فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳
صفحات ۱-۱۱
Print ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

رنامه‌ریزی مدیریت ریسک مبتنی بر وضعیت در خطوط هوایی شبکه توزیع برق

محمدحسین جوکار
کارشناسی الکترونیک، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

چکیده

فیدرهای هوایی از مهم‌ترین اجزای شبکه توزیع در تأمین انرژی الکتریکی محسوب می‌شوند. گستردگی فیدرها، تعدد تجهیزات و تعداد خطاهای بالای آن در شبکه توزیع، تحلیل قابلیت اطمینان آن را ضروری می‌کند. در این مقاله فرآیندی جامع مبتنی بر بازرسی برای تعیین وضعیت خطوط هوایی فشار متوسط معرفی و کوشش شده تا تمامی‌عوامل موثر بر خاموشی شبکه‌های توزیع در شاخصی به نام شاخص وضعیت تجمیع شود. از آنجایی‌که عوامل موثر بر خاموشی در طول زمان می‌توانند ثابت یا متغیر باشند و همچنین راهکارهای پیشگیری از این عوامل نیز متفاوت‌اند، لذا در این تحقیق، معیارهای سنجش وضعیت مرتبط با این عوامل از هم تفکیک شده‌اند. به‌منظور توزیع هدفمند سرمایه و نیروی انسانی در بازرسی شبکه‌های توزیع، تعیین اهمیت هر فیدر ضروری است. به همین منظور شاخصی به نام شاخص اهمیت فیدر تعریف شده است و با استفاده از روش تحلیل سلسه‌مراتبی فازی، برای هر فیدر بر اساس معیارهایی نظیر طول، متوسط بار و دفعات خرابی فیدر محاسبه شده است. با ترکیب شاخص اهمیت و شاخص وضعیت، رتبه‌بندی فیدرهای توزیع به‌منظور تعیین نرخ بازرسی در سال انجام شده است. در این مقاله مدل نرخ خرابی مبتنی بر شاخص وضعیت پیشنهاد شده و پارامترهای مجهول آن، با استفاده از داده‌های آماری موجود محاسبه شده است. در تحلیل داده‌های آماری موجود مشخص شد، بسیاری از خاموشی‌های شبکه توزیع ناشی از خطاهای ناخواسته مانند شرایط آب و هوایی نامساعد، برخورد درختان، پرندگان و اشیا خارجی در خطوط هوایی می‌باشند که با هیچ سطحی از نگهداری و تعمیرات قابل پیشگیری نیستند، به‌گونه‌ای که حتی با نوسازی کل فیدر، هم چنان شاهد خاموشی‌های ناخواسته خواهیم بود. بنابراین به موازات نگهداری و تعمیرات مرسوم، لازم است جهت کاهش ریسک، با سرمایه‌گذاری مجدد در خطوط هوایی موجود، آن‌ها را با سیستم‌های با قابلیت اطمینان بیشتر مانند شبکه‌های با کابل‌خودنگهدار تعویض نمود. تابع هدف شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداری و تعمیرات و هزینه‌های ناشی از خرابی و انرژی تأمین نشده در شبکه توزیع می‌باشد که با نظر گرفتن قیود بودجه و نیروی کار توسط الگوریتم ژنتیک حداقل می‌شود. درنهایت این چارچوب بر روی ۱۰ فیدر از یک پست فوق توزیع در شبکه توزیع برق کرج به‌عنوان مورد مطالعاتی اعمال شده است. نتیجه این تحقیق، یافتن ترکیبی بهینه از انواع برنامه‌های سرمایه‌گذاری مجدد، نگهداری و تعمیرات و شاخه زنی به همراه زمان‌بندی اجرای آن‌ها در افق ۵ ساله و ۱۰ ساله است. نتایج به‌دست‌آمده به دلیل مطابقت با شرایط واقعی و دانش مهندسی، عملکرد قابل‌قبول روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت ریسک، خطوط هوایی، شبکه توزیع برق

۱- مقدمه

فیدرهای هوایی از اجزای مهم و حساس در بخش توزیع انرژی الکتریکی می‌باشند. بر اساس داده‌های آماری، درصد عمده‌ی هزینه‌های الکتریسیته، و اکثر قطعی‌های مشترکان در شبکه توزیع انرژی الکتریکی رخ می‌دهد. درواقع حدود ۸۰ درصد قطعی‌های مشترکین ناشی از خطا در شبکه توزیع می‌باشد یا به طور میانگین خطای یک بخش از فیدره سرویس دهی به نیمی‌از مشترکین آن قیدر را متوقف خواهد کرد. به علت آرایش شماعی شبکه توزیع خطای تجهیزات شبکه توزیع در مقایسه با شبکه انتقال اثر بیشتری بر قطعی برق مشترکها دارد شبکه توزیع در مناطق شهری و روستایی اغلب از فیدرهای هوایی تشکیل شده اند. تیرها، کراس آرم‌ها، مقره، جامپرهادیهای هوایی و ترانسفورماتورها از تجهیزات شبکه توزیع هوایی به شمار میروند که درنتیجه یک سیستم پیچیده و تعمیرپذیر را تشکیل می‌دهند. با ایجاد بازارهای برق شرکتهای توزیع برای سود بیشتر و حفظ قدرت رقابت پذیری در جهت کاهش هزینه‌های جاری خود تلاش میکنند. در این راستا کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات که بخش قابل توجهی از هزینه‌های بهره برداری شبکه توزیع را تشکیل میدهد اهمیت مضاعفی دارد. از طرف دیگر تجهیزات شبکه برق مانند ترانسفورماتور خطوط هوایی و سایر تجهیزات که در طول چند دهه گذشته مورد بهره برداری قرار گرفته اند به طور طبیعی با افزایش طول عمر دچار فرسودگی شده اند در نتیجه در حال حاضر این شرکتها با چالش بزرگی همچون تجهیزات فرسوده مواجه هستند که برای حفظ قابلیت اطمینان سیستم و فرار از هزینه‌های سنگین مربوط به خاموشی‌ها، برنامه ریزی منسجمی‌برای تعمیرات در شبکه را تقاضا می‌کنند. همچنین بنا بر ملاحظات اقتصادی شرکتها به جای جایگزینی تجهیزات فرسوده با هزینههای بسیار زیاد با انجام تعمیرات مناسب، بهرهبرداری از آنها را تا حد ممکن ادامه دهند. بر این اساس برنامه ریزی تعمیرات پیشگیرانه یکی از وظایف این شرکتها بوده و همیشه به دنبال بیشترین سطح قابلیت اطمینانی هستند که در برنامه ریزی تعمیرات پیشگیرانه میتوان به کمک منابع مالی و انسانی محدود، به آن دست یافت.

