گردیده و نهایتاً نزدیک‌ترین جواب (تابع عضویت) انتخاب شد. توابع عضویت مناسب (مانند گاوسین^۲، زنگوله‌ای^۳، S شکل، Z شکل و مثلثی) انتخاب و در نهایت ۲۱ قاعده فازی و اهمیت نسبی آنها بر اساس قواعد «اگر-آنگاه» و نظر خبرگان داخلی تدوین گردید. بطور نمونه:

قاعده ۱: اگر خسارت مصرف خیلی کم باشد و تفاوت مصرف خیلی کم باشد، آنگاه تلفات غیر فنی غیرقابل قبول خواهد بود (۰/۲۷).

قاعده ۲: اگر خسارت مصرف خیلی کم باشد و تفاوت مصرف کم باشد، آنگاه تلفات غیر فنی غیرقابل قبول خواهد بود (۰/۳۲).

قاعده ۳: اگر خسارت مصرف کم باشد و تفاوت مصرف کم باشد، آنگاه تلفات غیر فنی غیرقابل قبول خواهد بود (۰/۳۲).

بر اساس مقایسه انجام‌شده در جدول ۱، مشخص می‌شود اغلب تحقیقات پیشینه پژوهش به نحوه شناسایی مصرف‌کنندگان غیرمجاز و عوامل تلفات غیرفنی پرداخته و به‌ندرت به سنجش پذیر کردن تلفات غیرفنی پرداخته‌اند. تمرکز اغلب پژوهش‌ها بر داده‌های هوشمند بدون تحلیل سیاست‌های اجرایی و مدیریتی بوده است. همچنین، کمبود پژوهش‌هایی که به مقایسه کمی و کیفی عوامل اصلی (مانند خسارت مصرف و تفاوت مصرف) در یک مدل واحد بپردازند مشهود است. در نهایت، عدم ارائه مدل‌های جامع که همزمان ابعاد فنی، انسانی و مدیریتی را در کاهش تلفات غیر فنی ترکیب کند و نیز عدم توجه کافی به محدودیت منابع و اولویت‌بندی راهکارها برای مدیران شرکت‌های توزیع برق در شرایط واقعی از عمده ترین خلأهای پژوهشی شناسایی شده است. در حالیکه پژوهش حاضر، با ارائه یک مدل فازی ترکیبی، امکان مقایسه کمی و درعین‌حال کیفی دو عامل نهایی تأثیرگذار «تفاوت مصرف» و «خسارت مصرف» در سنجش پذیری تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی را فراهم آورده می‌سازد. در زمانی که شرکت‌های توزیع در کاهش تلفات انرژی الکتریکی با تنگنای منابع مالی تخصیصی محدود مواجه هستند، نتیجه این تحقیق می‌تواند انتخاب مسیری زودبازده جهت رسیدن به آمار بهینه و تحلیل استراتژی‌های کاهش تلفات انرژی الکتریکی را برای مدیران فراهم نماید.

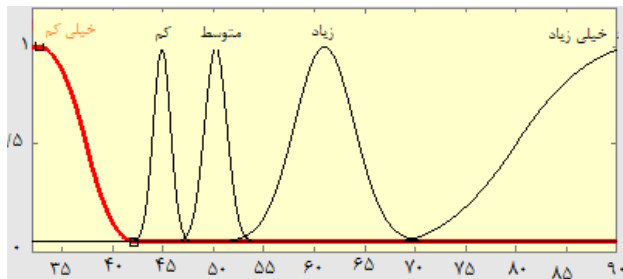
۳. روش پژوهش

در این پژوهش که از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر مدل‌سازی فازی است، داده‌های مورد نیاز از دو منبع اصلی گردآوری شده است: نخست، داده‌های ثانویه آماری شامل آمار تلفات غیر فنی، میزان و تعداد خسارت مصرف (ناشی از استفاده غیرمجاز از برق) و تفاوت مصرف (ناشی از خطای کنتور و اشتباهات محاسباتی) که از سیستم جامع خدمات مشترکین شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان غربی استخراج گردید. هرچند داده‌های اولیه به‌صورت عددی از سیستم جامع خدمات مشترکین استخراج شده‌اند، اما با توجه به ماهیت داده‌های عملیاتی در صنعت برق، وجود خطاهای اندازه‌گیری، ابهام در تفسیر شاخص‌ها و نقش دانش خبرگان، استفاده از مدل‌سازی فازی به جای روش‌های قطعی، امکان مدیریت عدم قطعیت و تحلیل دقیق‌تر رفتار سیستم را فراهم می‌کند. مدل فازی با تبدیل داده‌های عددی به مجموعه‌های فازی و به‌کارگیری قواعد زبانی، می‌تواند روابط پیچیده و غیرخطی بین عوامل مؤثر بر تلفات غیر فنی

