DOI: 10.22034/tjee.2023.53875.4540

Risk-based Preventive Maintenance Planning Model Considering Intangible Risk Indices

Yaser Damchi[1], Javad Saebi[2,*]

[1]Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
[2]Department of Electrical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran
E-mails: Damchi@Shahroodut.ac.ir; J.Saebi@ub.ac.ir

Short Abstract
One of the most important decisions in power systems is the optimal management of assets. Asset management in power distribution companies is mainly based on improving system reliability. Nevertheless, the concerns of distribution companies are not be limited to improving the reliability of the network. Other important criteria related to the risks that threaten their business can influence decision to plan maintenance programs, which are defined as intangible risks. These risks mainly include safety, environmental effects and company reputation. Hence, it is important to include the intangible risk index in the asset management decision-making problem, along with improving the tangible risk index (reliability index), which is not studied in research studies. In this paper, in order to achieve the application of risk management in asset management in electrical energy distribution systems, a risk-based preventive maintenance planning model is proposed from the perspective of tangible and intangible risk indices. The proposed model is applied to a sample feeder from the North Khorasan distribution network in Iran. Risk-based preventive maintenance planning for a 5-year period for the studied feeder and its impact on the company's asset management are presented. The results showed that, using the proposed model, the maintenance costs are decreased by 23 percent compared to existing methods.

Keywords
Maintenance, risk, reliability, distribution system, optimization, asset management.

1- Short Introduction

Asset management is a critical decision in electrical energy distribution systems. Preventive maintenance is one of the important tools for optimal asset managment. Most of the studies conducted in the field of preventive maintenance in power systems have analyzed the tangible risks using reliability indices. Nevertheless, the concerns of distribution companies are not limited to improving the reliability of the network under operation. Other important criteria related to the risks that threaten their business can influence the decision to plan preventive maintenance programs. These risks mainly include safety, environmental effects and reputation of the company. Therefore, it is important to consider the assessment of these risks in the decision-making problem of preventive maintenance.

2- Proposed Work and Methodology

In this paper, in order to achieve the application of risk management in asset management in electrical energy distribution systems, a risk-based preventive maintenance model has been proposed. In this model, in addition to optimizing net operation costs, tangible risk index (reliability indices) as well as intangible risk index (safety, environment and company reputation) are considered. The preventive maintenance planning model is expressed in the form of an optimization problem with the aim of minimizing preventive and corrective maintenance costs constrained by tangible and intangible risk indices. The proposed preventive maintenance planning problem is translated to a mixed-integer linear programming (MILP) and solved by commercial available softwer CPLEX. The proposed model has been implemented on a sample feeder of North Khorasan distribution network. The effect of tangible and intangible risk indices on the planning of the preventive maintenance for this feeder has been investigated. Risk-based preventive maintenance planning for a 5-year period is proposed for the studied feeder.

3- Conclusion

In this article, a practical model for risk-based preventive maintenance planning was proposed. The risk indices considered in this model can be divided into two categories of tangible (quantitative) and intangible (qualitative) indices. In the tangible risk index category, an acceptable level of SAIFI and SAIDI was taken into consideration in preventive maintenance planning. In the category of intangible risk indices, the company reputation, employee safety and environment indices were introduced and utilized. This planning problem was modeled as a mixed-integer linear optimization problem. The proposed model was implemented on one of the important feeders of North Khorasan distribution network. The input data was obtained through three sources, including GIS, the event registration system of distribution company and the company experts. The output of the proposed model is the feeders preventive maintenance planning for a five-year period. The results showed the reduction of maintenance costs along with the improvement of risk indices. The efficiency of the proposed model is directly dependent on the accuracy and completeness of the input data. Therefore, in order to make maximum use of the proposed model, the operators of the distribution system should complete the data registered in their relevant systems.

4- References

[1] Li, Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications. John Wiley & Sons, 2014.
[2] M. Aliyari, V. Baghshani, and A. Barabadi, “Reliability performance analysis in power distribution system using Weibull distribution-A case study”, IEEE 18th Electric Power Distribution Conference, pp. 1-6, 2013..
[3] Jahromi, A., M. Fotuhi-Firuzabad, and E. Abbasi. "An efficient mixed-integer linear formulation for long-term overhead lines maintenance scheduling in power distribution systems", IEEE transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2043-2053, 2009.

مدل برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر ریسک با در نظرگرفتن شاخص‌های ریسک نامشهود

یاسر دامچی
استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

جواد صائبی
استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده
یکی از مهمترین تصمیمات در سیستم‌های قدرت، مدیریت بهینه دارایی‌هاست. مدیریت دارایی در شرکت‌های توزیع عمدتاً بر مبنای بهبود قابلیت اطمینان سیستم صورت می‌گیرد. با این وجود، نگرانی‌های شرکت‌های توزیع تنها به بهبود قابلیت اطمینان شبکه تحت بهره‌برداری محدود نمی‌شود. معیارهای مهم دیگری مرتبط با ریسک که کسب و کار آنها را تهدید می‌کند می‌تواند بر تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری (نت) تأثیرگذار باشد که به عنوان ریسک نامشهود تعریف می‌گردد. این ریسک‌ها عمدتاً شامل ایمنی کارکنان، اثرات زیست محیطی و اعتبار شرکت می‌باشد. بنابراین، لحاظ نمودن شاخص‌های ریسک نامشهود در مساله برنامه‌ریزی نت، در کنار در نظرگرفتن شاخص‌های ریسک مشهود (شاخص‌های قابلیت اطمینان و هزینه)، حائز اهمیت است که تاکنون در مطالعات بررسی نشده است. بنابراین در این مقاله، در راستای دستیابی به کاربرد مدیریت ریسک در مدیریت دارایی‌ها در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی، مدل برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک با در نظرگرفتن شاخص‌های ریسک مشهود و نامشهود پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی بر روی یک فیدر نمونه از شبکه توزیع خراسان شمالی پیاده‌سازی شده است. برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک برای یک دوره ۵ ساله برای فیدر مورد مطالعه و تأثیرگذاری آن در مدیریت دارایی‌های شرکت ارائه شده است. نتایج حاکی از کاهش ۲۳ درصدی هزینه‌های نت شرکت توزیع خراسان شمالی با استفاده از روش نت پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود می‌باشد.

کلمات کلیدی
تعمیرات و نگهداری، ریسک، قابلیت اطمینان، سیستم توزیع، بهینه‌سازی، مدیریت دارایی.

نام نویسنده مسئول: دکتر جواد صائبی
ایمیل نویسنده مسئول: J.Saebi@ub.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰
تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

۱- مقدمه

مدیریت دارایی و افزایش قابلیت اطمینان از دغدغه‌های اساسی در سیستم-های توزیع انرژی الکتریکی می‌باشد. یکی از اقدامات مهمی که جهت دستیابی به اهداف مذکور در سیستم‌های توزیع باید انجام شود، تعمیرات و نگهداری (نت) پیشگیرانه است. به طور کلی، دو استراتژی برای انجام نت پیشگیرانه در شبکه توزیع وجود دارد: ۱- نت دوره‌ای ۲-نت پیشگیرانه. نت دوره‌ای در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد. در حالی‌که، نت پیشگیرانه در صورت نیاز انجام می‌شود.

نت دوره‌ای که در اکثر شرکت‌های توزیع انرژی الکتریکی بکار می‌رود با وجود سادگی پیاده‌سازی، دارای دو نقص مهم می‌باشد. اولاً، این استراتژی به دلیل انجام برنامه‌های نت غیرضروری ممکن است منجر به هزینه‌های بالایی شود. ثانیاً، ممکن است به دلیل عدم انجام نت ضروری در زمان مناسب، سبب افزایش ریسک در سیستم توزیع انرژی شود. برای رفع معایب استراتژی نت دوره‌ای، استراتژی پیشگیرانه مورد توجه بهره‌برداران سیستم‌های توزیع قرار گرفته است. یک راهکار قدرتمند جهت پیاده‌سازی نت پیشگیرانه، نت مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین مراحل اعمال RCM در شبکه، ارزیابی ریسک می‌باشد. هدف از ارزیابی ریسک در یک سیستم، ارزیابی تأثیر خرابی هر یک از اجزاء آن و ترکیبات آن‌ها در ریسک کلی که برای سیستم ایجاد می‌کنند، است. به عبارت دیگر، ارزیابی ریسک در شبکه توزیع علاوه بر تخمین احتمال خرابی تجهیزات شبکه، شدت و میزان عواقبی که آن خرابی برای سیستم در پی دارد را نیز تشخیص می‌دهد. بنابراین، ارزیابی ریسک امکان اولویت‌بندی رخدادها (خرابی تجهیزات) در برنامه‌ریزی نت جهت دستیابی به قابلیت اطمینان بیشتر در شبکه را فراهم می‌نماید.

