



استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با رویکرد قابلیت اعتماد برای کلیدهای فشارقوی در نیروگاهها و پستهای فشارقوی

ربابه حاتمی، علی زینل همدانی*، حمیدرضا کارشناس و محمد حسین روحانی

چکیده:

صنعت برق همواره می‌کوشد که در کنار افزایش قابلیت اعتماد سیستم تأمین انرژی الکتریکی، هزینه‌های آن را کاهش دهد. کلیدهای فشارقوی، یکی از مهم‌ترین اجزاء شبکه برق می‌باشند. در این تحقیق، مدلی برای تعیین زمان مناسب انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تعویض کلیدهای فشارقوی ارائه می‌گردد که ضمن حفظ قابلیت اعتماد تجهیز در سطحی قابل قبول، هزینه‌های آن را کمینه می‌کند. در ارزیابی قابلیت اعتماد، توزیع خرابی‌های کلید، توزیع آمیخته واپیال در نظر گرفته شده و مدل قابلیت اعتماد، براساس مدل نرخ خرابی هیبرید که ترکیبی از روش کاهش عمر و روش افزایش نرخ خرابی است، به دست می‌آید. روش کار بهاین صورت است که هر گاه قابلیت اعتماد تجهیز به مقدار آستانه رسید، فعالیت نت پیشگیرانه بر روی تجهیز انجام می‌گیرد. در نهایت، مدل بر روی کلیدهای فشارقوی برق منطقه‌ای اصفهان اجرا می‌گردد.

کلمات کلیدی:

کلید فشارقوی، نت پیشگیرانه،
قابلیت اعتماد،
توزیع آمیخته واپیال،
تابع نرخ خرابی هیبرید

شبکه‌های برق و همچنین نیاز به قابلیت اعتماد بالای کلیدها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اغلب، نگهداری و تعمیر کلید با توجه به برنامه و دستور کار کارخانه سازنده و بر اساس زمان انجام می‌گیرد. ولی کمبود منابع، از جمله منابع مالی و نیروی کار و همین‌طور نیاز به قابلیت اعتماد بالا در شبکه برق، منجر به جستجوی روش‌های نگهداری و تعمیر بهینه برای کلید فشارقوی شده است. هدف این بهینه‌سازی، مینیمم کردن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و ماکریزم کردن قابلیت اعتماد کلیدها است [۲].

در چند دهه گذشته، مسائل نگهداری و تعمیرات سیستم‌های صنعتی به صورت گسترده در مقالات علمی بررسی شده است. هر کدام از این مقالات، سیاست‌ها و روش‌های مختلفی را برای برنامه‌ریزی نت در پیش‌گرفته‌اند. یکی از معروف‌ترین سیاست‌های تعمیرات، تعمیر براساس طول عمر تجهیز است که توسط وانگ و فام [۳] ارائه شده است. یکی دیگر از روش‌هایی که بسیار مورد توجه محققان در این زمینه قرار گرفته، روش تعمیرات پیشگیرانه با فاصله زمانی ثابت بین دو تعمیر یا تعمیرات پیشگیرانه پریودیک^۴ (به همراه تعمیرات اصلاحی در هنگام خرابی) می‌باشد.

۱. مقدمه

رونده خصوصی‌سازی، افزایش رشد مصرف برق و بالارفتن عمر تجهیزات به کار رفته در صنعت برق، لزوم تجدیدنظر در روش‌های نگهداری و تعمیرات^۵ و سیاست‌های تخصیص بودجه را در این صنعت ضروری نموده است. کلیدهای فشارقوی یکی از مهم‌ترین تجهیزات شبکه برق بوده و نقشی حیاتی در این شبکه ایفا می‌کنند زیرا کار سوییچینگ^۶ و مهم‌تر از آن قطع شبکه به هنگام بروز عیب را بر عهده دارند [۱]. نگهداری و تعمیر کلیدهای فشارقوی به سبب طول عمر بالا و فرسودگی آنها، توسعه و ارتقای

تاریخ وصول: ۹۰/۰۲/۱۲

تاریخ تصویب: ۹۰/۰۳/۲۵

ربابه حاتمی، کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی- اجتماعی، .hatami@in.iut.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر علی زینل همدانی، دانشیار، عضو هیأت

علمی دانشکده صنایع دانشگاه صنعتی اصفهان hamadani@cc.iut.ac.ir,

دکتر حمیدرضا کارشناس، استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده برق دانشگاه