^۱ Mamdani

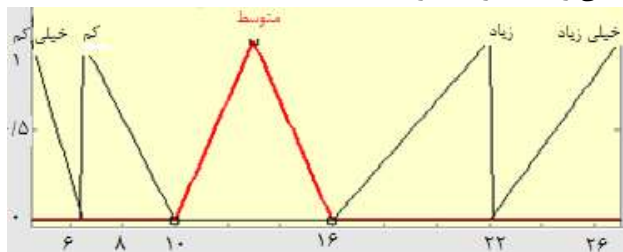
^۲ gaussmf

^۳ gbell



شکل ۱: توابع عضویت متغیر ورودی تفاوت مصرف

مطابق شکل ۲ در متغیر ورودی «خسارت مصرف» توابع عضویت trimf برای نشان دادن متغیرهای کلامی اعمال خسارت مصرف خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد در نظر گرفته شده‌اند. این توابع، امکان تعریف توابع عضویت مثلثی با دقت و انعطاف بالا را فراهم می‌کند. در مرحله دوم، دامنه متغیر خسارت مصرف بر مبنای اطلاعات سیستم جامع مشترکین استان آذربایجان غربی در سال ۱۴۰۲، در محدوده ۴/۵ میلیون کیلووات ساعت تا ۲۷ میلیون کیلووات ساعت تعیین گردید. همچنین، ۴/۵ تا ۶/۵ میلیون کیلووات ساعت عملکرد خیلی کم خسارت مصرف، ۶/۵ تا ۱۰ میلیون کیلووات ساعت عملکرد کم خسارت مصرف، از ۱۰ تا ۱۶ میلیون کیلووات ساعت عملکرد متوسط خسارت مصرف، از ۱۶ تا ۲۲ میلیون کیلووات ساعت عملکرد زیاد خسارت مصرف و از ۲۲ تا ۲۷ میلیون کیلووات ساعت عملکرد خیلی زیاد خسارت مصرف است.



شکل ۲: توابع عضویت متغیر ورودی خسارت مصرف

مطابق شکل ۳ برای متغیر خروجی «تلفات انرژی» توابع عضویت trimf، برای نشان دادن متغیرهای کلامی میزان تلفات انرژی بسیار خوب، خوب، قابل قبول و ضعیف و تابع عضویت S شکل برای نشان دادن متغیر کلامی میزان تلفات انرژی غیرقابل قبول در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم، دامنه متغیر تفاوت مصرف بر مبنای اطلاعات ارائه شده در بولتن آماری شرکت توزیع برق استان آذربایجان غربی در سال ۱۴۰۲، در محدوده ۱۰/۷۸ تا ۱۳/۰۲ میلیون کیلووات ساعت تا ۱۱/۱۶ میلیون کیلووات ساعت تعیین گردید. به طور دقیق تر، ۱۰/۷۸ تا ۱۱/۱۶

قاعده ۴: اگر خسارت مصرف خیلی کم باشد و تفاوت مصرف متوسط باشد، آنگاه تلفات غیر فنی ضعیف خواهد بود (۰/۴۷).

خروجی مدل با روش مرکز ثقل به مقدار کمی تبدیل شد. کل فرآیند مدل سازی و تحلیل داده ها در محیط نرم افزار MATLAB انجام شد و اعتبارسنجی مدل از طریق آزمون قواعد و مقایسه با داده های واقعی صورت گرفت. همچنین، تحلیل حساسیت برای تعیین میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر خروجی انجام شد تا حساس ترین عامل در کاهش تلفات غیر فنی مشخص گردد.

۴. یافته های پژوهش

به منظور تعیین نوع توابع عضویت متغیرهای ورودی و متغیر خروجی، پس از اخذ نظرات خبرگان مذکور و با تفسیر نمودارهای پراکندگی حاصله، رابطه منطقی بین متغیرهای موردبررسی و مقدار تابع عضویت ایجاد گردیده و نهایتاً نزدیک ترین جواب (تابع عضویت) انتخاب شده است.

مطابق شکل ۱ برای متغیر ورودی «تفاوت مصرف» تابع عضویت Z شکل، برای نشان دادن متغیر کلامی اعمال تفاوت مصرف خیلی کم و تابع عضویت Z شکل (که می تواند به خوبی تغییرات تدریجی و نرمال را نمایش دهد) برای نشان دادن متغیرهای کلامی اعمال تفاوت مصرف کم، اعمال تفاوت مصرف متوسط و اعمال تفاوت مصرف زیاد و تابع عضویت S شکل جهت نمایش متغیر کلامی متغیرهای کلامی اعمال تفاوت مصرف بسیار زیاد در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از این تابع عضویت S شکل مشخص نبودن مرز متوسط میزان اعمال تفاوت مصرف زیاد با اعمال تفاوت مصرف خیلی زیاد است. در مرحله بعدی، دامنه مابین متغیر در محدوده ۳۸ میلیون کیلووات ساعت تا ۹۰ میلیون کیلووات ساعت تعیین گردید که از ۳۸ تا ۴۲ میلیون کیلووات ساعت نشانگر عملکرد تفاوت مصرف خیلی کم، از ۴۲ تا ۴۷ میلیون کیلووات ساعت نشانگر عملکرد تفاوت مصرف کم، از ۴۷ تا ۵۳ میلیون کیلووات ساعت نشانگر عملکرد تفاوت مصرف متوسط، از ۵۳ تا ۷۰ میلیون کیلووات ساعت نشانگر عملکرد تفاوت مصرف زیاد و از ۷۰ تا ۹۰ میلیون کیلووات ساعت نشانگر عملکرد تفاوت مصرف خیلی زیاد است.