شبکه توزیع یک شبکه پیچیده با چالش‌های فنی زیادی از جمله ریسک قابل توجه می‌باشد. تا کنون مطالعات مختلفی برای ارزیابی ریسک در این شبکه با اهداف مختلفی از جمله نت مبتنی بر قابلیت اطمینان انجام شده است. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی نت، به تحلیل ریسک مشهود (اقتصادی) پرداخته‌اند. در این مطالعات، سعی شده است تا برنامه‌ریزی‌های نت به گونه‌ای صورت گیرد که ریسک اقتصادی ناشی از از دست رفتن بار مدیریت گردد.

ارزیابی ریسک در سیستم قدرت با رویکرد کاربردی بر روی تجهیزات

مختلف شبکه قدرت در [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این نقش ارزیابی ریسک در RCM نیز در این مرجع مورد بررسی قرار گرفته است. دیدگاه مقررات مبتنی بر کارآیی برای ارائه مشوق‌هایی به شرکت‌های توزیع برای رسیدن به بهره‌وری اقتصادی می‌باشند. سابقه داده‌های قابلیت اطمینان نقش بسیار مهم برای ارزیابی ریسک در شبکه توزیع و انجام اقدامات پیشگیرانه در این دیدگاه دارند. در [۲] برای ارزیابی ریسک اقتصادی شبکه توزیع از دو شاخص SAIFI و SAIDI استفاده شده است. اگر مقدار شاخص‌های مذکوردر ناحیه مرده[۱] باشد، شرکت‌های توزیع جریمه و یا تشویق نمی‌شوند، در حالی‌که اگر شاخص‌های مذکور بیشتر از محدوده باند مرده باشند (کاهش قابلیت اطمینان شبکه)، شرکت‌های توزیع جریمه می‌شوند. همچنین، اگر شاخص‌های مذکور کمتر از محدوده باند مرده باشند (بهبود قابلیت اطمینان شبکه)، شرکت-های توزیع تشویق می‌گردند. دیدگاه پیشنهادی در یک شبکه توزیع کانادا بر اساس داده‌های ده ساله از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰، مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳]، یک چارچوب کارآیی مبتنی بر بازسازی برای فراهم نمودن بهره-وری اقتصادی برای شرکت‌های توزیع در بازار رقابتی انتقال و تولید با ارائه مشوق‌هایی، معرفی شده است. برای ارزیابی ریسک اقتصادی در شبکه توزیع از دو شاخص SAIFI و SAIDI با در نظر گرفتن ساختار جریمه و تشویق استفاده شده است. چارچوب پیشنهادی در دو شبکه توزیع کانادا بر اساس داده‌های ده ساله از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴، ارزیابی شده است. در [۴]، ارزیابی ریسک اقتصادی سیزده شبکه توزیع کانادا بر اساس سابقه عملکرد تجهیزات مبتنی بر کارآیی انجام شده است. مطالعات این مرجع بر اساس داده‌های دوره ده ساله در طول سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۳، انجام شده است و برای ارزیابی ریسک از دو شاخص SAIFI و SAIDI استفاده شده است. در [۵]، یک مدل زنجیره مارکوف اصلاح شده برای تجهیزات شبکه توزیع برای انجام مطالعات نت مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه داده است. در این مرجع، هدف کمینه نمودن هزینه‌های قطع مشرکین، بازرسی‌های و نت می‌باشد. در [۶]، یک روش جدید برای ارزیابی ریسک در شبکه انتقال ارائه شده است، که علاوه بر لحاظ نمودن سابقه آمار خرابی تجهیزات، ریسک شکست عملکرد اجزای سیستم را در نظر می‌گیرد. در این مطالعه از دو شاخص احتمال از دست دادن بار و انرژی مورد انتظار تامین نشده برای ارزیابی ریسک سیستم استفاده شده است. نتایج این مرجع حاکی از آن است که شرایط عملکرد تجهیزات نیز علاوه بر سابقه عملکرد، تأثیر قابل توجه‌ای روی ریسک سیستم انتقال دارد و ریسک خرابی بدست آمده می‌تواند در برنامه‌ریزی نت تجهیزات و شبکه استفاده شود. مرجع [۷] روشی را برای انتخاب یک تابع توزیع وایبل مناسب برای ارزیابی کارآیی قابلیت اطمینان شبکه توزیع پیشنهاد داده است. دیدگاه پیشنهادی بر روی شبکه توزیع جاجرم واقع در خراسان شمالی با جمع‌آوری داده‌های خرابی از سامانه ۱۲۱ بر اساس گزارش-های روزانه، پیاده‌سازی شده است. در [۸]، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر مدیریت دارایی قابلیت اطمینان محور بر روی شبکه توزیع نیجریه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مرجع، از تحلیل آماری برای تعیین و تشخیص دارایی بحرانی برای تجهیزات شبکه توزیع با توجه به داده‌های خروج فیدرها با در نظر گرفتن خروج تجهیزاتی مثل خطوط، کابل‌ها، ترانسفورماتورها، کلیدهای و قطع-کننده‌ها، در طول سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸، استفاده شده است. در این تحلیل از پارامترهای متوسط فاصله بین خرابی‌ها، متوسط فاصله تعمیر و نرخ خرابی فیدرها برای ارزیابی استفاده شده است. در [۹] برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر RCM برای کلیدهای فشارقوی پیشنهاد شده است. دیدگاه پیشنهادی بر روی کلیدهای فشارقوی ۴۰۰ کیلوولت شبکه برق منطقه‌ای خراسان پیاده-سازی شده است. برای رتبه‌بندی کلیدها به منظور پیاده‌سازی برنامه نت، شاخص‌های شرایط فیزیکی و اهمیت هر یک از آن‌ها تعیین شده است. برای تعیین شرایط فیزیکی کلیدها، پارامترهای مختلفی مثل عملکردهای درست و نادرست، سن، سازنده، مکانیزیم عملکرد و محفظه قطع کلیدها، میزان آلودگی و سرمای محل نصب تجهیزات استخراج شده است. لازم به ذکر است که مطالعات انجام شده بر اساس ثبت شش سال حادثه با توجه به دفترچه‌های گزارش حوادث می‌باشد. در [۱۰]، برنامه‌ریزی نت مبتنی بر RCM برای خطوط انتقال و فوق توزیع پیشنهاد شده است که از شاخص‌های شرایط فیزیکی و اهمیت برای رتبه‌بندی خطوط به منظور پیاده‌سازی برنامه استفاده شده است. شرایط فیزیکی خطوط بر اساس اطلاعات حوادث ثبت شده در شش سال برای پارامترهای مختلفی از جمله شرایط آب و هوایی (باد، برف و سرما)، وضعیت جغرافیایی و میزان سرقت محل عبور خط، نوع مقره و نوع دکل استفاده شده در خطوط تعیین شده‌اند. این مطالعه بر روی خطوط شبکه برق منطقه‌ای خراسان انجام شده است. در [۱۱]، استراتژی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای ترانسفورماتورهای شبکه توزیع خراسان شمالی در راستای اجرای چرخه مدیریت سرمایه ارائه شده، که برای ارزیابی قابلیت اطمینان از روش درخت خطا استفاده شده است.

تخصیص بودجه نت پیشگیرانه برای کاهش هزینه تعمیرات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه، یکی از چالش‌های اساسی شرکت‌های توزیع در برنامه‌ریزی استراتژی‌های نت پیشگیرانه است. در مرجع [۱۲]، یک روش مبتنی بر ریسک برای تخصیص منابع و رتبه‌بندی فعالیت‌های نت در سیستم توزیع ارائه شده است. در روش ارائه شده، یک مسئله بهینه‌سازی با هدف حداکثر نمودن کاهش ریسک اقتصادی در اثر فعالیت‌های مذکور با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع نت پیشنهاد شده است. میزان کاهش ریسک بدست آمده از نت هر تجهیز به صورت ترکیبی خطی از میزان کاهش شاخص‌های قابلیت اطمینیان ENS ، SAIDI، SAIFI و هزینه خرابی آن تجهیز در اثر این فعالیت‌ها تعریف شده است. در مرجع [۱۳]، مدلی برای برنامه‌ریزی نت خطوط هوایی توزیع با در نظر گرفتن ریسک‌های مشهود برای یک افق ده ساله ارائه شده است. در مرجع [۱۴]، برنامه‌ریزی نت مبتنی بر ریسک اقتصادی با در نظر گرفتن الگوهای جریمه و پاداش برای خطوط هوایی فیدرهای توزیع ارائه شده است. همچنین یک مدل برای مدل‌سازی نرخ خرابی به منظور در نظر گرفتن تأثیر فعالیت‌های نت بر روی آن پیشنهاد شده است. در دیدگاه پیشنهادی [۱۵]، از روش سلسله مراتبی فازی برای برنامه‌ریزی بودجه نت پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان استفاده شده است. در این روش، میزان قابلیت اطمینان شبکه و تأثیرگذاری بودجه نت پیشگیرانه در بهبود قابلیت اطمینان به عنوان متغیرهای تصمیم-گیری برای تخصیص بودجه در نظر گرفته شده‌اند. برای ارزیابی دیدگاه پیشنهادی، هفت ناحیه شبکه توزیع شهر تهران با توجه به اطلاعات حوادث ثبت شده در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ برای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در [۱۶]، یک شاخص اهمیت وزن‌دار مبتنی بر هزینه به منظور رتبه‌بندی عناصر سیستم توزیع برای نت مبتنی بر قابلیت اطمینان به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نیاز با انجام حداقل فعالیت‌های نت روی عناصر مهم، با ارضای محدودیت‌های بودجه در دو سطح ارائه شده است. در سطح‌های اول و دوم به ترتیب، فیدرها و عناصر آنها رتبه‌بندی می‌شوند. در شاخص پیشنهادی، شاخص-های قابلیت اطمینان SAIFI، SAIDI، ASAI و AENS در نظر گرفته شده‌اند. یک چارچوب جدید مبتنی بر ریسک قابل پیش‌بینی برای افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع برق با بهبود درک اپراتور از وضعیت شبکه در [۱۷] ارائه شده است. در این مرجع، ریسک اندازه‌گیری شده با توجه به همبستگی بین احتمال وقوع حادثه در طول زمان بر اساس احتمال خرابی و تأثیر منتجه از وقوع حادثه بر