صنعتی اصفهان， karshen_h@yahoo.com

محمد حسین روحانی، کارشناس ارشد برق-قدرت، معاونت بهره‌برداری برق

منطقه‌ای اصفهان

² Maintenance

³ Switching

⁴ Periodic Maintenance

مدل برای ثابت ماندن p ، می‌بایستی کیفیت نت باگذشت زمان بهبود یابد. او در کار بعدی خود^[۱۱] ضرایب بهبود تابع خرابی و طول عمر را برای سیاست نت پیشگیرانه متواالی معرفی نمود و دو مدل نت ناقص متناظر را مورد بررسی قرارداد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات تجهیزات شبکه‌های الکتریکی، در بازه‌های زمانی ثابت (سیاست نت پریودیک) انجام می‌گرفته است. از دهه ۹۰، صنعت برق با مسئله خصوصی‌سازی مواجه شد که منجر به تغییر این روند گردید. به تدریج مسئله نت با تمرکز بر هزینه‌ها، تبدیل به اینزاری برای رقابت شد.

در نتیجه، بسیاری از شرکت‌های فعال در بخش انرژی الکتریکی برای کاهش هزینه‌های خود، روند تغییر در برنامه نت را آغاز کردند و استراتژی‌های نت سنتی (باشه زمانی ثابت) را کنار گذاشته و به استراتژی‌های پیچیده‌تری مانند نت مبتنی بر قابلیت اعتماد (RCM) (روی آوردن). [۱۲]

باتوجه به تحقیقات انجام گرفته در گذشته، می‌توان به نکات زیر در مورد نگهداری و تعمیرات کلیدهای فشارقوی اشاره کرد:

۱. تقریباً در تمام تحقیقات انجام گرفته زمان انجام تعمیرات-پیشگیرانه ثابت است و سیاست نت پریودیک به کاربرده شده است.

۲. در تمام تحقیقات، تعمیر و نگهداری را کامل در نظر گرفته‌اند.

۳. بیشتر کارهای انجام شده بر اساس مدل مفهومی می‌باشد و تعداد مدل‌های ریاضی ارائه شده بسیار اندک می‌باشد. در مجموع، بیشتر کارهای انجام گرفته در زمینه نگهداری و تعمیرات کلیدهای فشارقوی به صورت ارائه مدل‌های مفهومی بوده و کمتر به مسئله کمی کردن ارتباط بین قابلیت اعتماد و نت پرداخته شده است.

در تحقیق حاضر با ارائه یک مدل ریاضی، تأثیر فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر قابلیت اعتماد تجهیز مورد بررسی قرار گرفته و اثر هریک از پارامترهای مدل بر پاسخ بهینه، قبل مشاهده و بررسی می‌باشد. در این تحقیق، روشی برای تدوین یک استراتژی مناسب جهت نگهداری و تعمیر و تصمیم‌گیری در مورد تعویض کلیدهای فشارقوی در صنعت برق ارائه می‌گردد. استراتژی ارائه شده به گونه‌ای است که علاوه بر حفظ قابلیت اعتماد سیستم در سطحی قبل قبول، هزینه‌های سیستم را کاهش می‌دهد و همچنین قادر به بیان کمی رابطه بین فعالیت‌های نت و قابلیت اعتماد سیستم می‌باشد.

۲. قابلیت اعتماد

در بررسی قابلیت اعتماد، استفاده از یک توزیع احتمال برای مدل سازی زمان‌های خرابی ضروری می‌باشد. توزیع واپسال یکی از متداول‌ترین توزیع‌ها برای مدل سازی طول عمر در مباحث قابلیت

با توجه به این واقعیت که به دلیل نو بودن قطعات و تجهیزات در ابتدای عمر، احتمال خرابی آنها کمتر است و با افزایش عمر، احتمال بروز خرابی بیشتر می‌شود، این‌گونه بهنظر می‌رسد که انجام تعمیرات پیشگیرانه با فاصله زمانی ثابت، برای تمام طول عمر تجهیز مناسب نیست.