دو ستون سمت چپ شکل ۴ نشان دهنده نمودارهای توابع عضویت مربوط به فروض قواعد است و ستون سوم نشان دهنده نمودار توابع عضویت مربوط به تالی قواعد و درواقع مقداری است که پس از غیر فازی سازی نمایش داده شده است. این شکل، ترکیب احتمالی متغیرهای فازی سازی و رابطه متغیرهای ورودی و متغیر خروجی شبیه سازی شده است. گنجاندن این شاخص ها در مدل، نتیجه ای را در مورد میزان تلفات انرژی برق از اثرگذاری (عدم اثرگذاری) متغیرهای اعمال تفاوت مصرف و میزان خسارت مصرف و بر مبنای روش مرکز ثقل نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد، زمانی که اعمال تفاوت مصرف و میزان خسارت مصرف کم یا بسیار کم باشد، میزان کاهش تلفات انرژی الکتریکی نیز ضعیف یا غیرقابل قبول است و برعکس که نشان دهنده سناریوهایی منطبق با اهداف تعیین شده در این مطالعه است.

تبدیل مدل مفهومی به برنامه نرم افزاری به ناچار خطایی را به همراه دارد. اگر این خطا در محدوده قابل قبول باشد، مدل نیز معتبر خواهد بود، در غیر این صورت باید اصلاح شود. برای اطمینان از اینکه خطای مدل در محدوده قابل قبول است یا نه باید مدل آزمون گردد. برای آزمون مدل از روش های آزمون تمام قوانین و آزمون رفتار استفاده شده است.

۴-۱. آزمون تمام قوانین

با انجام آزمون تمام قواعد، می توان اطمینان حاصل کرد که سیستم به درستی و با دقت مناسبی عمل می کند و توانایی مدیریت داده های نامعین و ناپیوسته را داراست. این فرایند بهبودی ها و بهینه سازی های لازم را برای بهبود عملکرد و دقت سیستم فراهم می کند. موتور استنتاج به ازای ورودی های هر قانون، خروجی متناظر با آن قانون را تولید می نماید. بر اساس رابطه (۱)، خروجی به دست آمده از قاعده^۱ با خروجی مورد انتظار^۲ مقایسه می شود.

$$E_i = \sqrt{(OBFR_i - POFS_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱)}$$

میزان خطای هر قاعده^۳ در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس رابطه (۲)، میانگین عددی اختلاف مجذور خطاهای موزون خروجی های به دست آمده از نرم افزار با خروجی های مورد انتظار برابر با ۰/۰۱۷ محاسبه گردید.

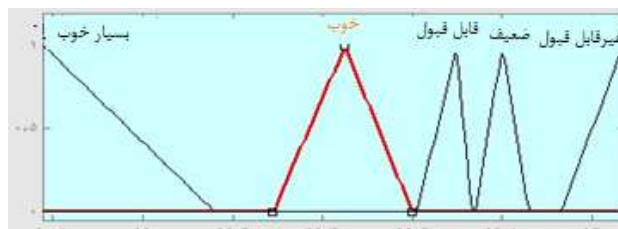
$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{N} \quad \text{رابطه (۲)}$$

^۱. The output obtained from the rule (OBFR)

^۲. Predictable output of fuzzy system (POFS)

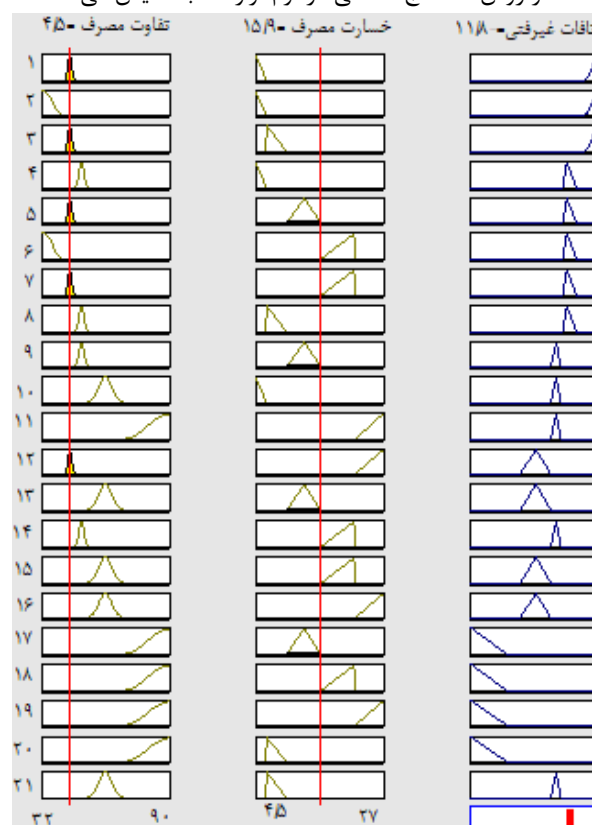
^۳. E_i

میلیون کیلووات ساعت عملکرد تلفات بسیار خوب، ۱۱/۲۹ تا ۱۱/۶ میلیون کیلووات ساعت عملکرد تلفات خوب، از ۱۱/۶ تا ۱۱/۷۲ میلیون کیلووات ساعت عملکرد قابل قبول تلفات انرژی، از ۱۱/۷۴ تا ۱۱/۸۶ میلیون کیلووات ساعت عملکرد ضعیف تلفات انرژی و از ۱۱/۹۳ تا ۱۳/۰۲ میلیون کیلووات ساعت عملکرد غیرقابل قبول تلفات انرژی تعریف گردید.