با تحلیل انواع اختلالات در شبکه‌های توزیع در می‌یابیم که بخش زیادی از قطعی‌ها ناشی از خطاهایی است که به فرسودگی تجهیزات ارتباطی ندارند و براثر طراحی اشتباه و با لخت بودن‌هادیها در برابر عوامل محیطی از جمله حیوانات و اشیا خارجی رخ میدهند بنابراین با نوسازی و تعمیرات گسترده هم نمیتوان از وقوع بخش عمده ای از خطاها پیشگیری کرد و نیاز به بازطراحی و سرمایه گذاری وجود دارد که البته بسته به میزان ریسک هر فیدر، میزان سرمایه گذاری متفاوت خواهد بود.

همچنان که بیان شد بسیاری از خطاها به فرسودگی و عمر تجهیزات بستگی نداشته و ناشی از عوامل بیرونی می‌باشند؛ بنابراین مدل سازی نرخ خرابی بر اساس عمر تجهیزات واقعی و درست به نظر نمی‌آید و مدلی مناسب است که علاوه بر لحاظ کردن اثر فرسودگی تأثیر عوامل محیطی و بیرونی را نیز در آن لحاظ کرده و همچنین بتواند اثر اجرای تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه (PM) در بهبود نرخ خرابی را به خوبی نشان دهد.

برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات در شبکه‌های توزیع

برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات در مراجع مختلف و به روشهای مختلف بررسی شده است. در این بخش به بررسی مرور مراجعی که در حوزه نگهداری و تعمیرات شبکههای فشار متوسط توزیع میباشد. می‌پردازیم. مراجع [۱, ۲] چارجوب جامعی را برای نگهداری و تعمیرات شبکه‌های توزیع ارائه شده است. گام اول با پیش تحلیلی شامل جمع آوری اطلاعات، شناسایی شرایط مرزی سیستم، انتخاب نوع تجهیز برای تحلیل و تعیین اهداف سیستم آغاز میشود. سپس در مرحله اصلی تجهیزات بحرانی سیستم شناسایی شده و حالت‌های خرابی هر کدام تشخیص داده می‌شود. در ادامه چک لیستی برای تعیین وضعیت تجهیز ارائه شده و نرخ خرابی تجهیزات بحرانی بر اساس وضعیت آنان مدل میشود. پس از ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم و نقطه بار استراتژیهای بهبود دهنده تشریح میشوند. این استراتژیها بر اساس ضریب هزینه فایده رتبه بندی میشوند و بهترین و موثرترین آنها برای تجهیزات مختلف انتخاب میشود. عیب چارچوب پیشنهادی در این مرجع در نظر نگرفتن افق بلند مدت برای تعیین بهترین استراتژیها می‌باشد. در مرجع [۳] برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک و در حضور طرح پاداش و جریمه ارائه شده است. در واقع این چارچوب به گونه ای طراحی شده است که بتوان ریسک مالی را به شکل واقعی

آن منعکس کرد. این مرجع در گام اول، مدل نرخ خرابی که ارتباط بین فعالیتهای نگهداری و تعمیرات و فرآیند رشد نرخ خرابی تجهیزات را مشخص میکند ارائه شده است. سپس پارامترهای مدل نرخ خرابی بر اساس دادههای آماری خرابی و تعمیرات انجام شده مدل میشود در نظر گرفتن اثرات نگهداری و تعمیرات انجام شده در گذشته در محاسبه پارامترهای مدل نرخ خرابی از مزیتهای مدل معرفی شده میباشد. سپس توزیع احتمال شاخص SAIDI را از فرکانس خرابیها با استفاده از الگوریتم تولید زمان خرابی (OTGA) استخراج شده و در نهایت با تعریف فرمول بندی تابع هدف مبتنی بر ریسک، روش پیشنهادی بر یک مورد مطالعاتی از شبکه برق دهلران پیاده شده است.

در مرجع [۴] استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت برای خطوط هوایی پیشنهاد شده است. در این مرجع یک رابطه کمی‌بین نرخ خرابی خطوط هوایی و دادههای پایش وضعیت پیشنهاد دادهاند. به گونه ای که با در نظر گرفتن یک خط هوایی به شکل یکپارچه به عنوان یک تجهیز واحد از طریق یک لیست بازرسی وضعیت یک خط هوایی را تعیین میکنند. سپس با استفاهد از دادههای آماری وضعیت و نرخ خرابی به شکل دوتایی و متناظر، نرخ خرابی هر خط را با استفاده از یک مدل نمایی مدل سازی میکنند. سپس با استفاده از نرخ خرابی به دست آمده، شاخصهای قابلیت اطمینان هر خط را محاسبه کرده و آنها را برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اولویت بندی می‌کنند. سپس روش پیشنهادی بر یک مورد مطالعاتی از شبکه انتقال چین اعمال شده است. از مزایای روش پیشنهادی کمی‌سازی دادههای بازرسی و پایش وضعیت تجهیزات خطوط هوایی می‌باشد.