[۱] Dead Zone

اساس هزینه‌های قطع توان است. در مرجع [۱۸] مدلی برای افزایش تاب‌آوری طولانی مدت شبکه های توزیع مبتنی بر نت بهینه پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹]، شاخص جدیدی برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه ناشی از کمبود توان راکتیو ارائه شده که در برنامه‌ریزی توسعه ریزشبکه‌های استفاده شده است. در مرجع [۲۰]، تأثیر حضور ترانسفورماتور یدکی بر روی قابلیت اطمینان مجموعه‌ای از پست‌های فوق‌توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۲۱]، مدلی برای ارزیابی تأثیر کلیدزدنی بهینه بر برنامه‌ریزی یک‌پارچه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال ارائه شده است.

با توجه به مرور انجام شده. جدول (۱) مقایسه بین مراجع مختلف و روش پیشنهادی در ارتباط با ارزیابی قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی نت تجهیزات شبکه نشان می‌دهد. نتایج جدول حاکی از آن است که مطالعات انجام شده در زمینه فوق با در نظر گرفتن ریسک‌های مشهود از جمله شاخص‌های قابلیت اطمینان و هزینه می‌باشند. با این وجود، نگرانی‌های شرکت‌های توزیع تنها به بهبود قابلیت اطمینان شبکه تحت بهره‌برداری محدود نمی‌شود. معیارهای مهم دیگری مرتبط با ریسک‌هایی که کسب و کار آنها را تهدید می‌کند، می‌تواند بر برنامه‌ریزی فعالیت‌های نت تأثیرگذار باشد. این ریسک‌ها به طور معمول شامل ایمنی کارکنان[۲]، اثرات زیست محیطی[۳] و اعتبار[۴] شرکت می‌باشد [۲۲-۲۳]. بنابراین، لحاظ نمودن ارزیابی این ریسک‌های مذکور در مساله تصمیم‌گیری مدیریت دارایی حائز اهمیت می‌باشد.

جدول ۱- شاخص‌های ریسک لحاظ شده در ارزیابی قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی نت

مرجع	ریسک مشهود	ریسک نامشهود		
		ایمنی کارکنان	اثرات زیست محیطی	اعتبار شرکت
[۵]-[۱۷]	✓	-	-	-
روش پیشنهادی	✓	✓	✓	✓

در این مقاله، در راستای دستیابی به کاربرد مدیریت ریسک در مدیریت دارایی‌ها برای سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی، مدل نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک پیشنهاد گردیده است. در مدل پیشنهادی، علاوه بر بهینه‌سازی هزینه-های فعالیت‌های نت، شاخص‌های ریسک مشهود (شاخص‌های قابلیت اطمینان و هزینه) و نامشهود (ایمنی کارکنان، اثرات زیست محیطی و اعتبار شرکت) در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی نت در قالب یک مساله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های نت پیشگیرانه و اصلاحی و مقید به قیود ریسک بیان می‌شود. در این مساله، برنامه‌های نت به سه دسته برنامه‌های کلی، جزئی و اصلاح درختان تقسیم می‌گردد که زمان مناسب انجام هر کدام از فعالیت‌های نت پیشگیرانه در یک بازه زمانی بلندمدت تعیین می‌شود. مدل پیشنهادی بر روی یک فیدر نمونه از شبکه توزیع خراسان شمالی، پیاده‌سازی شده است. تأثیر شاخص‌های ریسک مشهود و نامشهود در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه فیدر مذکور برای یک دوره ۵ ساله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به طور خلاصه نوآوری‌های این مطالعه به شرح زیر است:

- معرفی یک مدل نت مبتنی بر ریسک برای یک شبکه توزیع بر اساس داده‌های واقعی
- در نظرگرفتن شاخص‌های ریسک نامشهود در مدل پیشنهادی علاوه بر شاخص‌های ریسک مشهود
- تقسیم‌بندی خرابی‌ها به دو دسته غیرقابل پیشگیری (مستقل از نت) و قابل پیشگیری (وابسته به نت) با توجه به نوع حادثه و عواقب آن به منظور انجام برنامه‌ریزی واقع‌بینانه فعالیت‌ها
- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در فیدر توزیع واقعی جهت ارزیابی کارایی آن
- در نظرگرفتن اهمیت فیدر مورد مطالعه با توجه به پارامترهای مختلفی از جمله طول، نوع بار، میزان بار و دیدگاه بهره‌بردار شبکه در برنامه‌ریزی نت

۲- مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی نت مبتنی بر ریسک

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک قابل استفاده در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی پیشنهاد گردیده است. مدل برنامه‌ریزی نت در قالب یک مساله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های نت پیشگیرانه و اصلاحی و مقید به قیود ریسک بیان گردیده است. در این مساله، مدیریت ریسک نامشهود (کیفی) به مانند مدیریت ریسک مشهود (کمی) مدل گردیده است. علاوه بر این، در این مدل، فیدرهای توزیع با توجه به پارامترهای مختلف از جمله طول فیدر، نوع بار، میزان بار و اهمیت فیدر از دیدگاه بهره‌بردار شبکه رتبه‌بندی می‌شوند و تاثیر آن در مساله بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد. داده‌های ورودی مدل از سه منبع GIS شبکه، سامانه ۱۲۱ شرکت توزیع و کارشناسان خبره شرکت دریافت شده است. مدل پیشنهادی در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد دودویی بیان گردیده است. شکل ۱ روندنمای برنامه‌ریزی نت پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، برنامه‌ریزی نت پیشنهادی متشکل از سه بخش محاسبه و مدل‌سازی نرخ خرابی، ناحیه‌بندی و رتبه‌بندی و برنامه‌ریزی نت است.

در این مطالعه، برنامه‌های نت به سه دسته برنامه‌های کلی، جزئی و اصلاح درختان تقسیم گردیده است که خروجی آن زمان مناسب انجام هر کدام از فعالیت‌های نت پیشگیرانه در یک بازه زمانی بلندمدت است. جزئیات فعالیت-های نت که معمولاً بر روی یک خط انجام می‌شوند در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته شده، نرخ خرابی تجهیزات شبکه به سه بخش نرخ خرابی مربوط به خطاهای جزئی (λ_{Minor})، خطاهای کلی (λ_{Major}) و خطاهای مربوط به پوشش گیاهی و درختان (λ_{Veg}) تفکیک شده است. برای تعیین نوع فعالیت سالیانه نت پیشگیرانه هر فیدر، متغیرهای دودویی I_{Minor} و I_{Major} و I_{Veg} برای فعالیت‌های نت جزئی، کلی و هرس‌کاری تعریف گردیده است. زمانی متغیر دودویی تصمیم‌گیری یک خواهد بود که فعالیت‌های نت مربوط بر روی آن فیدر انجام گرفته باشد. اگر فعالیت‌های نت مربوط به هر یک از فعالیت‌ها انجام شود، مقدار نرخ خرابی تفکیک شده متناظر به مقدار اولیه آن باز خواهد گشت و به عبارتی کاهش می‌یابد. در ادامه، فرمول‌بندی مدل پیشنهادی ارائه گردیده است.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مساله، حداقل نمودن هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه و تعمیرات اصلاحی به صورت توام می‌باشد:

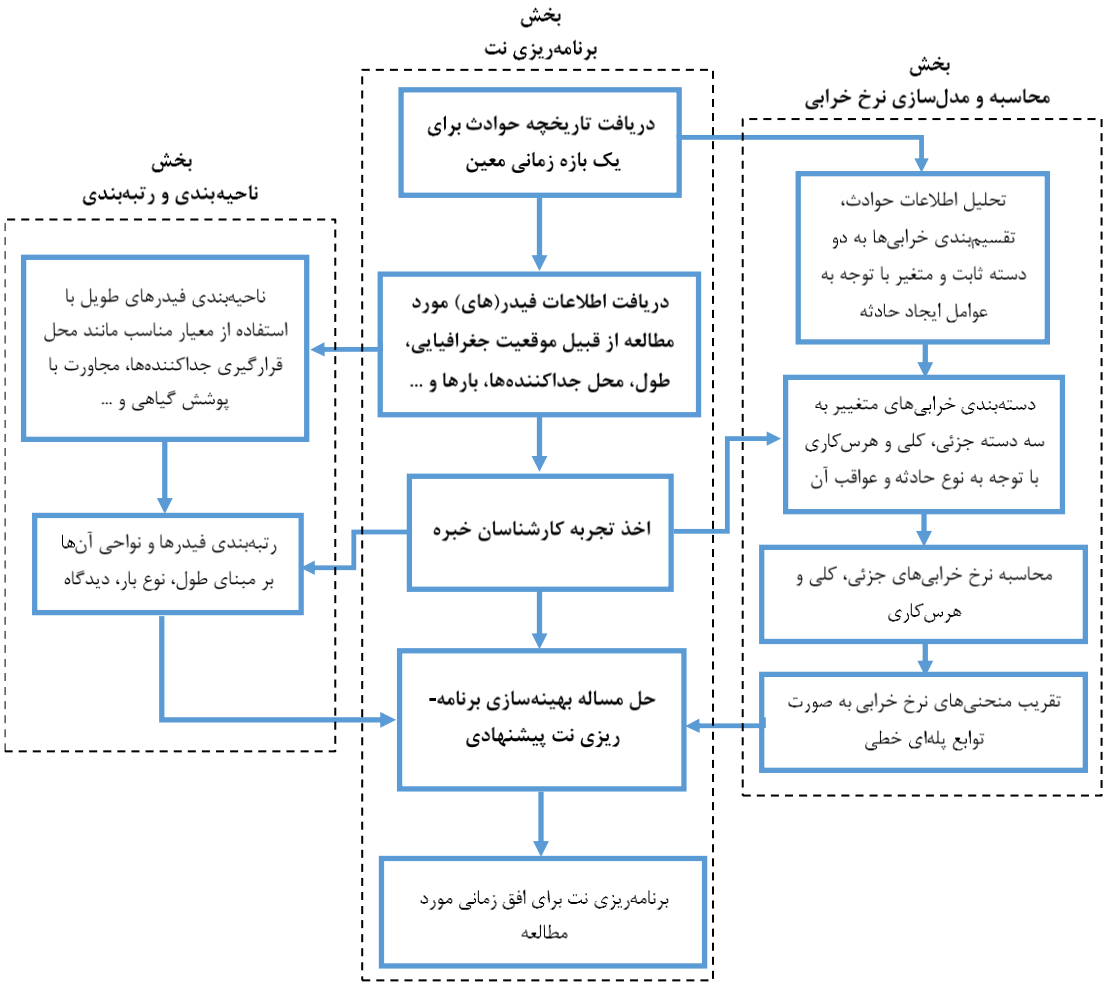
[۲] Safety

[۳] Environment

[۴] Reputation

جدول ۲- فعالیت‌های مختلف نت بر روی فیدرهای هوایی

فعالیت	توضیح
بازدید خطوط	بازدید خط برای اطمینان حاصل کردن از وضعیت عایق‌ها، تجهیزات اتصال و موارد نیاز هرس کاری
تعمیرات جزئی	تقویت تیرها، تعویض عایق‌ها و محکم کردن عایق‌ها
تعمیرات کلی	تعویض و تعمیر تیرها و کابل‌ها
هرس‌کاری	قطع درختان مزاحم نزدیک خطوط



شکل ۱- روندنمای برنامه‌ریزی نت پیشنهادی

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=1}^{Ndf}\left(MC_i^n(t)\times I_i^n(t)+FC_i^n(t)\times\lambda_i^n(t)\right)\times(1+dr)^{-t} \tag{1}$$

در این رابطه، متغیر باینری $I_i^n(t)$ زمانی برابر ۱ است که n امین فعالیت نت بر روی فیدر i در دوره t انجام شده باشد و در غیر این صورت صفر است، $\lambda_i^n(t)$ nامین نرخ خرابی تفکیک شده فیدر i در دوره t که به آخرین باری که nامین فعالیت نت بر روی فیدر انجام شده است بستگی دارد.

۲-۲- قیود

در برنامه‌ریزی نت پیشنهادی، قیود مختلف فنی و اقتصادی به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

تابع $MC_i^n(t)$ در (۱) بیانگر هزینه کل مرتبط با nامین فعالیت نت بر روی فیدر i در دوره t است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$MC_i^n(t)=C_i^{n,Maintenance}+\left(C_i^{n,PUE}+C_i^{n,RPUE}\right)\times(1+LI)^{t-1} \tag{2}$$

تابع $FC_i^n(t)$ در (۱) بیانگر هزینه کل مرتبط با nامین خطای رخ داده بر روی فیدر i در دوره t است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$FC_i^n(t) = C_i^{n,Repair} + \left(C_i^{n,UPUE} + C_i^{n,RUPUE}\right) \times (1+LI)^{t-1} \tag{3}$$

قید بودجه

با توجه به رابطه (۴)، هزینه نهایی نت نباید از بودجه کل اختصاص یافته ($MB(t)$) به آن بیشتر شود.

$$\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=1}^{Ndf}\left(MC_i^n(t) \times I_i^n(t) + FC_i^n(t) \times \lambda_i^n(t)\right) \times (1+dr)^{-t} \le MB(t) \tag{4}$$

قید ساعات کاری

ساعت‌های کار برای تعمیر، رفع خرابی و همچنین فعالیت‌های نگهداری جزئی و کلی برای شرکت‌های توزیع محدود می‌باشند. از آنجا که ساعت‌های کاری نت جزئی و کلی متفاوت از ساعت‌های کاری هرس‌کاری درختان است، قید ساعت کاری نت جزئی و کلی (رابطه (۵)) از قید ساعت کاری هرس‌کاری (رابطه (۶)) به صورت جدا در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=Minor,Major}\left(WH_i^{n,Maintenance} \times I_i^n(t) + WH_i^{n,Repair} \times \lambda_i^n(t)\right) \le WH(t) \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=veg}\left(WH_i^{n,Maintenance} \times I_i^n(t) + WH_i^{n,Repair} \times \lambda_i^n(t)\right) \le WH_{tt}(t) \tag{6}$$

تأثیر انجام نت بر روی نرخ خرابی

با انجام نت مربوط به هر یک از خطاهای جزئی، کلی و پوشش گیاهی و درختان، نرخ خرابی مربوطه کاهش و به مقدار اولیه باز خواهد گشت. در نتیجه ارتباط بین انجام شدن و نشدن فعالیت‌های نت با کاهش و افزایش نرخ خرابی، مطابق روابطه (۷) و (۸) تعریف می‌شود [۱۳].

$$\lambda_i^n(t) \ge DFR_i^n(Initial) \times I_i^n(t) \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &\lambda_i^n(t) \ge DFR_i^n(m) \times \left(1 - \sum_{r=0}^{m-1} I_i^n(t-r)\right) \\ &\forall i = 1,\dots,NF \;\; \forall t = 1,\dots,T \;\; \forall m = 1,\dots,Nif \\ &\forall n = Minor, Major, Veg. \end{aligned} \tag{8}$$

مدل‌سازی ریسک مشهود

قیود ذکر شده در بالا همگی به نوعی برای استراتژی بهینه نت لازم می‌باشند ولی کافی نیستند چرا که درصد رضایت مشترکین از عملکرد شرکت توزیع به مدت زمان و تعداد دفعات قطعی (قیود قابلیت اطمینان) که به آن ها تحمیل شده، بستگی دارد. بدین منظور، در این مطالعه از شاخص‌های ریسک مشهود SAIFI و SAIDI استفاده می‌گردد.

$$\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=1}^{N_{df}}\left(\frac{NC_i^{n,M}}{NC} \times I_i^n(t) + \frac{NC_i^{n,F}}{NC} \times \lambda_i^n(t)\right) \le SAIFI_i(t) \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=1}^{N_{df}}\left(\begin{aligned} &\frac{\sum_{k=1}^{NC_i^{n,M}} AD_{i,k}^{n,POutage}}{NC} \times I_i^n(t) \\ &+ \frac{\sum_{k=1}^{NC_i^{n,F}} AD_{i,k}^{n,UPOutage}}{NC} \times \lambda_i^n(t) \end{aligned}\right) \le SAIDI_i(t) \tag{10}$$

لازم به ذکر است که فیدرها بر اساس معیارهای مشخصی رتبه‌بندی و با توجه به اهمیت، مقادیر کران بالای $SAIFI_i(t)$ و $SAIDI_i(t)$ برای هر کدام مشخص می‌گردد.

مدل‌سازی ریسک نامشهود

از دیدگاه شرکت توزیع، عواقب کیفی ناشی از رخداد خرابی، موسوم به ریسک نامشهود، نیز حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله، اعتبار شرکت، ایمنی کارکنان و اثرات زیست محیطی به عنوان شاخص‌های ریسک نامشهود به صورت زیر مدل می‌گردند.