شکل ۳: توابع عضویت متغیر خروجی تلفات غیر فنی انرژی

شکل ۴ خلاصه ای از نتایج برای سناریوی اعمال تفاوت مصرف (۴۵)، میزان خسارت مصرف (۱۵/۹۱) و تلفات انرژی (۱۱/۸) را با استفاده از روش استنتاج ممدانی در نرم افزار متلب نمایش می دهد.



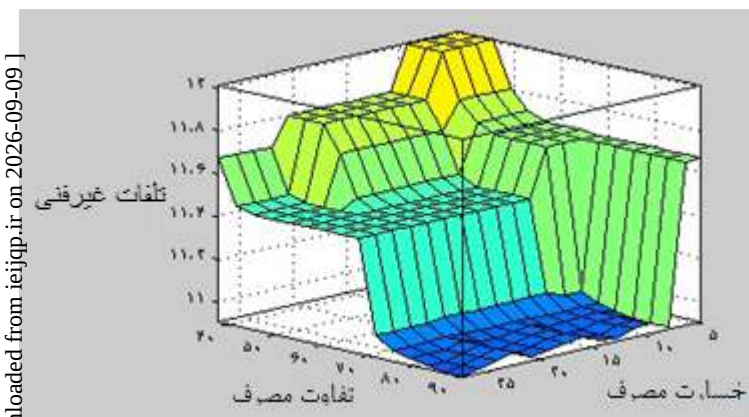
شکل ۴: نتایج برای سناریوی اعمال تفاوت مصرف (۴۵)، میزان خسارت مصرف (۱۵/۹۱) و تلفات انرژی (۱۱/۸) میلیون کیلووات ساعت بروش استنتاج ممدانی (منبع: نتایج پژوهش)

کل، دقت قابل قبولی دارد. همچنین، انحراف معیار خطای نسبی ۰/۱۹۹۶ نشان می‌دهد که پراکندگی خطاها حول میانگین کم است. قوانین فازی و توابع عضویت بر اساس تجربه و قضاوت خبرگان داخل شرکت توزیع تعیین شده‌اند.

علاوه بر آن، به منظور بررسی تفاوت بین دو گروه داده خروجی سیستم استنتاج و خروجی قابل پیش‌بینی، از آزمون یو-من ویتنی^۲ استفاده شد. از آنجایی که p-value حاصله برابر با ۰/۰۴۶۴۲ و بیشتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۱ است، با اطمینان ۹۹٪ نمی‌توان نتیجه گرفت که بین پیش‌بینی‌های مدل فازی پژوهش و مقادیر مورد انتظار، تفاوت قابل توجهی وجود دارد. این نتایج نشان می‌دهد که هر قانون به درستی عمل می‌کند و با دانش خبرگان و شرایط محلی سازگار است.

۲-۴. آزمون رفتار مدل

برای بررسی بیشتر صحت سیستم از آزمون رفتار مدل که شامل نمودار سه‌بعدی استفاده شده است. شکل ۵ شبیه‌سازی سیستم از درجه میزان تلفات غیرفنی را با فرض آزاد بودن متغیرهای خسارت مصرف و تفاوت مصرف نشان می‌دهد.



شکل ۵. رفتار متغیر میزان تلفات غیر فنی با تغییر در دو متغیر ورودی خسارت مصرف و تفاوت مصرف

با توجه به شکل ۵، مشخص می‌گردد که با افزایش میزان خسارت مصرف اعمال شده و تعویض لوازم اندازه‌گیری و صدور تفاوت مصرف ناشی از خطای کنتور و اشتباه در محاسبات (خسارت مصرف) از یک طرف و افزایش میزان صدور تفاوت مصرف ناشی از اشتباه در

همچنین، خطای نسبی^۱، خطای هر قانون را به مقیاس خروجی مورد انتظار مرتبط می‌کند و درک بهتری از اهمیت خطا به دست می‌دهد. خطای نسبی هر قانون از رابطه ۳ محاسبه گردید:

$$\text{رابطه ۳} \quad RE_i = \left| \frac{POFS_i - OBF_i}{POFS_i} \right|, i = 1, 2, \dots, n$$

جدول ۲. نتایج اعتبارسنجی مدل بروش آزمون قواعد نهایی سیستم

خطا	خروجی سیستم استنتاج	خروجی قابل پیش‌بینی	شماره قانون
۰/۶	۱۱/۴	۱۲	۱
۰/۶	۱۱/۴	۱۲	۲
۰	۱۲	۱۲	۳
۰/۵	۱۱/۴	۱۱/۹	۴
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۵
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۶
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۷
۰/۴	۱۱/۸	۱۱/۴	۸
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۹
۰/۳	۱۱/۴	۱۱/۷	۱۰
۰/۴	۱۱/۴	۱۱/۸	۱۱
۰/۴	۱۱/۴	۱۱/۸	۱۲
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۳
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۴
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۵
۰/۱	۱۱/۴	۱۱/۵	۱۶
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۷
۰	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۸
۰/۳	۱۱/۴	۱۱/۱	۱۹
۰/۳	۱۱/۴	۱۱/۱	۲۰
۰	۱۱/۷	۱۱/۷	۲۱
۰/۰۱۷	میانگین		