از این رو سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه متواالی^۱ توسط ناکاگاوا و کیجیما^[۴] ارائه شده است. در برخی از روش‌ها، قابلیت اعتماد ملاک انجام تعمیرات است که لا و گیو^[۵] و پس از آنها منگا^[۶] به این موضوع اشاره کرده‌اند. سیاست خرابی محدود شده از آن جمله می‌باشد. در این سیاست، هنگامی که نرخ خرابی یا قابلیت اعتماد یک قطعه به سطح از قبل تعیین شده‌ای رسید، تعمیرات پیشگیرانه بر روی آن انجام می‌گیرد و در صورت بروز خرابی، تعمیرات اصلاحی انجام می‌گیرد. چانگ و لو^[۷] فعالیت‌های نت در یک سیستم تعمیرپذیر را به سه دسته تقسیم کرده‌اند:

۱. نت کامل^۲

۲. نت حداقل^۳

۳. نت ناقص^۴

در نت کامل، پس از هر عملیات تعمیر، شرایط تجهیز به حالت اولیه و As Good As New (AGAN) برگشته و سن آن صفر می‌شود. جایگزینی تجهیز نمونه‌ای از انجام نت کامل است. در نت حداقل، شرایط تجهیز پس از انجام فعالیت نت، همان شرایط قبل از خرابی می‌باشد. به این معنی که با انجام نت حداقل روی تجهیز، نرخ خرابی و طول عمر آن تغییر نیافته و تجهیز فقط به شرایط کاری بازمی‌گردد.

به این حالت As Bad As Old (ABAO) گفته می‌شود. در نت ناقص، تجهیز پس از انجام عملیات نت، حالتی مابین AGAN و ABAO دارد. نت ناقص، وضعیت تجهیز را بسته به میزان تأثیر فعالیت نت بهبود می‌بخشد.

تعداد زیادی از محققان تلاش کرده‌اند مدل برنامه‌ریزی نت را به شرایط سیستم‌های واقعی نزدیک‌تر کنند و در این راستا نت ناقص را به عنوان اساس کار برگزیده‌اند. مالک^[۸] برای اولین بار مفهوم طول عمر مجازی^۵ و ضریب بهبود^۶ را مطرح نمود. در مدل عمر مجازی، سن سیستم پس از هر عملیات نت کاهش یافته و در واقع جوان‌تر می‌شود.

همچنین کیجیما^[۹] از مدل مشابهی در کارش استفاده نمود. ناکاگاوا^[۱۰]، مدل نت ناقصی را معرفی کرده در آن، نت پیشگیرانه با احتمال p ناقص و با احتمال $1-p$ کامل است. در این

^۱ Sequential Maintenance

^۲ Perfect Maintenance

^۳ Minimal Maintenance

^۴ Imperfect Maintenance

^۵ Virtual Age

^۶ Improvement Factor

خرابی هستند^[۱۵]. از این‌رو، در این کار از توزیع آمیخته وایبال برای مدل‌سازی قابلیت اعتماد کلیدهای فشارقوی استفاده شده است.

به‌منظور پیشگویی روند تغییرات قابلیت اعتماد طی دوره‌های مختلف نت، مدل نرخ خرابی هیبرید که ترکیب روش کاهش عمر و روش افزایش نرخ خرابی است توسط لین و همکارانش^[۱۶] پیشنهاد شده است. مدل هیبرید، مزایای هر دو روش فوق را ترکیب می‌کند و به صورت یکتابع بازگشتی است. مدل هیبرید، میزان کاهش عمر تجهیز پس از تکمیل فعالیت نت و میزان افزایش تابع نرخ خرابی پس از بهره‌برداری مجدد تجهیز را در بر می‌گیرد^[۱۷].

در شکل ، تابع نرخ خرابی مدل هیبرید و مدل‌های کاهش عمر و افزایش نرخ خرابی، قبل و بعد از انجام فعالیت نت پیشگیرانه نشان‌داده شده و مقایسه شده‌اند. رابطه بین توابع نرخ خرابی قبل و بعد از آمین نت پیشگیرانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h_{i+1}(t) = b_i h_i(t + a_i T_i) \quad t \in (0, T_{i+1}) \quad \text{for} \quad (۳)$$

h_i دارای توزیع آمیخته وایبال می‌باشد. پارامتر $a_i < 0$ (۱) را ضریب کاهش عمر^۴ می‌نامند و به این مفهوم است که انجام هر فعالیت نت ناقص، نرخ خرابی را درست بعد از انجام آن تغییر می‌دهد. پارامتر $b_i > 1$ (۲) ضریب افزایش نرخ خرابی^۵ نامیده می‌شود و نشان می‌دهد که هر فعالیت نت ناقص، موجب افزایش نرخ خرابی سیستم در طول عمر آن می‌گردد. این دو پارامتر را می‌توان از تحلیل داده‌های خرابی سیستم به دست آورد^[۱۸].

مالک^[۸] که برای اولین بار مفهوم ضریب بهبود را مطرح کرد، ضریب کاهش عمر a_i را از روش تجربی و با استفاده از قضاوت شهودی به دست آورد.