اعتبار و خوشنامی شرکت توزیع ارتباط مستقیم با نحوه سرویس‌دهی به مشترکین و به عبارت دیگر ارائه خدمات تامین برق مداوم مشترکین دارد. بنابراین، برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه با پیشگیری از رخداد خرابی‌ها در شبکه تحت بهره‌برداری شرکت توزیع به کاهش خاموشی‌ها و در نتیجه افزایش اعتبار شرکت می‌انجامد. به منظور مدل کردن این شاخص ریسک در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، از رابطه ضریب آمادگی استفاده شده است. ضریب آمادگی به عنوان معیاری برای رتبه‌بندی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$AF(t) = \left(1 - \frac{FD_{total}}{N_{element}} \times \frac{1}{8760 \times 60}\right) \times 10^5 \tag{11}$$

ضریب فوق در صدهزار بیان شده است که بیانگر میزان آمادگی تجهیزات شبکه تحت بهره‌برداری شرکت توزیع است. برای لحاظ نمودن این ضریب در برنامه‌ریزی نت، قید (۱۲) به مساله بهینه‌سازی نت پیشگیرانه اضافه می‌گردد:

$$\begin{aligned} &1 - \frac{1}{N_{element}} \times \frac{1}{8760 \times 60} \times \\ &\sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=1}^{N_{df}}\left(\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{NC_i^{n,M}} AD_{i,k}^{n,POutage} \times I_i^n(t) \\ &+ \sum_{k=1}^{NC_i^{n,F}} AD_{i,k}^{n,UPOutage} \times \lambda_i^n(t) \end{aligned}\right) \times 10^5 \ge AF_m(t) \end{aligned} \tag{12}$$

برنامه‌های نت اصلاحی و پیشگیرانه، ریسک جراحت و فوت برای تیم فعالیت‌ها را به همراه دارد. برای مدل کردن این شاخص ریسک در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، شاخص نرخ جراحت (IR) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$IR = \frac{N_{Injury}}{N_{Maintenance}} \tag{13}$$

با معلوم بودن این نرخ، به کمک قید (۱۴) می‌توان شاخص ریسک ایمنی کارکنان را در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه لحاظ نمود:

$$IR \times (1-\eta) \times \sum_{i=1}^{NF}\sum_{n=Minor,Major,Veg}\left(I_i^n(t) + \lambda_i^n(t)\right) \le NI_m(t) \tag{14}$$

دغدغه دیگر شرکت‌های توزیع میزان تأثیرگذاری شبکه تحت بهره‌برداری بر محیط زیست است. پاره‌ای از حوادث شبکه، منجر به آسیب به محیط زیست می‌شوند. به عنوان نمونه، رخداد آتش‌سوزی در یک پست توزیع، آلودگی زیست محیطی را به همراه خواهد داشت. همچنین، برخورد شاخه‌های درخت با خطوط شبکه می‌تواند منجر به آتش‌سوزی و آسیب زیست محیطی گردد. به منظور لحاظ نمودن این شاخص ریسک در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، ابتدا حوادث منجر به عواقب زیست محیطی (EC) رخ داده در شبکه مورد مطالعه، شناسایی شده و به کمک قید زیر وقوع این حوادث را در شبکه محدود می‌گردد.

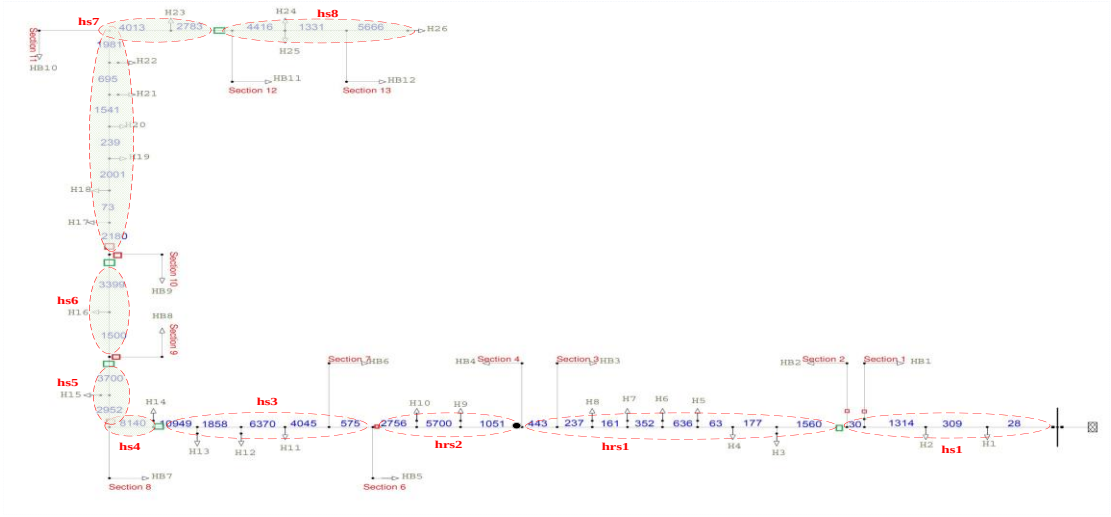
$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{NF}\lambda_i^{EC}(t) \le NE_m \tag{15}$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک بر روی یکی از فیدرهای مهم شبکه توزیع خراسان شمالی تحت عنوان فیدر حرفه پیاده شده است (شکل ۲). فیدر مورد مطالعه بسیار بزرگ می باشد (۸۵ کیلومتر). بنابراین، به منظور تسریع و برنامه‌ریزی مناسب‌تر و مؤثرتر در انجام فعالیت‌های نت، در ابتدا، فیدر مورد مطالعه به ۹ ناحیه کوچک‌تر تقسیم می‌شود. لذا، مقدار NF در مساله برابر ۹ خواهد بود. با توجه به نظر کارشناسان خبره شرکت توزیع، محل قرارگیری کلیدها و جداکننده‌ها در طول فیدر به عنوان معیار ناحیه‌بندی انتخاب شده است. با این‌حال، در مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی نت امکان تقسیم‌بندی بر اساس هر معیار پیشنهادی بهره‌بردار به راحتی قابل اعمال خواهد بود. علاوه بر این، بخش‌هایی که در مجاورت درختان قرار دارند و نیاز به هرس‌کاری دارند نیز متمایز گردیده است (با رنگ سبز در شکل ۲ مشخص شده است).

به منظور انجام برنامه‌ریزی واقع‌بینانه فعالیت‌های نت، خرابی‌ها با توجه به نوع حادثه و عواقب آن، به دو دسته غیرقابل پیشگیری و قابل پیشگیری تقسیم‌بندی گردیده است. لازم به ذکر است که فعالیت‌های نت تاثیری روی نرخ خرابی حوادث غیرقابل پیشگیری ندارد. به عبارتی در این حالت، نرخ خرابی مستقل از نت می‌باشد. در مقابل، نرخ خرابی قابل پیشگیری متاثر از فعالیت‌های نت می‌باشد که این وابستگی به کمک رابطه‌های (۷) و (۸) مدل‌سازی گردیده است. عوامل منجر به خرابی در هر کدام از دسته‌بندی‌های ثابت و متغیر برای فیدر حرفه و مقادیر نرخ خرابی مربوطه، به ترتیب، در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. علاوه بر این، تجزیه عوامل خرابی به جزئی، کلی و هرسکاری با توجه به شدت حادثه منتجه در جدول ۴ برای فیدر مورد مطالعه گزارش شده است. معیار تقسیم‌بندی به ایرادهای کلی و جزئی، نوع خرابی و عواقب حاصله از آن با استفاده از گزارش سامانه ۱۲۱ شرکت توزیع برق خراسان شمالی و بر اساس مشورت با کارشناسان خبره شرکت توزیع بوده است.

برای مدل‌سازی، ابتدا روند افزایش نرخ خرابی برای فیدر حرفه با استفاده از اطلاعات خرابی‌های بی‌برنامه ثبت شده در شرکت توزیع برای بازه زمانی ۷ ساله استخراج گردیده است. شکل ۳ این روند را برای فیدر حرفه نشان می‌دهد.