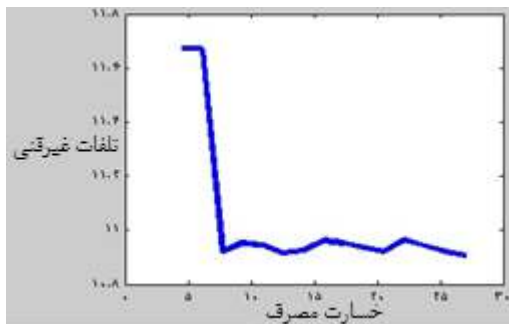
(منبع: یافته‌های پژوهش)

با توجه به نتایج جدول ۲، بیشتر خطاهای بین خروجی سیستم استنتاج و خروجی قابل پیش‌بینی متناظر هر قانون، صفر یا نزدیک به صفر است و هیچ الگوی صعودی یا نزولی، تناوبی و خوشه‌بندی در داده‌های خطاهای قوانین مذکور مشاهده نمی‌شود و در نتیجه، خطاها به‌طور تصادفی توزیع شده‌اند. علاوه، با اجرای تحلیل خطای نسبی تک‌تک قواعد، میانگین خطای نسبی ۰/۰۲۰۹۵ حاصل گردید که نشان می‌دهد به‌طور متوسط، خطاها حدود ۲/۱٪ از مقدار واقعی خروجی هستند. این مقدار نسبتاً کم است و نشان می‌دهد که مدل در

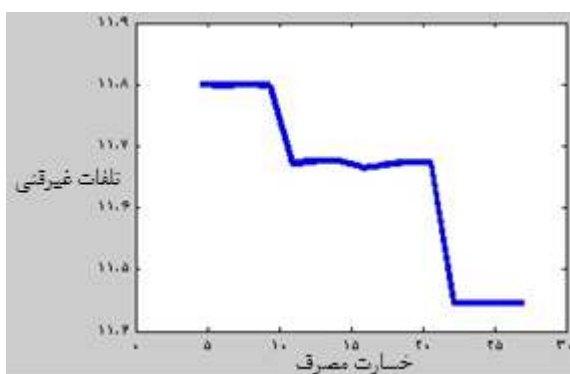
^۲. Mann-Whitney U

^۱. Relative Error

میلیون کیلووات ساعت، این تغییرات در دامنه های مختلف، به صورت پلکانی نزولی ادامه می یابد. بنابراین، مشخص می گردد که در این حالت، دامنه تأثیر اعمال تفاوت مصرف بر کاهش تلفات غیر فنی حدود ۰/۹ میلیون کیلووات ساعت (۸/۹-۱۱/۱۰) است.

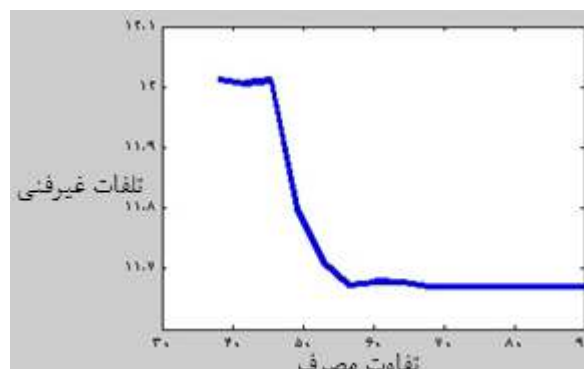


شکل ۸: نمای سطح تأثیر خسارت مصرف بر تلفات غیر فنی انرژی با مقدار ثابت تفاوت مصرف با مقدار بیشینه ۹۰ میلیون کیلووات ساعت در شکل ۸، تفاوت مصرف در بیشترین مقدار خود (۹۰) فرض شده و تأثیر خسارت مصرف با این پیش فرض بر تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی مشاهده می گردد. نمودار ۸ گویای این واقعیت است که با فرض اعمال بیشترین تفاوت مصرف، افزایش اعمال خسارت مصرف تا حدود ۷/۵ میلیون کیلووات ساعت، به سرعت تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی را به حدود ۱۰/۹ میلیون کیلو وات ساعت می رساند. و پس از آن بدون تغییر معناداری این سطح از تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی ادامه می یابد. بنابراین، مشخص می گردد که در این حالت، دامنه تأثیر اعمال خسارت مصرف بر کاهش تلفات غیر فنی حدود ۰/۶۵ میلیون کیلووات ساعت (۶۵/۹-۱۱/۱۰) است.



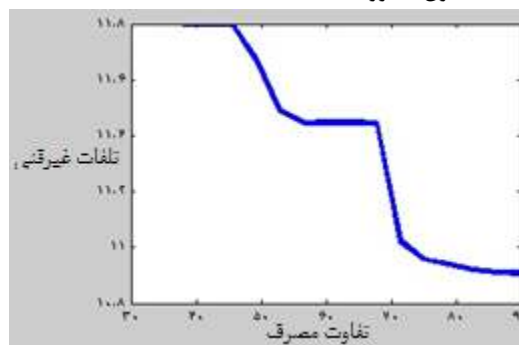
شکل ۹: نمای سطح تأثیر خسارت مصرف بر تلفات غیر فنی انرژی با مقدار ثابت تفاوت مصرف با مقدار عملکرد ۵۱ میلیون کیلووات ساعت

ضرایب (تفاوت مصرف) از طرف دیگر، میزان تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی کاهش می یابد.