در بیشتر موارد نیز، این دو پارامتر را با استناد بر تجربه و اطلاعات حاصل از رفتار گذشته سیستم به دست می‌آورند. در اینجا، پارامترهای a_i و b_i را در همه دوره‌ها ثابت در نظر گرفته و آن‌ها را با استفاده از داده‌های خرابی تجهیز و فعالیت‌های نت پیشگیرانه‌ای که در گذشته بر روی آن انجام گرفته تعیین می‌کیم.

به‌این ترتیب که، تابع نرخ خرابی کلید را قبل و بعد از انجام هر فعالیت نت پیشگیرانه مشخص کرده و مقدار آن را پس از گذشت زمان معینی از هر نت پیشگیرانه در نظر مرمی‌گیریم. با مقایسه این مقادیر، روند تابع نرخ خرابی در بازه‌های مختلف نت به دست آمده و می‌توانیم پارامترهای مذکور را تعیین کنیم.^[۱۷]

اعتماد می‌باشد. در مطالعات انجام گرفته در زمینه قابلیت اعتماد کلیدهای فشارقوی نیز، تقریباً در همه موارد از توزیع وایبال برای مدل کردن قابلیت اعتماد استفاده شده است. غالباً به علت وجود مدهای متعدد خرابی و همچنین تنوع سازندگان قطعات و تجهیزات که ممکن است منجر به ایجاد جمعیت ناهمگن اجزاء گردد، استفاده از توزیع‌های استاندارد نامناسب می‌باشد و استفاده از توزیع‌های آمیخته در این موارد، می‌تواند انعطاف‌پذیری مدل‌های قابلیت اعتماد را افزایش دهد. توزیع‌های آمیخته، از مجموع توزیع‌های استاندارد حاصل می‌شوند و ابزاری مفید در آنالیز داده‌های جمعیتی ناهمگن از داده‌ها می‌باشند.

علاوه بر این، به کارگیری این توزیع‌ها روشی منطقی در مدل‌سازی توزیع احتمالی جامعه‌ای شامل زیرمجموعه‌های مجزا می‌باشد. همچنین، بسیاری از مدهای خرابی مثل تابع نرخ خرابی وان، حمام^۶ را نمی‌توان با توزیع‌های استاندارد مدل کرد و بهمین دلیل، توزیع‌های آمیخته برای مدل‌سازی توزیع‌های پیچیده خرابی مورد توجه قرار گرفته‌اند. گرچه، مشکلات برآورده پارامترهای این توزیع‌ها مانع استفاده گسترده از این توزیع‌ها شده‌است^[۱۳].

اگر $F_{T_i}(t)$ تابع توزیع متغیر تصادفی^۷ ($i=1,\dots,k$) باشد آنگاه مدل عمومی توزیع آمیخته^۸ T تابی برای طول عمر کلی موجود یعنی T عبارت است از:

$$F_T(t) = \sum_{i=1}^k p_i F_{T_i}(t) \quad \sum p_i = 1 \quad 0 \leq p_i \leq 1 \quad (۱)$$

p_i بیانگر درصد وزنی هر یک از توزیع‌ها می‌باشد که به آن پارامتر اختلاط نیز گفته می‌شود.

تابع چگالی متناظر با تابع توزیع فوق نیز به صورت زیر است:

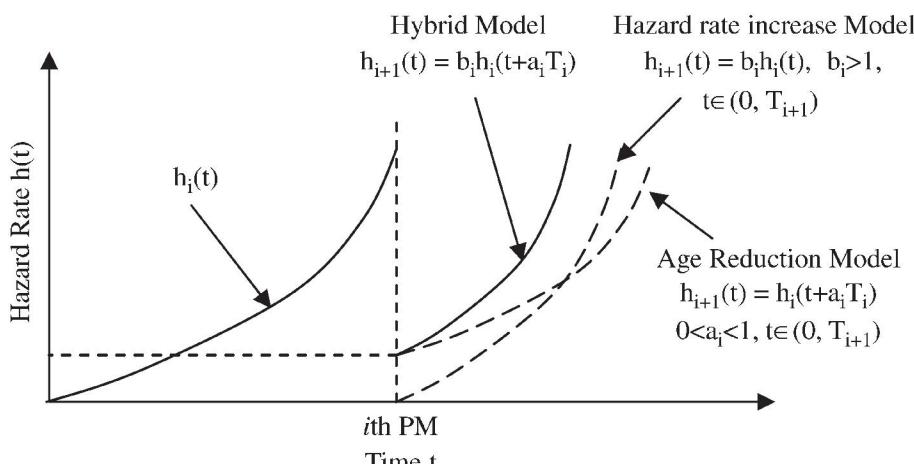
$$f_T(t) = \sum_{i=1}^k p_i f_{T_i}(t) \quad (۲)$$