شکل ۲- دیاگرام تک خطی فیدر حرفه و تقسیم بندی آن برای فعالیت‌های نت

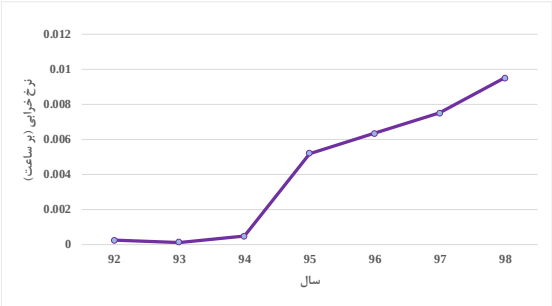
جدول ۳- عوامل منجر به خرابی غیرقابل پیشگیری با نت فیدر حرفه

عامل خرابی	تعداد رخداد	مدت خاموشی (دقیقه)	نرخ خرابی (برسال)
برخورد پرندگان	۸۴	۹۶/۵	۱۹/۵۳
عیب گذرا	۲۱	۲۴/۶۶	
حوادث غیرقابل پیش‌بینی و عیب نامشخص	۱۰	۱۲/۸۲	
اشکال در شبکه داخلی و لوازم اندازه‌گیری مشترکان	۴	۷/۳۳	
برخورد اشیاء خارجی	۳	۳/۷۵	
قطع سکشنلایزر یا ریکلوزر میان خط	۳	۲/۲۳	
خطای نیروی انسانی	۱	۰	
سرقت تجهیزات شبکه	۱	۰/۴۲	

به کمک رابطه‌های (۷) و (۸)، منحنی افزایشی نرخ خرابی هر کدام از بخش‌های تجزیه شده فیدر حرفه به صورت یک تابع پله‌ای با ۱۰ پله تقریب زده شده است. سپس، با توجه به اطلاعات جدول‌های ۳ و ۴، توابع پله‌ای نرخ خرابی برای هر کدام از بخش‌های فیدر به نرخ‌های خرابی ثابت، جزئی، کلی و هرس‌کاری تفکیک شده است. بنابراین، نرخ خرابی کل به کمک رابطه (۱۶) تفکیک می‌گردد که فعالیت‌های نت تنها روی کاهش نرخ خرابی بخش دوم این رابطه تاثیرگذار است و λ_{Fixed} به واسطه فعالیت‌های نت پیشگیرانه تغییری نمی‌کند.

$$\lambda_{tot}(t) = \lambda_{Fixed} + \sum_{n=Minor,Major,Veg} \lambda_n(t) \qquad (16)$$

مقادیر کران‌های بالای در نظر گرفته شده برای شاخص‌های SAIFI و SAIDI برای بخش‌های مهم و کم اهمیت فیدر حرفه (رتبه‌بندی بر اساس معیارهای طول، تعداد مشترکین، میزان و نوع بار صورت گرفته است) در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۳- روند افزایش نرخ خرابی فیدرحرفه

جدول ۴- عوامل منجر به خرابی قابل پیشگیری با نت فیدر حرفه

نوع	عامل خرابی	نرخ خرابی (برسال)	میانگین مدت خاموشی (ساعت)
ایرادهای جزئی	کیفیت نامناسب فیوز لینک اشکال در مقره اشکال در سرکابل هوایی یا زمینی اشکال در جمپر بروز عیب در قطع‌کننده‌ها سوختن کابلشو کابل ارتباط ترانسفورماتور به تابلو فشار ضعیف اشکال در جرقه گیر عیب در کلید اصلی یا تابلوی فشار ضعیف	۴/۶	۱/۲۷
ایرادهای کلی	شرایط نامساعد جوی برخورد هادی‌های شبکه به هم یا به بدنه عیب در تجهیزات و کلیدهای داخل پست زمینی اشکال در پایه (سیمانی، چوبی، فلزی) سیل و آب‌گرفتگی آتش‌سوزی در پست	۸	۱/۵۲
اصلاح درختان	برخورد شاخه درخت با شبکه	۰/۶۲	۱/۱۶

کران پایین ضریب آمادگی مورد نظر شرکت توزیع، یعنی AF_m، برابر با ۹۹۹۰۰ لحاظ شده است که معادل با عدم آمادگی (۱۰۰۰۰۰)/(۹۹۹۰۰-۱۰۰۰۰۰) یا ۰/۱ درصد در طول سال است. با توجه به اطلاعات موجود از حوادث جرح و فوت در فعالیت‌های نت در شرکت توزیع خراسان شمالی، نرخ جراحت برابر با ۰/۰۰۶۹ نفر در هر فعالیت نت است. با توجه به داده‌های موجود، حوادث آسیب‌زننده محیط زیست قابل مدل‌سازی در مساله، تنها حوادث ناشی از برخورد شاخه درختان با خطوط شبکه است که منجر به آتش‌سوزی و آسیب به محیط زیست می‌گردد.

۳-۱- برنامه نت پیشنهادی برای فیدر مورد مطالعه

برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، رابطه‌های (۱) – (۱۵)، در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد دودویی مدل گردیده است و در محیط برنامه نویسی GAMS پیاده‌سازی شده و توسط حل‌کننده تجاری CPLEX 10.1.1 حل شده است. خروجی آن برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه برای بازه ۵ ساله برای هرکدام از فعالیت‌های نت جزئی، کلی و هرس‌کاری با هدف دستیابی به ریسک قابل قبول می‌باشد.

جدول ۵- سطح ریسک در نظر گرفته شده برای بخش‌های فیدر حرفه

	بخش	SAIFI	SAIDI
مهم	hs4	۵/۱۷	۶/۹۶
	hs4	۸/۱۸	۱۰/۰۶
	hs4	۶/۴۸	۸/۲۷
	hs4	۵/۸۳	۷/۰۵
کم اهمیت	hs1	۰/۰۲۴	۰/۰۲
	hrs1	۲	۳/۲
	hrs2	۲/۰۴	۶
	hs3	۲/۰۶	۶
	hs8	۱/۲	۱/۶

جدول ۶ خروجی برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه را در دو حالت: حالت ۱: فقط با لحاظ نمودن ریسک مشهود (مشخص شده با هاشور) و حالت ۲: با لحاظ نمودن ریسک مشهود و نامشهود (مشخص شده به صورت توپر) نشان می‌دهد. مقادیر هزینه‌های تعمیرات و نگهداری به تفکیک برای ۵ سال برنامه‌ریزی در جدول ۷ گزارش گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، لحاظ نمودن شاخص‌های ریسک مشهود تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر هزینه‌های نت نداشته است (افزایش کمتر از ۱ درصد).

جدول ۶- برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه برای فیدر حرفه

	سال اول			سال دوم			سال سوم			سال چهارم			سال پنجم		
بخش	جزئی	کلی	هرس کاری	جزئی	کلی	هرس کاری	جزئی	کلی	هرس کاری	جزئی	کلی	هرس کاری	جزئی	کلی	هرس کاری
hs1															
hrs1															
hrs2															
hs3															
hs4															
hs5															
hs6															
hs7															
hs8															

به منظور نمایش اثر فعالیت‌های نت پیشگیرانه بر شاخص‌های ریسک، با تغییر مقادیر پایه محدودیت‌های ریسک انتخاب شده، این مقادیر در ضریب ۰/۹۲ تا ۱/۵ ضرب شده‌اند، هزینه‌های تعمیرات، نگهداری و کل هزینه‌های نت در شکل ۴ برای فیدر حرفه مقایسه گردیده است. علاوه بر این، در این شکل، روند تغییر شاخص‌های ریسک مشهود (SAIFI و SAIDI) با افزایش محدودیت-های شاخص‌های ریسک نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش ریسک، تعداد برنامه‌های نت پیشگیرانه کمتر و در نتیجه هزینه‌های آن کاهش می‌یابد. در مقابل، هزینه تعمیرات اصلاحی به واسطه افزایش نرخ خرابی افزایش می‌یابد.

جدول ۷- هزینه‌های نت فیدر حرفه به تفکیک سال (تومان)

سال	حالت	پیشگیرانه	اصلاحی	کل
اول	۱	۵۹۰۱۴۳۴	۱۱۵۱۲۹۵۰۰	۳۳۱۶۳۱۵۰
	۲	۱۰۱۴۰۶۸۰	۱۱۵۷۵۳۳۰۰	۱۲۵۸۹۴۰۰۰
دوم	۱	۵۱۶۴۳۷۱۰	۱۰۴۹۹۱۴۰۰	۶۹۳۴۰۶۰۰
	۲	۴۹۹۶۱۴۴۰	۱۰۶۰۲۵۷۰۰	۱۵۵۹۸۷۲۰۰
سوم	۱	۷۷۲۱۴۳۱۰	۹۳۳۹۷۲۶۰	۸۴۵۰۰۳۸۰
	۲	۸۰۶۶۵۵۷۰	۹۲۹۴۸۹۷۰	۱۷۳۶۱۴۵۰۰
چهارم	۱	۷۷۴۶۳۱۷۰	۹۱۷۰۸۷۱۰	۸۰۳۸۷۴۷۰
	۲	۷۲۹۵۱۸۸۰	۹۱۸۱۳۷۰۰	۱۶۴۷۶۵۶۰۰
پنجم	۱	۲۸۶۴۹۱۷۰	۹۴۳۳۲۱۴۰	۳۲۶۶۲۷۳۰
	۲	۳۲۰۳۲۱۵۰	۹۵۲۱۸۵۹۰	۱۲۷۲۵۰۷۰۰
کل	۱	۲۴۰۸۷۱۸۰۰	۴۹۹۵۵۹۱۰۰	۷۴۰۴۳۰۹۰۰
	۲	۲۴۵۷۵۱۷۰۰	۵۰۱۷۶۰۳۰۰	۷۴۷۵۱۲۱۰۰

به منظور مقایسه میزان تأثیرگذاری ریسک مشهود و نامشهود در برنامه-ریزی نت، مساله برنامه‌ریزی نت به ازای هر دسته از شاخص‌های مشهود و نامشهود به صورت جداگانه اجرا گردیده و هزینه‌های نت و شاخص‌های ریسک دو حالت با یکدیگر در جدول ۸ مقایسه شده است.