شکل ۶. نمای سطح تأثیر تفاوت مصرف بر تلفات غیر فنی انرژی با مقدار ثابت خسارت مصرف با مقدار ۴/۵ میلیون کیلووات ساعت

در شکل ۶، میزان خسارت مصرف با عدد ۴/۵ میلیون کیلووات ساعت ثابت فرض شده و تأثیر تغییرات تفاوت مصرف در تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی طبق نمودار مشخص شده است. با افزایش میزان صدور تفاوت مصرف ناشی از اشتباه در ضرایب (تفاوت مصرف)، تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی تنزل پیدا می کند و این شیب نزولی تا زمانی که تفاوت مصرف به حدود ۵۵ میلیون کیلووات ساعت می رسد ادامه می یابد و پس از آن به ثبات می رسد. بنابراین، مشخص می گردد که در این حالت، دامنه تأثیر اعمال تفاوت مصرف بر کاهش تلفات غیر فنی حدود ۰/۵ میلیون کیلووات ساعت (۱۲/۵-۱۱) است.



شکل ۷. نمای سطح تأثیر تفاوت مصرف بر تلفات غیر فنی انرژی با مقدار ثابت خسارت مصرف با مقدار ۱۳ میلیون کیلووات ساعت

در شکل ۷، خسارت مصرف با مقدار ۱۳ میلیون کیلووات ثابت فرض شده و تأثیر تفاوت مصرف بر تلفات انرژی قابل رؤیت است. مشخص است که با افزایش میزان تفاوت مصرف تا حدود ۵۰ میلیون کیلووات ساعت، تلفات غیر فنی تا حدود ۱۱/۴ میلیون کیلووات ساعت کاهش می یابد و با فرض اعمال خسارت مصرف در حدود ثابت ۱۳

نتایج مدل پژوهش گویای این مطلب است که اعمال تفاوت مصرف می‌تواند بیشترین میزان حساسیت را در کاهش تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی داشته باشد. به بیان دقیقتر، مشخص گردید که بیشینه دامنه تأثیر اعمال تفاوت مصرف بر کاهش تلفات غیرفنی حدود ۰/۹ میلیون کیلووات ساعت است در حالیکه بیشینه دامنه تأثیر اعمال خسارت مصرف بر کاهش تلفات غیرفنی حدود ۰/۶۵ میلیون کیلووات ساعت است. بنابراین، اعمال تفاوت مصرف بیشترین تأثیر را بر تلفات غیر فنی نشان می‌دهد. همچنین مشخص می‌گردد که تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی حساسیت به مراتب کمتری به تغییرات خسارت مصرف نسبت به تفاوت مصرف از خود نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج مدل‌سازی انجام‌یافته، استفاده از کنتورهای هوشمند با قابلیت قرائت از راه دور و دقت بالا، استقرار یک سیستم مکانیزه برای مدیریت فرآیند تعویض کنتورها و ثبت دقیق اطلاعات مربوط به مصرف، آموزش و ارتقای مهارت کارکنان مسئول تعویض کنتورها و انجام محاسبات مصرف، بازبینی دوره‌ای کنتورها و شناسایی کنتورهای معیوب به صورت پیشگیرانه پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر آن، پیشنهاد می‌شود شرکت توزیع برق از سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند (AMI) استفاده نماید. این سیستم‌ها امکان قرائت از راه دور کنتورها، تشخیص سریع‌تر کنتورهای معیوب و مدیریت بهینه مصرف انرژی را فراهم می‌کنند. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تکیه بیش‌ازحد به شاخص‌های غیر فنی تلفات انرژی الکتریکی کمک شایانی به کاهش تلفات کلی شرکت‌ها نخواهد داشت و شرکت توزیع برق باید در تخصیص منابع مالی برای کاهش تلفات انرژی، به تلفات فنی نیز توجه بیشتری داشته باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود شرکت توزیع برق پروژه‌های کاهش تلفات را بر اساس میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری اولویت‌بندی کند. به عنوان مثال، پروژه‌هایی که منجر به کاهش تلفات غیرفنی ناشی از تفاوت مصرف می‌شوند، باید در اولویت قرار گیرند.

عملکرد شرکت توزیع برق آذربایجان غربی با لحاظ بهترین و بدترین عملکرد در زمینه اعمال تفاوت و خسارت مصرف، کمی بیش از ۱ درصد در نوسان بود. حال آنکه در سند چشم‌انداز منتهی به سال ۱۴۰۴، عملکردی در حدود ۸ درصد مورد انتظار است. این امر نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر شاخص‌های غیر فنی، بدون توجه به تلفات فنی، کافی نیست. در پژوهش‌های آتی جداسازی واقعی عددی تلفات در بخش فنی و غیر فنی در سطح شرکت توزیع برق آذربایجان غربی به منظور تعیین سهم هر یک و تعیین اولویت‌های سرمایه‌گذاری در هر بخش می‌تواند جزء اولویت‌های پژوهشی محققین باشد.