تابع توزیع موجود در ساختار توزیع آمیخته لزوماً یکسان نیستند، گرچه در بیشتر موارد، جهت تسهیل در حل مسئله، فرض را بر این می‌گیرند که همه آنها از یک توزیع پیروی می‌کنند. ولی در چنین مواردی نیز، پارامترها را یکسان در نظر نمی‌گیرند. در مقوله قابلیت اعتماد، $F_{T_i}(t)$ معمولاً یکی از توزیع‌های وایبال، نمایی، لاگنرمال^۹ و یا گاما^{۱۰} بوده و $k=2$ می‌باشد^[۱۴]. توزیع آمیخته وایبال، مدلی مناسب برای بررسی قابلیت اعتماد سیستم‌ها و تجهیزات الکترونیکی و مکانیکی است که دارای مدهای مختلف

^۱ Bath Tube Failure Rate Function

^۲ Lognormal

^۳ Gamma



شکل ۱. مقایسه مدل کاهش عمر، مدل افزایش نرخ خرابی و مدل هیبرید

واقعیت بوده و در عمل نمی‌توان فقط با تعمیر، شرایط سیستم را به حالت نو و اولیه بازگرداند.

در این کار، فعالیتهای نت از نوع ناقص در نظر گرفته شده است. در این بخش، مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات کلید فشارقوی ارائه خواهد شد که ایده اصلی آن از لین و همکارانش [۱۷] می‌باشد. این مدل توسط ژو و همکارانش [۱۸] گسترش داده شده است. نمادها و متغیرهای به کاربرده شده در مدل، به صورت زیر می‌باشند:

C_i	هزینه بر واحد زمان نت پیشگیرانه
C_m	هزینه بر واحد زمان نت اصلاحی
C_r	هزینه تعویض تجهیز
CE_r	هزینه در واحد زمان برای باقیمانده عمر تجهیز
T_p	زمان لازم برای انجام فعالیتهای نت
a_i	ضریب کاهش عمر
b_i	ضریب افزایش نرخ خرابی

۱. کلید به عنوان سیستم تعمیرپذیر در نظر گرفته شده است.
۲. شرایط محیطی و تنش‌های واردہ برکلید، همچنین شرایط فعالیتهای نت کلید در طول عمر آن ثابت می‌باشد.
۳. داده‌های خرابی و تعمیر نگهداری سیستم، موجود و در دسترس می‌باشند.

۴. هرگاه قبل از انجام فعالیت نت پیشگیرانه، کلید دچار خرابی شود تعمیر حداقل انجام گرفته و وضعیت تجهیز درست به حالت قبل از خرابی برمی‌گردد.

۵. زمان لازم برای انجام نت پیشگیرانه، نت اصلاحی و تعویض تجهیز یکسان فرض شده‌اند.

همانطور که ذکر شد، زمانیکه قابلیت اعتماد تجهیز به مقدار آستانه خود یعنی R رسید، نت پیشگیرانه ناقص روی آن انجام می‌گیرد. براین اساس، می‌توان رابطه قابلیت اعتماد را به شکل زیر

۳. مدل‌سازی نت

همانطور که قبلاً ذکر شد، سیاست نت پریودیک می‌تواند تاحدزیادی ناکارآمد باشد. ازینرو در این تحقیق، سیاست نت متوالی مبنای کارقرارگرفته است. ازطرفی در تحقیقات پیشین، فعالیتهای نت پیشگیرانه برای کلید که یک سیستم تعمیرپذیر می‌باشد، از نوع نت کامل و نت حداقل بوده است. این در حالی است که نت پیشگیرانه اساساً فرآیندی ناقص است و فرض دو حالت حدی ABAO و AGAN برای فعالیتهای نت، تاحدودی دور از

i	ترتیب بازه‌های نت پیشگیرانه، $N=1,2,3,\dots,N$
N	تعداد بازه‌های نت پیشگیرانه
N^*	تعداد بهینه بازه‌های نت پیشگیرانه
h_i	نرخ خرابی تجهیز قبل از N^* نت پیشگیرانه
T_i	بازه زمانی انجام N^* نت پیشگیرانه
R	قابلیت اعتماد آستانه برای انجام نت پیشگیرانه
R^*	مقدار بهینه قابلیت اعتماد آستانه برای انجام نت پیشگیرانه