در مرجع [۵] یک فرمول بندی خطی عدد صحیح برای برنامه ریزی بلندمدت خطوط هوایی پیشنهاد شده است. فرمول بندی پیشنهادی بر اساس روش مدیریت ریسک و با بکارگیری فاکتورهای ریسک تفکیک شده میباشد. تفیکک فاکتورهای ریسک در این مرجع باعث شده است تا مدیریت ریسک به شکلی واقعی تر و دقیقتر برای خطوط هوایی انجام شود. پوشش گیاهی خرابیهای جزئی و خرابیهای کلی فاکتورهایی هستند که نرخ خرابی هرکدام به شکلی جداگانه مدل سازی شده است و تأثیر شاخه زنی نگهداری و تعمیرات جزئی و نگهداری و تعمیرات کلی به صورت جداگانه بر هر کدام اعمال می.شود مسئله به صورت درخت تصمیم مدل شده و با استفاده از نرم افزار گمز برای دو بازه و ۱۰ ساله برای شبکه تست RBTS اعمال شده است.

برنامه‌ریزی سرمایه گذاری مجدد در شبکه توزیع

اجرای استراتژیهای سرمایه گذاری مختلف در شبکه‌های توزیع به میزان تاثیر بهبود دهنده هر کدام بر شاخص ریسک بستگی دارد. در [۸] سه استراتژی تحت عنوان سه پروژه پیشنهاد شده است. حفظ خطوط لخت و فقط اجرای سرمایه گذاری مجدد ضروری جایگزین کردن‌هادی لخت با کابلهای زیر زمینی و جایگزین کردن‌هادی لخت باهادی روکش دار در یک دوره ۳۰ ساله بررسی شده است.

ارزیابی ریسک نیز به عنوان شاخصی برای تحلیل سرمایه گذاری در شبکه‌های توزیع به کار میرود. تحلیل ریسک با استفاده از چک لیست در [۹] پیشنهاد شده است. با استفاده از چک لیست میزان ریسک فعلی شبکه و نیز میزان بهبود در ریسک در صورت پیادسازی استراتژیهای سرمایه گذاری سنجیده میشود.

در مراجع [۱۰. ۱۱] چارچوب بهینه سازی مبتنی بر ریسک برای سرمایه گذاری کوتاه مدت و بلند مدت ارائه شده است. شاخصی به نام شاخص برگشت به ازای ریسک برای ارزیابی استراتژیهای سرمایه گذاری پیشنهاد شده است. این شاخص یک هم افزایی موثر بین بازگشت مورد انتظار و ریسک سرمایه گذاری با انجام شبیه سازی مونت کارلو بدست می‌آورد.

برخی مراجع نیز از روش‌های تصمیم گیری چند معیاره برای سنجش استراتژی‌های سرمایه گذاری استفاده کرده اند [۱۲]. معیارهایی که در این مرجع برای سنجش بهینه بودن استراتژیهای پیشنهادی در نظر گرفته شده است شامل مواردی مانند ریسک ایمنی میزان سرمایه اولیه مورد نیاز و همچنین میزان افزایش در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌باشد.

نقش و اهمیت بازرسی در نگهداری و تعمیرات شبکه‌های توزیع

امکان مشاهده وضعیت فیزیکی سیستم در هر زمان همیشه ممکن نیست. این موضوع خصوصاً برای فیدرهای شبکه توزیع برق که ممکن است کیلومترها در سطح زمین گسترده شده باشند. صادق است. اگرچه بازرسی یک فیدر و تعیین وضعیتش قبل از انجام نگهداری و تعمیرات فوری با برای بررسی این موضوع که میتوان نگهداری و تعمیرات را به عقب انداخت یا نه، امکان پذیر است [۱۳].

بازرسی شبکه‌های توزیع به روشهای مختلف از قبیل عکسهای حرارتی مادون قرمز، صوتی و بازرسی چشمی‌قابل انجام است. عکس حرارتی همان اندازه گیری تشعشعات حرارتی از اجسام میباشد تشعشعات حرارتی معمولاً در تجهیزات حامل جریان مانند،کلیدها،اتصالات بستها و کابلها قابل اندازه گیری و تحلیل بوده و همچنین تجهیزات معیوب و دارای اضافه بار نیز قابل شناسایی خواهند بود بنابراین با بازرسی قادر خواهیم بود برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات را قبل از وقوع خرابی انجام دهیم همچنین برای تشخیص خوردگی درونی تیرهای چوبی و یا سست شدگی اتصالات میتوانیم از گوش دادن بهره ببریم. با زدن ضربه چکش به تیر و ثبت فرکانس موج صدای منعکس شده و نیز با تشخیص صدای با فرکانس بالا در اتصالات سست شده میتوان خرابی را در این تجهیزات تشخیص داد [۱۴]. اما اغلب بازرسیهای اجرا شده در شبکه توزیع بازدیدهای چشمی‌هستند. خطوط معمولاً برای چک کردن اتصالات محکم بازرسی میشوند. تجهیزات روغنی مانند خازن رگلاتور و ترانسفورماتور نیز برای یافتن نشانه ای از نشت روغن بازدید میشوند بوشینگهای تجهیزات معمولاً برای بررسی شکست یا آلودگی بازدید میشوند. مقره‌ها برای بررسی خراش ترک خوردگی آلودگی شکست و سایر آسیبها بازرسی میشوند [۱۳] و علاوه بر وضعیت تجهیزات، با بازرسی قادر خواهیم بود که تجهیزاتی که به طور نامناسب تعمیر شده اند را مشاهده کنیم. همچنین قادر خواهیم بود هر وضعیت غیر عادی مانند درختان را که بر قابلیت اطمینان و سرویس تأثیرگذار هستند را حین بازرسی شناسایی کنیم.