در شکل ۹، مقدار تفاوت مصرف در عدد ۵۱ میلیون کیلووات ساعت که مبنای عملکرد شرکت توزیع برق استان آذربایجان غربی است ثابت فرض شده و تأثیر عامل خسارت مصرف در تلفات انرژی مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج مدل‌سازی در شکل ۹، مشخص می‌گردد که با افزایش میزان خسارت مصرف، کاهش میزان تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی از الگوی نزولی پلکانی در دامنه‌های معین تبعیت می‌کند. چنانچه میزان اعمال خسارت مصرف بین ۵ تا ۸ میلیون کیلووات ساعت باشد میزان تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی در سطح حدود ۱۱/۸ میلیون کیلووات ساعت بدون تغییر معناداری باقی می‌ماند. با افزایش سطح خسارت مصرف به مقدار تقریبی ۱۰ میلیون کیلووات ساعت، کاهش معنادار میزان تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی به سطح حدود ۱۱/۱ میلیون کیلووات ساعت مشاهده می‌گردد و پس از آن با افزایش میزان اعمال خسارت مصرف بین ۱۰ تا ۲۰ میلیون کیلووات ساعت باشد میزان تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی در همان سطح قبلی حدود ۱۱/۱ میلیون کیلووات ساعت بدون نوسان معناداری ادامه می‌ماند و از میزان اعمال خسارت مصرف بالای ۲۰ تا ۲۱ میلیون کیلووات ساعت، میزان تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی به مقدار کمینه ۱۱/۳ میلیون کیلووات ساعت کاهش می‌یابد و پس از آن بدون تغییر معناداری این سطح از تلفات غیرفنی انرژی الکتریکی ادامه می‌یابد. بنابراین، مشخص می‌گردد که در این حالت، دامنه تأثیر اعمال خسارت مصرف بر کاهش تلفات غیرفنی حدود ۰/۵ میلیون کیلووات ساعت (۱۱/۳-۱۱/۱) است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، متغیرهای ورودی تحت عناوین اعمال خسارت مصرف و تفاوت مصرف جهت بررسی غیر فنی انرژی الکتریکی در شرکت توزیع برق استان آذربایجان غربی استفاده شده است. با عنایت به اینکه تأثیرات عوامل خسارت مصرف و تفاوت مصرف اظهارشده بر تلفات غیر فنی به طور معمول توسط خبرگان و مدیران شرکت توزیع نیروی برق به صورت مقادیر عددی و کلامی اظهار می‌گردد، مدل مناسب تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی می‌تواند به صورت یک مدل استنتاج فازی تعریف شود. با واکاوی حساسیت مدل، مشخص گردید که سیستم استنتاج فازی بکار رفته، روابط منطقی بین دروندادها و برون داد سیستم کاهش تلفات غیر فنی انرژی الکتریکی را به نمایش می‌گذارد و به کارگیری این سیستم می‌تواند برای شرکت‌های توزیع که همواره به دنبال سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین راه در جهت بهبود آمار تلفات خود می‌باشند. راهگشای تحلیل و کاهش تلفات غیر فنی باشد.