در این مدل، فعالیتهای نت به دو شکل نت پیشگیرانه و نت اصلاحی می‌باشند. نت پیشگیرانه زمانی انجام می‌گیرد که قابلیت اعتماد سیستم به مقدار آستانه خود برسد. نت اصلاحی زمانی انجام می‌گیرد که تجهیز قبل از انجام نت پیشگیرانه، خراب گردد که می‌تواند منجر به تعویض می‌گردد. در آخرین بازه (N^*) تعیین شده، تجهیز تعویض می‌گردد و شرایط آن به حالت نو بازمی‌گردد. در این روش، معیار به دست آوردن مقدار بهینه R آستانه یعنی R^* و تعداد بازه‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، کمینه کردن هزینه کلی محاسبه شده برای باقیمانده عمر تجهیز می‌باشد. به منظور ارائه مدل معقول و نزدیک به واقعیت برای برنامه‌ریزی نت، تابع نرخ خرابی سیستم با توجه به شرایط آن و فرآیند نت در بازه‌های زمانی مختلف، متفاوت خواهد بود. علاوه بر موارد فوق، فروض دیگر مدل به صورت زیر است:

نوشت:

$$\exp \left[- \int_0^{T_1} h_1(t) dt \right] = \exp \left[- \int_0^{T_2} h_2(t) dt \right] = \dots = \exp \left[- \int_0^{T_N} h_N(t) dt \right] = R \quad (4)$$

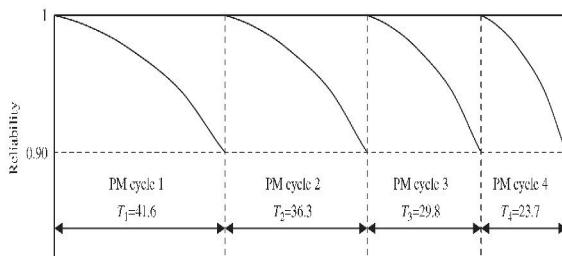
رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$h_i(t)$ در رابطه فوق، از مدل نرخ خرابی هیبرید تبعیت کرده و از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\int_0^{T_1} h_1(t) dt = \int_0^{T_2} h_2(t) dt = \dots = \int_0^{T_N} h_N(t) dt = -\ln R \quad (5)$$

C_r هزینه تعویض تجهیز می‌باشد که علاوه بر هزینه فعالیت نت در زمان تعویض بر سیستم تحمیل می‌گردد. با تعیین R^* ، مقادیر N و T_i نیز به دست آمده و برنامه زمان‌بندی فعالیت‌های نت پیشگیرانه مشخص می‌گردد. برای تعیین R^* ، رابطه ۸ را مینیمم می‌کنیم. در این رابطه، T_i ‌ها را می‌توان از رابطه ۵ و به صورت تابعی از R به دست آورد. محدودیت‌های حاکم بر مسئله عبارتند از محدودیت در تعداد بازه‌های زمانی انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه N و حد پایینی مجاز برای قابلیت اعتماد تجهیز که در حل مسئله لحاظ می‌شوند. اگر مسئله را بدون در نظر گرفتن محدودیت تعداد بازه‌های زمانی نت پیشگیرانه حل کنیم، در صورت کوچک بودن مقدار هزینه‌های نت، تعداد این بازه‌ها بی-نهایت خواهد بود که عملاً غیرممکن است.

بنابراین، به منظور اجتناب از موقعیت "بی‌نهایت فعالیت نت، بدون تعویض"، حد بالایی تعداد بازه‌های نت به عنوان محدودیت مسئله مشخص می‌گردد. شکل نمونه‌ای از خروجی مدل نت پیشنهادی برای زمان‌بندی فعالیت‌های نت پیشگیرانه با فرض توزیع واپال برای خرابی‌های سیستم می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، بازه‌های زمانی انجام نت پیشگیرانه به مرور زمان کوچکتر می‌شوند.