جدول ۸- مقایسه برنامه‌ریزی نت مبتنی بر ریسک مشهود و نامشهود در فیدر حرفه

	ریسک مشهود	ریسک نامشهود
هزینه نگهداری (تومان)	۲۴۰۸۷۱۸۰۰	۱۳۴۲۹۱۳۰۰
هزینه تعمیرات (تومان)	۴۹۹۵۵۹۱۰۰	۵۲۷۷۸۰۳۰۰
هزینه کل (تومان)	۷۴۰۴۳۰۹۰۰	۶۶۲۰۷۱۶۰۰
SAIFI	۲۶/۲	۲۹/۵
SAIDI	۳۰/۹	۳۷/۳
کران پایین ضریب اعتبار شرکت	۹۹۹۱۰	۹۹۹۰۵
کران بالای تعداد جراحات در سال	۰/۴۷	۰/۴۵
کران بالای تعداد حوادث آسیب‌زننده محیط زیست	۰/۸۵	۰/۱۹

۳-۲- مقایسه با سایر روش‌ها

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصله از مدل پیشنهادی و نیز ارزیابی کارایی آن، روش پیشنهادی با روش‌های برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک مراجع [۱۲] و [۱۳] مقایسه گردیده است. در مرجع [۱۲]، شاخص‌های ریسک کمی SAIFI و SAIDI مقید به محدودیت‌های بودجه‌ای حداقل شده است. در مرجع [۱۳]، حداقل نمودن هزینه‌های نت پیشگیرانه مقید به محدودیت‌های شاخص‌های ریسک کمی SAIFI و SAIDI لحاظ شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۹ قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که، هزینه‌های نت در روش پیشنهادی در مقایسه با مرجع [۱۲] کاهش یافته، ولی مقادیر شاخص‌های ریسک افزایش یافته است. در مقایسه با مرجع [۱۳]، در روش پیشنهادی به دلیل اضافه شدن شاخص‌های ریسک نامشهود، هزینه‌های نت افزایش می‌یابد. در مقابل، شاخص‌های ریسک مشهود (SAIFI و SAIDI) و نامشهود (جدول ۸) بهبود داشته است.

جدول ۹- مقایسه روش‌های نت (هزینه‌ها به تومان)

	مرجع [۱۲]	مرجع [۱۳]	روش پیشنهادی
هزینه نت پیشگیرانه	۳۲۵۱۳۶۱۲	۲۱۷۳۲۴۷۰۱	۲۴۵۷۵۱۷۰۰
هزینه نت اصلاحی	۴۷۷۸۷۶۰۱۱	۵۰۵۲۹۱۱۰۰	۵۰۱۷۶۰۳۰۱
هزینه کل	۸۰۳۰۱۲۲۲۳	۷۲۲۶۱۵۸۰۱	۷۴۷۵۱۲۱۰۱
SAIFI	۲۵/۱۸	۲۷/۳۲	۲۷/۲۹
SAIDI	۳۰/۷۸	۳۳/۵۹	۳۳/۵۶

در حال حاضر، نت در شبکه توزیع خراسان شمالی به صورت دوره‌ای و اضطراری (سالانه و در برخی موارد به صورت تصادفی) صورت می‌پذیرد. به منظور نشان دادن میزان کارایی مدل پیشنهادی، هزینه‌های برنامه‌ریزی نت در یک بازه زمانی ۵ ساله با روش مورد استفاده فعلی مقایسه گردیده است. بدین منظور، هزینه‌های نت دوره‌ای صورت گرفته شده در یک بازه ۵ ساله در شبکه توزیع خراسان شمالی جمع‌آوری گردیده است. نتایج مقایسه در جدول ۱۰ گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با تخصیص بهینه هزینه‌های نت بر روی فیدر مورد مطالعه بر مبنای شاخص‌های ریسک به کمک مدل پیشنهادی، کاهش ۲۳/۵ درصدی هزینه‌ها در بازه زمانی ۵ ساله را به همراه خواهد داشت.

جدول ۱۰- مقایسه هزینه نت روش‌های موجود و پیشنهادی (تومان)

روش موجود (۵ سال)	مدل پیشنهادی (۵ سال)	درصد کاهش
۳۲۰،۲۰۰،۰۰۰	۲۴۵،۷۵۱،۷۰۰	۲۳/۵

۴- نتیجه‌گیری

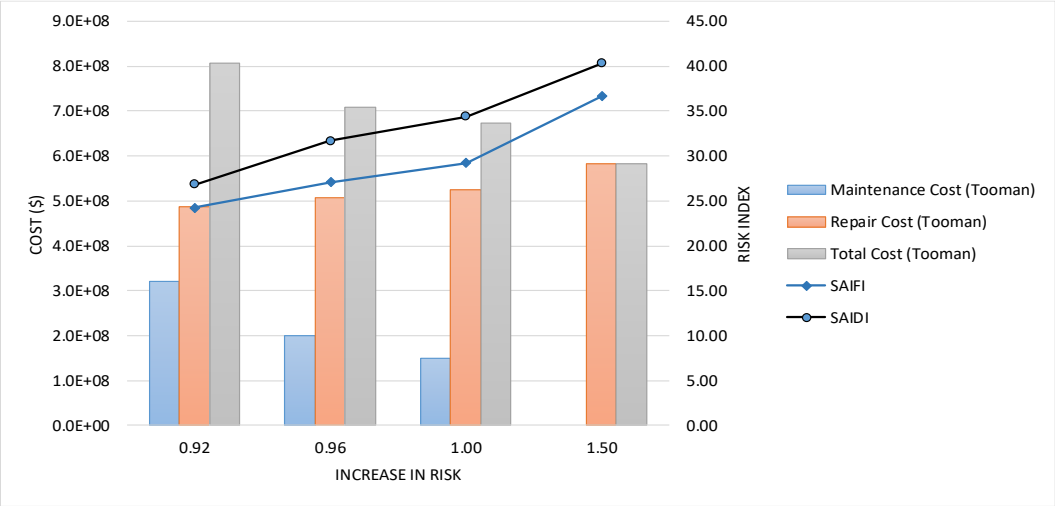
در این مقاله، یک مدل کاربردی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (نت) مبتنی بر ریسک پیشنهاد گردید. شاخص‌های ریسک در نظر گرفته شده در این برنامه‌ریزی به دو دسته شاخص‌های مشهود (کمی) و نامشهود (کیفی) قابل تقسیم‌بندی می‌باشد. در دسته شاخص‌های ریسک مشهود، سطح قابل قبولی از SAIFI و SAIDI در برنامه‌ریزی نت مورد توجه قرار گرفت. در دسته شاخص‌های ریسک نامشهود نیز شاخص‌های اعتبار شرکت، ایمنی کارکنان و اثرات زیست محیطی لحاظ گردید. مساله برنامه‌ریزی پیشنهادی در قالب یک مساله بهینه-سازی خطی آمیخته با اعداد دودویی مدل‌سازی گردید.

مدل پیشنهادی بر روی یک فیدر پرحادثه شبکه توزیع خراسان شمالی پیاده‌سازی شد. اطلاعات ورودی از طریق سه منبع GIS، سامانه ۱۲۱ شرکت توزیع و کارشناسان خبره اخذ و به عنوان ورودی در مدل پیشنهادی استفاده شد. خروجی مدل پیشنهادی، چگونگی انجام فعالیت‌های نت بر روی فیدر موردمطالعه برای یک بازه زمانی ۵ ساله است. نتایج حاصله حاکی از کاهش هزینه‌های نت علاوه بر بهبود شاخص‌های ریسک با اعمال روش پیشنهادی در مقایسه با روش موجود می‌باشد. همچنین، روش پیشنهادی دارای کارایی مطلوبی در مقایسه با سایر روش‌های برنامه‌ریزی نت مبتنی بر ریسک است. در قالب کارهای آینده، به منظور واقع بینانه‌تر نمودن مدل پیشنهادی، لحاظ نمودن

عدم قطعیت‌های موجود در شبکه‌های توزیع در برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه پیشنهاد می‌گردد.

سپاس‌گزاری

این تحقیق با همکاری و حمایت شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی انجام شده است.