منابع

- Sashirekha, A.; Pasupuleti, J.; Moin, N.; Tan, C., (2013). "Combined heat and power (CHP) economic dispatch solved using Lagrangian relaxation with surrogate subgradient multiplier updates, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 421-430.
- Vahabzadeh, A., Kasaeian, A., Monsef, H., & Aslani, A. (2020). A Fuzzy-SOM Method for Fraud Detection in Power Distribution Networks with High Penetration of Roof-Top Grid-Connected PV. *Energies*, 13(5), 1287.
- Wang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2024). Deep Learning-Based Detection of Non-Technical Losses in Smart Energy Distribution Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(1), 112-124.
- بشکنی، م؛ اعظمی، س، (خرداد ۱۳۹۸). بررسی تشخیص تلفات غیر فنی و سرقت انرژی در شبکه‌های توزیع برق با استفاده از هوش مصنوعی، سومین همایش ملی دانش و فناوری مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران.
- بهرامی آذر، ع، (۱۳۹۷). بررسی تطبیقی عوامل دستکاری کنتور و لوازم اندازه‌گیری در ایران و جهان و ارائه راهکارهای لازم برای کاهش تلفات ناشی از سرقت برق بر اساس تجربیات شرکت توزیع برق آذربایجان غربی، ششمین کنفرانس منطقه ای سیرد، تهران.
- جانقلی، م؛ باقری فرد، م، (۱۴۰۲). شناسایی الزامات اجرای اثربخش استراتژی کاهش تلفات برق در شرکت توزیع نیروی برق. کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های مدیریت و علوم انسانی در ایران، تهران، ایران.
- رجبانی، ن؛ ثقفی، ف؛ شکوری گنجوی، ح؛ کاظمی، ع، (۱۳۹۹). ارائه مدل مفهومی شبکه اهداف کاهش مصرف انرژی برق و گاز خانگی با استفاده از روش تفکر مبتنی بر ارزش. مطالعات راهبردی سیاست‌گذاری عمومی، ۱۰(۳۴)، صص ۱۵۰-۱۷۱.
- رجبی مشهدی، ح، (۱۳۹۵). برآورد تلفات غیر فنی در شبکه توزیع با استفاده از تخمین بار در شرایط اطلاعات محدود، ۱۳۹۵، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی هومن فیروزی، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.
- روشن میلانی، ک؛ ادهم، ب؛ دانشور، م؛ عجمی، ع، (فروردین ۱۳۹۴). بررسی خطای کنتورهای دیجیتال در اندازه‌گیری انرژی الکتریکی تحت شرایط اغتشاشات هارمونیک، بیستمین کنفرانس توزیع برق، زاهدان، ایران.
- خداپرست پیرسرای، ی، (۱۴۰۱). تحلیلی بر ابعاد کاهش تلفات در تولید، توزیع و مصرف برق کشور، ماهنامه امنیت اقتصادی، ۶(۱۰)، صص ۱۹-۲۸.
- Almeida, G. M., Silva, A. C., & Souza, J. R. (2023). Machine Learning Approaches for Electricity Theft Detection Using Smart Meter Data. *Energy Reports*, 9, 1122-1135.
- Viegas, J.L.; Esteves, P.R.; Vieira, S.M., (2018) Clustering-based novelty detection for identification of non-technical losses- Journal of Electrical Power & Energy, Vol 101, pp. 301-310.
- Monedero, I.; Biscarri F.; León C.; Guerrero J.L.; Biscarri J.; Millán R., (2012). Detection of frauds and other non-technical losses in a power utility using Pearson coefficient, Bayesian networks and decision trees, *Int J Electr Power Energy Syst*, 34 (1) , pp. 90-98.
- Ghasemi, A.; Gitizadeh, M., (2018). Detection of illegal consumers using pattern classification approach combined with Levenberg-Marquardt method in smart grid, Vol 99, pp. 363-375.
- Depuru, S.; lingfeng, w.; Devabkaktuni, V.; Robert, G. , (2013). High performance computing for detection of electricity theft, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, Volume 47, pp. 21-30.
- Messinis, G.; Hatziaargyriou, H., (2018). Review of non-technical loss detection methods, *Electric Power Systems Research*, Vol 158, pp 250-266
- Monedero, I., Biscarri, F., & León, C. (2024). Bayesian Network-Based Approach for Non-Technical Loss Pattern Discovery in Power Distribution Systems. *Applied Energy*, 362, 121234
- Nwafor, O., Okafor, E., Aboushady, A. A., Nwafor, C., & Zhou, C. (2023). *Explainable Artificial Intelligence for Prediction of Non-Technical Losses in Electricity Distribution Networks*. IEEE Access, 11, 73104-73115.
- Perea, E. ; Ruiz, N.; Cobelo, I.; Lizuain, Z.; Carrascal, A., (2016). A novel optimization algorithm for efficient economic dispatch of Combined Heat and Power devices, *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 507-514.
- Rahman, M. M., Islam, S., & Hossain, M. (2023). Artificial Neural Network for Non-Technical Loss Detection in South Asian Power Systems. *Electric Power Systems Research*, 218, 109987.
- Sadeghi, M., Rahimi, S., & Ghasemi, A. (2023). Fuzzy Modeling and Prioritization of Factors Affecting Non-Technical Losses in Power Distribution Networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 150, 109012.

شاهی مریدی، س؛ موسوی راد، س؛ میرحسینی، م؛ نیک پور، ح، (۱۴۰۰). اولویت‌بندی عوامل تلفات برق با ترکیب روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس (مطالعه موردی: شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان)، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، ۳(۱۰)، صص ۷۵-۸۴.

صادقی گرمارودی، ا، (۱۳۹۵). بررسی سرقت انرژی در سیستم‌های توزیع برق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی رضا دشتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب.

صمصامی، س، (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر عوامل مؤثر بر کاهش تلفات غیرفنی توزیع انرژی الکتریکی (مطالعه موردی: شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان غربی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی به راهنمایی امیرحسین عبدالعلی پور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی. مرادخانی، ا؛ رشیدبیگی، ج، (۱۳۹۸). تخمین تلفات شبکه توزیع فشار ضعیف در حضور سرقت انرژی مبتنی بر اطلاعات موجود در سیستم GIS، مهندسی برق (دانشگاه فنی تبریز)، ۴(۴۹)، (پیاپی ۹۰)، صص ۱۸۳۶-۱۸۲۷.

مستوفی، ز، (اسفند ۱۳۹۴). بررسی تلفات غیر فنی در شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان و ارائه راهکار جهت کاهش آن، پنجمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ایران.

میرزادی گوهری، م، (۱۳۹۳)، شناسایی مشترکین اثرگذار بر تلفات غیر فنی شرکت توزیع برق با استفاده از داده‌کاوی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق، با راهنمایی یحیی زارع مهرجردی، دانشگاه علم و هنر.

میرنظامی، س؛ رجبی، س؛ مریدی فریمانی، ف، (۱۳۹۹). تحلیل آثار تورمی افزایش قیمت برق در تعرفه‌های مختلف مصرف بر فعالیت‌های اقتصادی و خانوارها با استفاده از روش داده-ستانده، تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی، ۱۱(۴۱)، صص ۱۴۴-۹۱.