بازرسی برای برخی سیستمها هزینه بر است بنابراین بسیار مهم است که بهترین و کم هزینه ترین زمان بندی بازرسی را برای نگه داشتن سیستم در سطح بالایی از قابلیت اطمینان انجام دهیم [۱۳]. میتوان ادعا کرد که بازرسی همانند چشم و گوش RCMاست RCM .یک تعریف جدید از فلسفه نگهداری و تعمیرات است که بر روی حداکثر کردن عمر تجهیزات تمرکز دارد. در RCM شاهد یک جابه جایی از تعمیر جایگزینی تجهیزات به بازرسی هستیم و تعمیرات و جایگزینی وقتی عمر سرویس بهینه آن سپری شده،باشد، انجام میشود [۱۵].

به عنوان یک نتیجه بازرسی و ارزیابی تجهیزات یک فرآیند مهم برای رسیدن به موفقیت در RCM میباشد. این جابه جایی در فلسفه نگهداری و تعمیرات تأثیر مهمی‌بر افراد مشغول به کار در بازرسی و ارزیابی تجهیزات دارد. بازرس‌ها چشم و گوش RCM هستند. موفقیت هر برنامه نگهداری و تعمیرات وابسته به کیفیت اطلاعاتی است که این افراد جمع آوری میکنند مقاله [۱۵] به بررسی نقش بازدیدکنندگان خطوط انتقال و تحلیل اینکه چگونه میتوانند سهم مؤثری در برنامه ایفا کند می‌پردازد. عملکرد اصلی بازدیدکنندگان خطوط هوایی شناسایی هرگونه خرابی که ممکن است در کارکرد تجهیزات اخلال ایجاد کند میباشد اما در RCM این نقش گسترش پیدا کرده است. علاوه بر تهیه یک لیست برای نگهداری و تعمیرات بازدید کننده خطوط لازم است که علتهای ممکن خطاها را تشخیص دهد. پیامدهای خطاهای احتمالی و تأثیر خطا روی سیستم را ارزیابی کند و یک مجموعه ای از اعمال اصلاحی که منابع در اختیار را بهینه میکند را پیشنهاد دهد.

دو روش برای پایش وضعیت وجود دارد: پیوسته و دوره ای. پایش پیوسته وضعیت، یک قطعه از یک تجهیز مکانیکی را دائما پایش میکند و هر وقت عیبی مشاهده کرد هشدار میدهد [۱۶] دو محدودیت پایش پیوسته وضعیت یکی گرانی و دیگری نویز است که میتواند پیام نادرستی را ارسال کند. پایش وضعیت دوره ای به دلیل مقرون به صرفه بودن و به خاطر فراهم کردن عیب یابی با دقت بیشتر با استفاده از دادههای فیلتر شده و پردازش شده، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. واضح است که ریسک پایش وضعیت دوره ای امکان وقوع خطا در بازه بین دو دوره است [۱۷]. بازرسی مبتنی بر ریسک (RBI)) یک روشی اولویت بندی و برنامه ریزی است که عمدتاً در صنایع نفت و گاز اجرا میشود. این نوع از برنامه ریزی بازرسی، احتمال خرابی و نتیجه آن را به منظور توسعه و برنامه ریزی تحلیل می‌کند [۱۸] اهداف RBI شامل موارد زیر است [۱۹].

.برای ارتقای بازرسی مبتنی بر زمان که اغلب با حداقل انطباق با قوانین مقررات و استانداردها برای بازرسی اداره میشود. برای پیاده کردن استراتژی انجام بازرسی در مواقعی که نیاز داریم.

۲- فرض‌های مسئله

به طور طبیعی در هر تحقیقی فرضهایی وجود دارد تا شرایط را به شرایط واقعی و عملیاتی نزدیکتر کرد. در ادامه به بررسی فرضهایی که برای حل این مسئله در نظر گرفته ایم خواهیم پرداخت.

همراه با اجرای برنامه کابل خود نگهدار وهادی روکشدار تعمیرات کلی نیز انجام خواهد شد.

در نتیجه اجرای برنامه کابل آباد وهادی روکش دار شاخص سلامت جزئی و شاخص وضعیت درختان نیز بهبود می‌یابد. در واقع برای کاهش این شاخصها هزینه ای جدا نمی‌پردازیم.

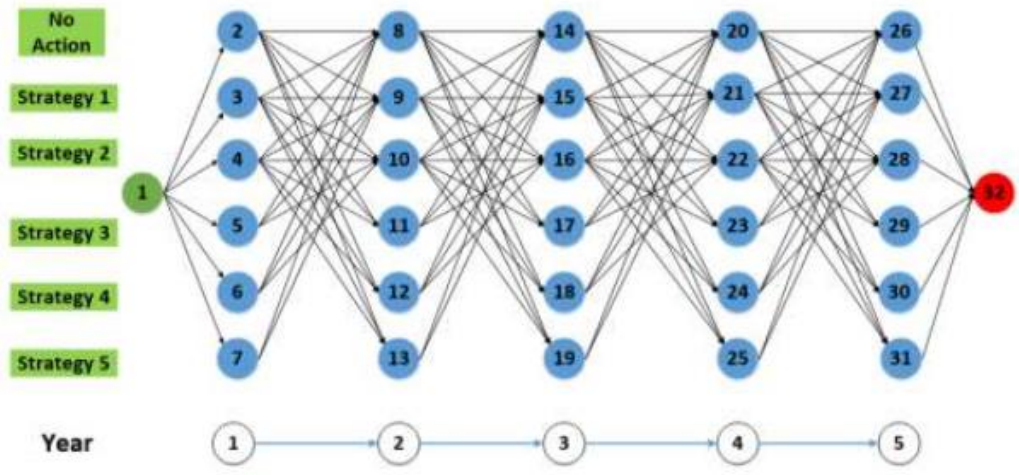
بعد از اجرای کابل خود نگهدار وهادی روکش دار آسیب پذیری نسبت به درختان کمتر میشود. لذا شاخص وضعیت درختان دیرتر به وضعیت بد خود میرسد.

همراه با اجرای برنامه سرمایه گذاری عایق دار کردن،تجهیزات برنامه شاخه زنی و برنامه نگهداری و تعمیرات جزئی نیز انجام میشود.