شکل ۴- تأثیر معیار ریسک در هزینه‌های نت در فیدر حرفه

نمادها

Reliability Centered Maintenance (RCM)	تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان
System Average Interruption Frequency (SAIFI) Index	شاخص متوسط فرکانس قطع سیستم
System Average Interruption Duration Index (SAIDI)	شاخص متوسط مدت قطع سیستم
Loss-Of-Load Probability (LOLP)	احتمال از دست دادن بار
Expected Energy Not Supplied (EENS)	انرژی مورد انتظار تامین نشده
Average Service Availability Index (ASAI)	شاخص متوسط دسترس‌پذیری
Average Energy Not Supplied (AENS)	متوسط انرژی تامین نشده
λ_{Minor}	نرخ خرابی خطاهای جزئی
λ_{Major}	نرخ خرابی خطاهای کلی
λ_{Veg}	نرخ خرابی خطاهای پوشش گیاهی و درختان
I_{Veg} and I_{Minor}, I_{Major}	متغیرهای دودویی به ترتیب برای مدلسازی انجام فعالیت‌های نت جزئی، کلی و هرسکاری
T	دوره برنامه‌ریزی نت بلندمدت (سال)
NF	تعداد فیدرهای در نظر گرفته شده در برنامه‌ریزی نت
Ndf	تعداد نرخ‌های خرابی تفکیک شده یا فعالیت‌های نت (مانند خطاهای جزئی، خطاهای کلی و خطاهای مربوط به پوشش گیاهی)
Discount Rate (dr)	نرخ نزول بانک
LI	نرخ افزایش بار سالانه
$C_i^{n,Maintenance}$	هزینه کل مواد و ساعت کار مورد نیاز برای nامین فعالیت نت بر روی فیدر i (تومان)
$C_i^{n,PUE}$	هزینه جریمه پرداختی بابت انرژی تامین نشده برنامه‌ریزی شده ناشی از nامین فعالیت نت بر روی فیدر i توسط شرکت توزیع (تومان)
$C_i^{n,RPUE}$	سود از دست رفته شرکت توزیع بابت انرژی تامین نشده برنامه‌ریزی شده ناشی از nامین فعالیت نت بر روی فیدر i (تومان)
$C_i^{n,Repair}$	هزینه کل مواد و ساعت کار مورد نیاز برای تعمیر n امین خطای رخ داده بر روی فیدر i (تومان)
$C_i^{n,UPUE}$	هزینه جریمه پرداختی بابت انرژی تامین نشده برنامه‌ریزی نشده ناشی از nامین فعالیت نت بر روی فیدر i توسط شرکت توزیع (تومان)
$C_i^{n,RUPUE}$	سود از دست رفته شرکت توزیع بابت انرژی تامین نشده برنامه‌ریزی نشده ناشی از nامین فعالیت نت بر روی فیدر i (تومان)
$WH_i^{n,Repair}$	تعداد نفر ساعت کار لازم برای تعمیر nامین خطای رخ داده بر روی فیدر i (ساعت)

$WH_i^{n,Maintenance}$	مقدار نفر ساعت کار لازم برای nامین فعالیت نت بر روی فیدر i (ساعت)
$WH(t)$	تعداد ساعت‌های کار در دسترس در دوره t برای فعالیت‌های نت جزئی و کلی (ساعت)
$WH_{tt}(t)$	تعداد ساعت‌های کار در دسترس در دوره t برای هرس‌کاری یا رفع خطاهای مربوط به پوشش گیاهی (ساعت)
$DFR_i^n(Initial)$	مقدار اولیه nامین نرخ خرابی جدا شده بر روی فیدر i
$DFR_i^n(m)$	mامین گام پله تابع توزیع استفاده شده در مدل نرخ خرابی تفکیک شده فیدر i
$NC_i^{n,M}$	تعداد مشترکین متأثر با توجه به nامین فعالیت نت بر روی فیدر i
$NC_i^{n,F}$	تعداد مشترکین متأثر با توجه به nامین خطای رخ داده بر روی فیدر i
$AD_{i,k}^{n,POutage}$	متوسط زمان قطعی دیده شده توسط kامین مشترک ناشی از nامین فعالیت نت فیدر i (ساعت)
$AD_{i,k}^{n,UPOutage}$	متوسط زمان قطعی دیده شده توسط kامین مشترک ناشی از nامین خطای رخ داده بر روی فیدر i (ساعت)
NC	تعداد کل مشترکین فیدر
FD_{total}	کل زمان خاموشی ناشی از خروج‌های بی‌برنامه و با برنامه در بازه زمانی مورد مطالعه t (ساعت)
$N_{element}$	تعداد عناصر (خط و ترانسفورماتور) فیدر
$AF_m(t)$	کران پایین ضریب آمادگی شرکت توزیع
N_{Injury}	تعداد کل جراحات رخ داده شده در فعالیت‌های نت اصلاحی و پیشگیرانه در بازه زمانی برنامه‌ریزی
$N_{Maintenance}$	تعداد کل فعالیت‌های نت اصلاحی و پیشگیرانه در بازه زمانی برنامه‌ریزی
$NI_m(t)$	کران بالای تعداد جرح و فوت در در هر سال
η	درصد آمادگی تیم تعمیرات
NE_m	کران بالای تعداد حوادث آسیب زننده محیط زیست در بازه زمانی برنامه‌ریزی
$\lambda_i^{EC}(t)$	نرخ خرابی مربوط به حوادث آسیب زننده محیط زیست

مراجع

[1] L. Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications. John Wiley & Sons, 2014.

[2] R. Billinton, Z. Pan, “Historic performance-based distribution system risk assessmen”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp.1759-1765, 2004.

[3] A. A. Chowdhury, “Distribution system risk assessment based on historical reliability performance”, IEEE International Conference on Electro Information Technology, pp. 7-pp, 2005.

[4] Z. Feng, R. Billinton, “Electric distribution system risk assessment using actual utility reliability data”, Thesis, Degree of Master of Science, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada, 2006.

[5] G. P. Park, Y. T. Yoon, “Application of ordinal optimization on reliability centered maintenance of distribution system”, European Transactions on Electrical Power, vol. 22, no. 3, pp. 391–401, 2012.

[6] L. Guo, C. X. Guo, W. H. Tang, Q. H. Wu, “Evidence-based approach to power transmission risk assessment with component failure risk analysis”, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 7, pp. 665-672, 2012.

[7] M. Aliyari, V. Baghshani, A. Barabadi, “Reliability performance analysis in power distribution system using Weibull distribution-A case study”, IEEE 18th Electric Power Distribution Conference, pp. 1-6, 2013.

[8] A. U. Adoghe, C. O. A. Awosope, J. C. Ekeh, “Asset maintenance planning in electric power distribution network using statistical analysis of outage data”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 47, pp. 424-435, 2013.

[9] M. Abbasghorbani, H. R. Mashhadi, and Y. Damchi, “Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks”, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 9, pp. 1583-1590, 2014.

[10] M. Abbasghorbani, Y. Damchi, H. R. Mashhadi, “Reliability-centered maintenance for overhead transmission lines in composite power system”, International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 2022, pp. 1-11, 2022.

[۱۱] حمید شریفیان، جواد محمودی، علی رحیمی و مهدی علی‌یاری،"تعمیر و نگهداری با محوریت قابلیت اطمینان (RCM) ترانسفورماتورهای توزیع در راستای اجرای چرخه مدیریت سرمایه (EAM)"، بیست و یکمین کنفرانس توزیع برق، اردیبهشت ۱۳۹۵.

[12] S. R. K. Yeddanapudi, Y. Li, J. D. McCalley, A. A. Chowdhury, and W. T. Jewell, "Risk-based allocation of distribution system maintenance resources", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 287-295, 2008.

[13] Jahromi, A., M. Fotuhi-Firuzabad, E. Abbasi. "An efficient mixed-integer linear formulation for long-term overhead lines maintenance scheduling in power distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2043-2053, 2009.

[14] A. Moradkhani, M. R. Haghifam, S. M. Abedi, "Risk-based maintenance scheduling in the presence of reward penalty scheme", Electric Power Systems Research, vol. 121, pp. 126-133, 2015.

[15] M. K. Tehrani, A. Fereidunian, H. Lesan , “Financial planning for the preventive maintenance of power distribution systems via fuzzy AHP”, Complexity, vol. 21, no. 3, pp. 36-46, 2016.

[16] P. Afzali, F. Keynia, M. Rashidinejad, “A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders”, Energy, vol. 171, pp. 701-709, 2019.

[17] J. B. Leite, J. R. S. Mantovani, T. Dokic,Q. Yan, Po-C. Chen, M. Kezunovic, “Resiliency Assessment in distribution networks using gis based predictive risk analytics”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 6, pp. 4249-4257, 2019.

[18] N. L. Dehghani,Y. M. Darestani, A. Shafieezadeh, "Optimal life-cycle resilience enhancement of aging power distribution systems: a minlp-based preventive maintenance planning", IEEE Access, vol. 8, pp. 22324- 22334, 2020.

[۱۹] مجید نیری‌پور، سعید حسوند، حسین فلاح‌زاده ابرقوئی، «برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم به‌منظور تبدیل شبکه توزیع موجود به ریزشبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۷۷۴-۷۶۱، ۱۳۹۶.

[۲۰] سیدمحمدرضا شریعتی، ایرج احمدی، تقی بارفروشی«مدل‌سازی تأثیر

حضور ترانسفورماتور یدکی بر قابلیت اطمینان مجموعه‌ای از پست‌های فوق‌توزیع»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۴۸۹-۱۴۹۷، ۱۳۹۶.

[۲۱] حمید بهنیا، مهدی اخباری «کلیدزنی انتقال در برنامه‌ریزی یک‌پارچه تعمیرات انتقال و تولید در سیستم قدرت»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۴، صفحه ۱۵۲۵-۱۵۱۷، ۱۳۹۸.

[22] Sand, K., O. Gjerde, D. E. Nordgård. "Current risk exposure in the distribution sector", Initial study. Trondheim, SINTEF Energy Research, 2007.

[23] Nordgård, D. E., K. Sand, I. Wangensteen. "Risk assessment methods applied to electricity distribution system asset management", Reliability, Risk, and Safety, three volume set, pp. 463-470. CRC Press, 200.