شکل ۲. نمونه‌ای از خروجی مدل پیشنهادی نت پیشگیرانه

۴. مطالعه موردي

داده‌ها و اطلاعات مربوط به خرابی کلیدها و همچنین نگهداری و تعمیرات آن‌ها، به کمک پرسنل واحد نگهداری و تعمیرات بخش

$\int_0^{T_i} h_i(t) dt$ در رابطه فوق، ریسک تجمعی خرابی^۱ در بازه i است. رابطه فوق بدین معنی است که تعداد تعمیرات حداقل تجهیز در هر بازه نت، برابر با $-\ln R$ می‌باشد. بنابراین می‌توان، هزینه انتظاری بر واحد زمان در هر بازه i را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$CE_{ri} = \frac{C_m \tau_\rho (-\ln R) + C_i \tau_\rho}{T_i + \tau_\rho} \quad (6)$$

C_i و C_m به ترتیب، هزینه در واحد زمان نت اصلاحی و هزینه در واحد زمان نت پیشگیرانه می‌باشند. T_p مدت زمان لازم برای انجام عملیات نت می‌باشد و فرض براین است که مدت زمان لازم برای انجام هر دو نوع نت پیشگیرانه و نت اصلاحی یکسان است. هزینه تجمعی در واحد زمان برای باقیمانده عمر تجهیز را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$CE_r = \frac{\sum_{i=1}^N (C_m \tau_\rho (-\ln R) + C_i \tau_\rho)}{\sum_{i=1}^N (T_i + \tau_\rho)} \quad (7)$$

با این فرض که تجهیز در N مین فعالیت نت پیشگیرانه تعویض خواهد شد و همینطور مدت زمان لازم برای انجام عملیات تعویض تجهیز برابر است با مدت زمان لازم برای انجام فعالیت‌های نت، می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

$$CE_r = \frac{N(C_m (-\ln R) + C_i) \tau_\rho + C_r}{\sum_{i=1}^N (T_i) + N \tau_\rho} \quad (8)$$

¹ Cumulative Failure Risk

معاونت محترم بهره‌برداری برق منطقه‌ای اصفهان، خوابی کلید در ۱۰ سال اول بهره‌برداری تقریباً صفر و پس از آن هر ۱۵ ماه یکبار می‌باشد. با استفاده از این اطلاعات، در زیر به ترتیب به اجرای مدل می‌پردازیم:

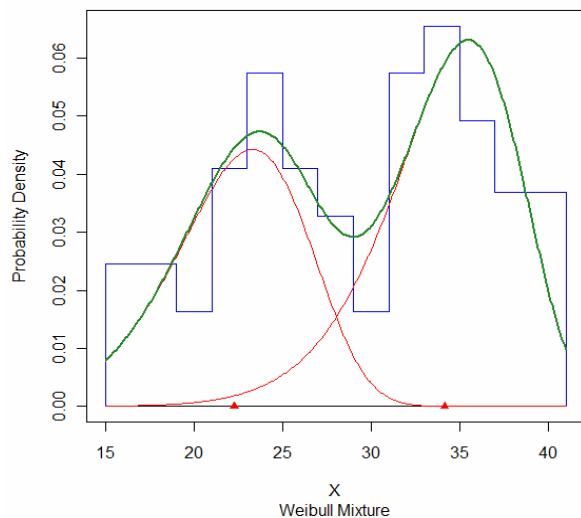
برای محاسبه قابلیت اعتماد از نرم افزار آماری R استفاده شده است. از آنجاییکه میزان خوابی‌ها قبل از سال ۱۳۷۵ هر ۱۵ ماه یکبار در نظر گرفته شده، برای تعیین صحیح مبدأ زمان فرض را بر این می‌گیریم که اولین خوابی گزارش شده، ۱۵ ماه پس از خوابی قبلی رخ داده است. یادآور می‌شود که واحد زمان بر حسب ماه می‌باشد.

با بررسی داده‌های خوابی کلیدها، متوجه شدیم که همه خوابی‌ها در دو قسمت مکانیزم فرمان و پل‌های کلید می‌باشند. از این‌رو، به‌منظور تفکیک این دو جزء، از توزیع آمیخته وایبال دو جزئی برای برآش داده‌ها استفاده خواهیم کرد. قابلیت اعتماد وتابع نرخ خوابی توزیع آمیخته وایبال دو جزئی، از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R(x) = pR_1(x) + (1 - p)R_2(x) \quad (9)$$

$$h(x) = \frac{pR_1(x)}{pR_1(x) + (1 - p)R_2(x)} \cdot h_1(x) + \frac{(1 - p)R_2(x)}{pR_1(x) + (1 - p)R_2(x)} \cdot h_2(x) \quad (10)$$

هیستوگرام داده‌ها و برآش آن‌ها با توزیع‌های وایبال و آمیخته وایبال را در محیط نرم‌افزار R نشان می‌دهنم.