اگر کابل خود نگهدار استفاده کردیم تا پایان دوره نیازی به تعمیرات کلی وجود ندارد. برای هر ناحیه در هر دوره تنها مجاز به استفاده از یک استراتژی سرمایه گذاری هستیم. همراه با اجرای شاخه زنی تعمیرات جزئی نیز انجام میشود.

نتایج شبیه سازی با در نظر گیری افق ۵ ساله

شبیه سازی مسئله کوتاه ترین مسیر برای یافتن استراتژی بهینه در طول ۵ سال به صورت شکل ۶-۱۰ انجام شده است. در این نوع مسئله در هر سال ۶ گزینه برای انتخاب.داریم یک گزینه انجام ندادن هیچ عملی بر روی هر ناحیه است و ۵ گزینه دیگر شامل ۵ استراتژی مختلف برای بهبود وضعیت هر ناحیه در اختیار داریم انتخاب هر گزینه در هر سال باعث میشود در سال بعد از آن تنها به گزینه‌های دارای مسیر با گزینه سال قبل دسترسی داشته باشیم و این موضوع گزینه‌های ما را برای انتخاب محدود می.کند در ادامه مسئله را در دو حالت بدون در نظر گرفتن هیچ قیدی و با در نظر گرفتن قیودی مانند بودجه و نیروی کار بررسی خواهیم کرد.



شکل ۱- مدل مسئله کوتاه ترین مسیر برای با در نظر گیری افق ۵ ساله

نتایج شبیه سازی بدون در نظر گرفتن قیود

شبیه سازی بدون در نظر گرفتن قیود ساده تر است چراکه میتوان مسئله را برای هر ناحیه به صورت جداگانه محاسبه کرد. بنابراین کروموزوم مسئله را ۱۳۲ انتخاب کرده و مسئله طی زمان کوتاهی حل می.شود که در کوتاهترین مسیر و الگوریتم

ژنتیک ارائه شده است برای ۳ ناحیه هیچ استراتژی سرمایه گذاری پیشنهاد نشده است که دلیل مهم آن بار کم آن ناحیه و همچنین نرخ خرابی پایین آنها است. بر اساس استراتژیهای به دست آمده، ریسک این نواحی در طول ۵ سال تنها با نگهداری و تعمیرات جزئی و کلی و همچنین شاخه زنی مدیریت میشود برای ۱۴ نواحی عایق دار کردن متعلقات تیر پیشنهاد شده است که با ترکیبی از نگهداری و تعمیرات کلی و جزئی و شاخه زنی شاخص ریسک را در سطح مطلوب نگه می‌دارند.

برای نواحیی ۱۷ و ۱۸ که دارای بار زیاد هستند و نیز نرخ خرابی آنها بالاست استراتژی اجرای‌هادی روکش دار به دست آمده است. با اجرای این استراتژی به همراه ترکیبی از نگهداری و تعمیرات کلی و جزئی و شاخه زنی درختان شبکه در برابر خطاها مقاوم تر شده و وضعیت ناحیه بهبود می‌یابد با کاهش شاخص وضعیت و نرخ خرابی شاهد کاهش ریسک مالی برای این نواحی خواهیم بود.

مسیر به دست آمده برای هر یک از نواحی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در جدول ۲ هزینه‌های سالیانه برای نگهداری و تعمیرات و ناشی از خرابیها به دست آمده از حالت حل بدون قید بیان شده است. همچنین میزان سرمایه گذاری انجام شده برای همه ی نواحی به علاوه ی میزان نیروی کار مورد نیاز برای شاخه زنی و نگهداری و تعمیرات در هر سال در این جدول آمده است. نکته قابل توجه این است که همه ی سرمایه گذاریها در سال اول به دست آمده است که این خود نشان از وضعیت بد و نرخ خرابی بالا و حساسیت نسبت به عوامل بیرونی میباشد. نمایش برنامه‌های به دست آمده از شبیه سازی برای حالت بدون قید و افق ۵ ساله در جدول ۲ با جزئیات دقیق و قابل درک ارائه شده است.

جدول ۱- مسیر به دست آمده توسط روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن قیود و افق ۵ ساله

zone	مسیر به‌دست‌آمده توسط روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن قیود						
۱	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۲	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۳	۱	۳	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۴	۱	۳	۸	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۵	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۲
۶	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۲
۷	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۸	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۹	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۲
۱۰	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۱	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۲	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۳	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۴	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۵	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۶	۱	۳	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۷	۱	۶	۸	۱۵	۲۲	۲۷	۳۲
۱۸	۱	۶	۸	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۱۹	۱	۳	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲

جدول ۲- هزینه‌های سالیانه به دست آمده از حل مسئله بدون در نظر گرفتن قیود برای افق ۵ ساله

سال / هزینه‌های سالیانه	۱	۲	۳	۴	۵
هزینه نگهداری و تعمیرات و خرابی سالیانه	۷۸۵۰۲۹	۷۱۷۳۱۴	۵۶۳۷۶۱	۵۲۷۵۱۹	۵۸۲۷۲۴
میزان هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه	۳۹۷۸۱۸	۰	۰	۰	۰
نفر-ساعت سالیانه برای نگهداری و تعمیرات	۵۰۰۲	۱۱۱۱۶	۴۱۸۵	۱۰۴۴	۴۱۸۵
نفر-ساعت سالیانه برای شاخه زنی	۲۷۴	۰	۳۸۹	۲۳	۳۸۹
تابع هزینه بهینه‌شده بدون قید	۲۹۷۲۳۹۴				

نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن قیود

در حل مسائل بهینه سازی همواره قیودی وجود دارد که صرف نظر از آنها باعث غیر واقعی شدن جواب‌های به دست آمده برای مسائل خواهد شد. در این تحلیل نیز قیودی مانند بودجه و نیروی کار وجود دارد که با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده در حالت بدون قید میزان آنها را انتخاب می‌کنیم. مقادیر این قیود در جدول ۲ آورده شده است. پس از حل مسئله با در نظر گیری این قیود مسیرهای ارائه شده در جدول ۳ به دست آمده است. برخلاف حالت بدون قید در این حالت برای همه‌ی نواحی اجرای سرمایه گذاری نتیجه شده است. بعلاوه اینکه سرمایه گذاری از نوع‌هادی روکش دار برنامه شماره (۵) در این حالت برای ۴ ناحیه پیشنهاد شده است. سرمایه گذاری از نوع کابل خود نگهدار به علت هزینه ی بالا برای هیچ ناحیه‌ی پیشنهاد نشده است. در تحلیل هزینه‌ها در می‌یابیم که هزینه ی کل در این حالت به علت وجود قیدها افزایش ۹ درصدی یافته است. توجه به نتایج در جدول ۲ نشان میدهد که مقادیر هزینه‌های سالیانه و نیروی کار به کار رفته برای نگهداری و تعمیرات و شاخه زنی از حدود قیود تعریف شده فراتر نرفته اند. همان گونه که از نتایج حل بدون قید مشخص است، بسیاری از نتایج از قیود تنظیم شده بیشتر هستند. به همین خاطر رسیدن به بهینه ترین حالت غیر ممکن است برخلاف حالت قبل که بیشتر برنامه‌ها در سالهای خاصی متمرکز بودند در این حالت به دلیل وجود قید در سالهای مختلف پراکنده شده‌اند.

جدول ۳- مسیر به دست آمده توسط روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن قیود و در افق ۵ ساله

zone	مسیر به‌دست آمده توسط روش پیشنهادی بدون در نظر گرفتن قیود						
۱	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۶	۳۲
۲	۱	۵	۹	۱۶	۲۱	۲۷	۳۲
۳	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۶	۳۲
۴	۱	۵	۹	۱۴	۲۲	۲۷	۳۲
۵	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۲
۶	۱	۶	۱۰	۱۵	۲۰	۲۶	۳۲
۷	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۱	۲۶	۳۲
۸	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۷	۳۲
۹	۱	۶	۹	۱۶	۲۱	۲۶	۳۲
۱۰	۱	۵	۸	۱۵	۲۱	۲۸	۳۲
۱۱	۱	۵	۸	۱۵	۲۱	۲۸	۳۲
۱۲	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۶	۳۲
۱۳	۱	۵	۱۰	۱۴	۲۱	۲۷	۳۲
۱۴	۱	۵	۸	۱۵	۲۰	۲۸	۳۲
۱۵	۱	۵	۹	۱۶	۲۰	۲۷	۳۲
۱۶	۱	۵	۹	۱۴	۲۱	۲۶	۳۲
۱۷	۱	۶	۹	۱۴	۲۱	۲۸	۳۲
۱۸	۱	۶	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۲
۱۹	۱	۵	۹	۱۵	۲۱	۲۶	۳۲

جدول ۴- هزینه‌های سالیانه به دست آمده از حل مسئله بدون در نظر گرفتن قیود در افق ۵ ساله

سال		۱	۲	۳	۴	۵
هزینه‌های سالیانه	قید					
هزینه نگهداری و تعمیرات و خرابی سالیانه	۸۰۰۰۰۰	۷۵۴۶۹۰	۶۸۸۵۵۰	۷۰۰۰۴۰	۶۰۰۸۸۰	۶۰۳۰۰۰
میزان سرمایه‌گذاری سالیانه	۸۰۰۰۰۰	۶۴۹۴۵۰	۱۶۵۲۹	۸۴۱۵	۰	۰
نفر-ساعت سالیانه برای نگهداری و تعمیرات	۹۰۰۰	۵۵۷۲	۸۷۶۰	۵۰۷۴	۳۴۱۸	۳۹۸۳
نفر-ساعت سالیانه برای شاخه زنی	۳۰۰	۲۲۷	۹۱	۲۲۲	۱۸۸	۲۰۹
تابع هزینه بهینه‌شده با قید (دلار)		۳.۲۵۷.۸۰۰				

جدول ۵- هزینه‌های سالیانه به دست آمده از حل مسئله بدون در نظر گرفتن قیود در افق ۱۰ ساله

سال / هزینه‌های سالیانه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
هزینه نگهداری و تعمیرات و خرابی سالیانه	۷۵۴-۱۵	۶۹-۸۳۳	۵۵۲۶۶۲	۵۳۳۱۷۲	۵۶۲۹-۲	۶۵۲-۶۷	۵۷۹۷۶۳	۵۵۲۱۱۴	۵۵۹۲۸۷	۵۲۷۵۳۱
میزان هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه	۵-۳۲۷۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نفر-ساعت سالیانه برای نگهداری و تعمیرات	۵۳۸۲	۱-۵۵۶	۴۱۸۵	۲۲۶۴	۴۱۸۵	۸۵۳۶	۴۹۴۵	۳۳۸۴	۴۱۸۵	۳۶۰
نفر-ساعت سالیانه برای شاخه زنی	۲۶۱	۰	۳۸۹	۱۰	۳۸۹	۱۰	۳۷۹	۱۰	۳۸۹	۱۰
تابع هزینه بهینه‌شده بدون قید	۴۶۷۳۱۸۸									

بیشترین هزینه سالیانه مربوط به سال اول و برابر ۷۵۴۰۱۵ دلار است که علت آن اجرای برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در کنار اجرای برنامه‌های سرمایه گذاری میباشد. در سالهای بعد تقریباً هزینه سالیانه نگهداری و تعمیرات شبکه برابر بوده است. در مورد برنامه‌های سرمایه گذاری همان گونه که مشخص است برنامه‌های سرمایه گذاری برای همه ی نواحی در سال اول اجرا شده اند که نشان دهنده نیاز شبکه به تغییر طراحی و سرمایه گذاری مجدد است. همچنین این موضوع نشان میدهد نقطه آسیب پذیر شبکه از ناحیه عوامل محیطی و بیرونی است و این نیاز فوری شبکه به تغییرات و اجرای سریع آن را می‌طلبد.
از نتایج به دست آمده در جدول ۵ می‌توان برای تنظیم قیود در بخش بعدی استفاده کرد. بنا بر تعریف باید حدود چهار قید را مشخص کنیم قید بودجه سالیانه را در مقدار ۸۰۰۰۰۰ قید میزان سرمایه اولیه را نیز در میزان،۸۰۰۰۰۰ قید نفر ساعت مورد نیاز برای نگهداری و تعمیرات را ۹۰۰۰ و قید -نفر ساعت مورد نیاز برای شاخه زنی را ۳۰۰ نفر ساعت در سال برای ۱۹ ناحیه یا ۱۰ فیدر،مورد مطالعه قرار می‌دهیم در جدول بالا مواردی را که با تغییر رنگ پشت زمینه مشخص کرده‌ایم، حد قیود تعریف شده را رد کرده‌اند.

۳- نتیجه‌گیری

لازمه ی تصمیم گیری صحیح و انتخاب بهینه برای مقابله با قطعی‌های شبکه‌های توزیع دانستن ریشه‌های واقعی و علل اصلی خاموشیها میباشد به همین منظور در این تحقیق در ابتدای کار تحلیل آماری جامعی برای شناسایی نقاط آسیب پذیر و خطاهای پرتکرار صورت گرفته است. این تحلیل به صورت تفکیک شده برای کل شهر کرج و سپس به تفکیک ریشه خطاها و همچنین به تفکیک هر فیدر برای ۱۰ فیدر از مورد مطالعاتی صورت گرفته است. نتایج تحلیل آماری خطاها نشان میدهد که خطای تجهیزات و عوامل محیطی بیرونی مانند برخورد پرندگان، شرایط بد آب و هوایی و اشیا خارجی از ریشه‌های اصلی خطاها در شبکه‌های توزیع به خصوص ۱۰ فیدر تحت مطالعه می‌باشند. از آنجا که با وقوع خطا در هر بخش از فیدر به دلیل وجود کلیدهای اتوماسیون تنها بخشهای بین دو کلید تحت تأثیر قرار میگیرند لذا این ۱۰ فیدر به ۱۹ ناحیه تقسیم شده اند. بر پایه تحلیل آماری و همچنین بررسی منابع مختلف مشورت با کارشناسان مربوطه جدولی به عنوان چک لیست بازرسی با خروجی عددی و کمی‌از شاخص وضعیت طراحی شده است و سعی شده که همه ی عوامل ریشه ای خطا و فاکتورهای تأثیرگذار در وقوع قطعی در شبکه‌های توزیع به نسبت اهمیت و با وزن مشخص در آن لحاظ شوند علاوه بر این از دیگر ویژگیهای چارچوب طراحی شده، انعکاس مطلوب تأثیر بهبود دهنده ی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات و سرمایه گذاری در شاخص وضعیت است. به همین منظور شاخصهای وضعیت بر اساس استراتژیها و برنامه‌های اصلاحی و همچنین بر اساس وابسته و غیر وابسته بودن به زمان از هم تفکیک شده اند. بنابراین با اجرای هر برنامه شاخص وضعیت مربوط به همان برنامه تغییر خواهد کرد و درنهایت میانگین وزنی همه شاخصها شاخص وضعیت خواهد بود برای محاسبه نرخ خرابی هر ناحیه مدلی برحسب وضعیت و مبتنی بر داده‌های آماری پیشنهاد شده است. لذا به طور خلاصه میتوان گفت میزان فرسودگی تجهیزات، مقره‌ها، تیر و متعلقات تیر و غیره و همچنین میزان آسیب پذیری نسبت به عوامل بیرونی نظیر پرندگان اشیا خارجی و

درختان و نیز اعمال اصلاحی مانند، نگهداری و تعمیرات شاخه زنی و سرمایه گذاری مجدد به طور مستقیم شاخص وضعیت را تعیین می‌کنند و میزان شاخص وضعیت نیز مقدار نرخ خرابی را تعیین می‌کند.

در این تحقیق به منظور بهبود ریسک استراتژیهایی نظیر شاخه زنی نگهداری و تعمیرات جزئی و کلی، عایق دار کردن متعلقات، تیر تعویض‌هادی ها با هادی روکش دار و تعویض هادیها با کابل خود نگهدار پیشنهاد شده است. برای پیاده سازی این استراتژیها در افق بلندمدت ۵ ساله و ۱۰ ساله از مدل مسئله کوتاهترین مسیر استفاده شده است؛ به گونه ای که برای هر سال ۶ گزینه برای انتخاب وجود دارد ۵ استراتژی بهبود دهنده و یک گزینه نیز انجام ندادن هیچ برنامه ای میباشد که بسته به شرایط هر ناحیه و نیز قیدهای موجود میتوان آنها را انتخاب کرد. برای انتخاب بهینه هر استراتژی در هر سال از ابزار الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی بر شبکه مورد مطالعه بیان میدارد که با توجه به محدودیتهای بودجه سالیانه، نیروی انسانی در دسترس و سرمایه اولیه اختصاص داده شده نواحی دارای بار، زیاد زمان تعمیر طولانی و نرخ خرابی بالا نیاز به پیاده سازی استراتژی سرمایه گذاری تعویض‌هادی لخت باهادی روکشدار و سایر نواحی نیاز به استراتژی سرمایه گذاری عایق دار کردن متعلقات تیر دارند نگهداری و تعمیرات جزئی و شاخه زنی نیز هر دو سال یکبار به دست آمده است که صحت مدل سازیها را تأیید می‌کند. نگهداری و تعمیرات کلی نیز به طور متوسط هر چهار سال یکبار به دست آمده است که با منطق مهندسی تعمیرات سازگار است مقایسه بین نتایج در افق ۵ ساله و ۱۰ ساله نشان میدهد که افزایش بازه ی برنامه ریزی تأثیر محدودی بر نتایج خروجی و برنامه ریزی دارد به طوری که در حالت بدون در نظر گرفتن در بازه ی ۵

ساله استراتژی عایق دار کردن متعلقات تیر برای ۳ ناحیه پیشنهاد شده در صورتی که در بازه ۱۰ ساله برای ۱ ناحیه پیشنهاد شده است. به همین شکل برای حالت مقید در بازه ۵ ساله برای ۴ ناحیه استراتژی روکش دار کردن‌هادیها پیشنهاد شده ولی در حالت بازه ۱۰ ساله برای ۶ ناحیه این استراتژی پیشنهاد شده است که در ۳ ناحیه یکسان میباشد. در مجموع از نتایج حاصل شده میتوان صحت و دقت روش پیشنهادی را نتیجه گرفت.

۴- پیشنهادها

یکی از دلایلی که از شاخص ریسک به جای شاخص اهمیت استفاده شد در نظر گرفتن ریسک محیطی و ایمنی در کنار ریسک مالی بود که به دلیل نبود اطلاعات کافی و مشخص نبودن مبنای مشترک برای ریسک مالی، محیطی و ایمنی از در نظر گفتن آنها صرف نظر شد. لذا بر این اساس و بر اساس سایر تجربیات و مطالعات پیشنهادها زیر برای پژوهشهای بعدی ارائه می‌گردد.

در نظر گرفتن ریسک محیطی به این معنی که به ازای اجرا کردن یا نکردن هر استراتژی چه میزان ریسک بر شرکتها و جامعه تحمیل می‌شود. به عنوان مثال اجرای استراتژی کابل خود نگهدار چه میزان از تلفات حیوانات می‌کاهد و یا چه میزان از قطع درختان جلوگیری می‌کند.

در نظر گرفتن ریسک ایمنی جدای از هزینه‌هایی که شرکتها براثر برق گرفتگی افراد متحمل میشوند، مرگ و میر ناشی از برق گرفتگی به دلیل ارزش جان انسانها از نظر اجتماعی و دینی امری غیر قابل قبول میباشد. لذا ضروری است در مکانهایی که احتمال برق گرفتگی وجود دارد بدون در نظر گرفتن هیچ قیدی بهترین استراتژی برای پیشگیری پیاده سازی شود.

در نظر گرفتن اهمیت بار بسیاری از بارهای مهم نظیر بیمارستانها مکانهای دولتی و مراکز حساس امنیتی وقفه کوتاه در تأمین انرژی مورد نیاز خود را نیز برنمی‌تابند لذا ضروری است که با اعمال استراتژیهای مناسب از وقوع قطعی تا حد ممکن پیشگیری کنیم.

۵- منابع

[1] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A Comprehensive Scheme for Reliability Centered Maintenance in Power Distribution Systems- Part II: Numerical Analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, pp. 771-778, 2023.

[2]P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems—Part I: Methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, pp. 761-770, 2023.

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

[4]D. Zhang, W. Li, and X. Xiong, "Overhead line preventive maintenance strategy based on condition monitoring and system reliability assessment," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, pp. 1839-1846, 2014.

[5]A. Abiri-Jahromi, 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, pp. 2043-2053, 2019.

[6]E. Abbasi, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Abiri-Jahromi, "Risk based maintenance optimization of overhead distribution networks utilizing priority based dynamic programming," in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2019, pp. 1-11.

[7]A. D. Janjic and D. S. Popovic, "Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach," IEEE transactions on power systems, vol. 22, pp. 597-604, 2017.

[8]K. Alvehag and L. Soder, "Risk-based method for distribution system reliability investment decisions under performance-based regulation," IET generation, transmission & distribution, vol. 5, pp. 1062-1072, 2021.

[9]O. Gjerde and D. E. Nordgard, "Risk assessment as an integrated part of distribution system reinvestment analysis," in Electricity Distribution-Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, 2019, pp. 1-4.

[10]M. E. Samper and A. Vargas, "Investment decisions in distribution networks under uncertainty with distributed generation—Part I: Model formulation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 2331-2340, 2013.

[11]M. E. Samper and A. Vargas, "Investment decisions in distribution networks under uncertainty with distributed generation—Part II: Implementation and results," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 2341-2351, 2013.

[12]M. D. Catrinu and D. E. Nordgård, "Integrating risk analysis and multi-criteria decision support under uncertainty in electricity distribution system asset management," Reliability Engineering & System Safety, vol. 96, pp. 663-670, 2011.

[13]P. A. Kuntz, R. D. Christie, and S. S. Venkata, "A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, pp. 718-723, 2001.

[14]B. Wareing, Wood pole overhead lines vol. 48: Iet, 2005.

[15]N. Kilroe, "Line inspections-eyes and ears of RCM," in Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003. 2003 IEEE ESMO. 2003 IEEE 10th International Conference on, 2003, pp. 18-24.

[16]R. J. Ferreira, A. T. de Almeida, and C. A. Cavalcante, "A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis," Reliability Engineering & System Safety, vol. 94, pp. 905-912, 2019.

[17]A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," Mechanical systems and signal processing, vol. 20, pp. 1483-1510, 2016.
[18]M. Bertolini, M. Bevilacqua, F. Ciarapica, and G. Giacchetta, "Development of risk-based inspection and maintenance procedures for an oil refinery," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 22, pp. 244-253, 2009.
[19]Z. Tan, J. Li, Z. Wu, J. Zheng, and W. He, "An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection," Safety science, vol. 49, pp. 852-860, 2021.
[20]A. Moradkhani, M. R. Haghifam, and M. Mohammadzadeh, "Bayesian estimation of overhead lines failure rate in electrical distribution systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 56, pp. 220-227, 2014.