نمودار ۲. هیستوگرام داده‌ها و برآش آن‌ها با توزیع آمیخته وایبال دو جزئی

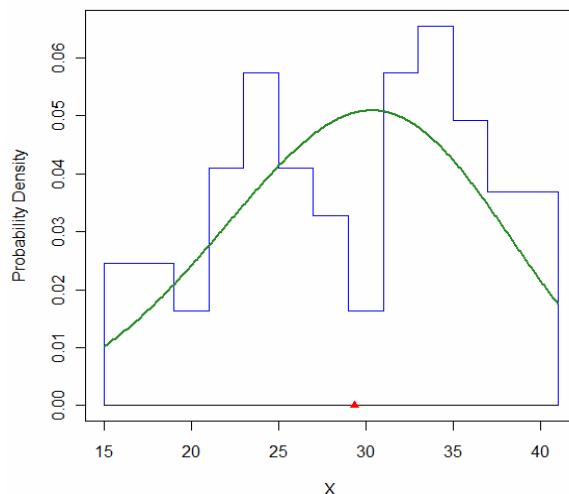
تغییرات تابع نرخ خوابی در بازه‌های انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه، مقدار ضریب کاهش عمر ۰،۰۶ و ضریب افزایش نرخ

معاونت بهره‌برداری برق اصفهان جمع‌آوری و تهییه شده است. همچنین، اطلاعات مورد نیاز مربوط به هزینه‌های نت و تعویض نیز از معاونت محترم بهره‌برداری برق اصفهان دریافت گردیده است. مدل نت پیشنهادی را روی کلیدهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت اجرا کرده‌ایم.

تست و سرویس کلیدها در پست‌های برق اصفهان از سال ۱۳۷۷ طبق برنامه زمان‌بندی شده و به صورت سالیانه انجام می‌گیرد. به دلیل اینکه اکثر کلیدها دارای طول عمر ۳۰ سال هستند، این دسته را مدنظر قراردادهایم. داده‌های خوابی کلیدها از سال ۱۳۷۵ ثبت شده و اطلاعاتی در رابطه با آمار خوابی‌های ماقبل آن در دسترس نمی‌باشد. به این مفهوم که داده‌های خوابی کلیدهای ۳۰ ساله، از ۱۷ سالگی موجود بوده و اطلاعات خوابی آن‌ها از زمان بهره‌برداری تا ۱۷ سال، در دسترس نمی‌باشد.

لذا با برهه‌گیری از اطلاعات تجربی متخصصین شرکت برق منطقه‌ای اصفهان در رابطه با میزان خوابی‌های کلید در ۱۷ سال اول بهره‌برداری، این مشکل تا حدی مرتفع شده است. بنابر نظر

جهت مقایسه نتایج، ابتدا توزیع وایبال و سپس توزیع آمیخته وایبال را برای برآورد پارامترها به کارخواهیم برد. نمودارهای ۱ و ۲،



نمودار ۱. هیستوگرام داده‌ها و برآش آن‌ها با توزیع وایبال

با مقایسه نتایج مشاهده می‌کنیم که برآش داده‌ها با توزیع آمیخته وایبال دارای سطح اطمینان بالاتری است. با بررسی

برداری برق منطقه‌ای اصفهان اخذ گردیده و بهصورت زیر می-
باشد:

$$N \in [1, 40], R \in [0.6, 1], C_i = 8, C_m = 10, C_r = 1200, T_{\text{rep}} = 0.03$$

مبدأ زمانی اجرای بازه‌های فوق، پایان دوره گلارتی کلید می‌باشد
که این دوره معمولاً یک سال است.
با به کارگیری توزیع آمیخته واپیال برای تعیین قابلیت اعتماد،
نتیجه اجرای برنامه بهصورت جدول بوده است:

خرابی ۱۰۰ به دست آمدند. برای اجرای مدل، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مقادیر هزینه‌ها و دیگر پارامترها برای کلیدهای مورد مطالعه مستقیماً از معاونت محترم بهره-

جدول ۱. جدول آنالیز واریانس

توزیع واپیال		توزیع آمیخته واپیال	
5	8	Df	
3.7031	7.847	Chisq	
0.5929	0.4486	Pr(>Chisq)	

جدول ۲. نتایج برآورد پارامترها

توزیع واپیال		توزیع آمیخته واپیال	
0.5808461	0.4191539	1	pi
10.527644	6.772178	4.333188	shape
35.82111	23.86711	32.23605	scale

یادآور می‌شود مقادیر هزینه‌ها به میلیون ریال می‌باشد. همچنین

جدول ۳. نتایج برنامه زمانبندی نت پیشگیرانه با به

کارگیری توزیع آمیخته واپیال

R^*	N	CE_{rMin}	$T_{replace}$
۰.۶۶	۴۰	۲۶۷۴۱	۳۷.۶۶ سال

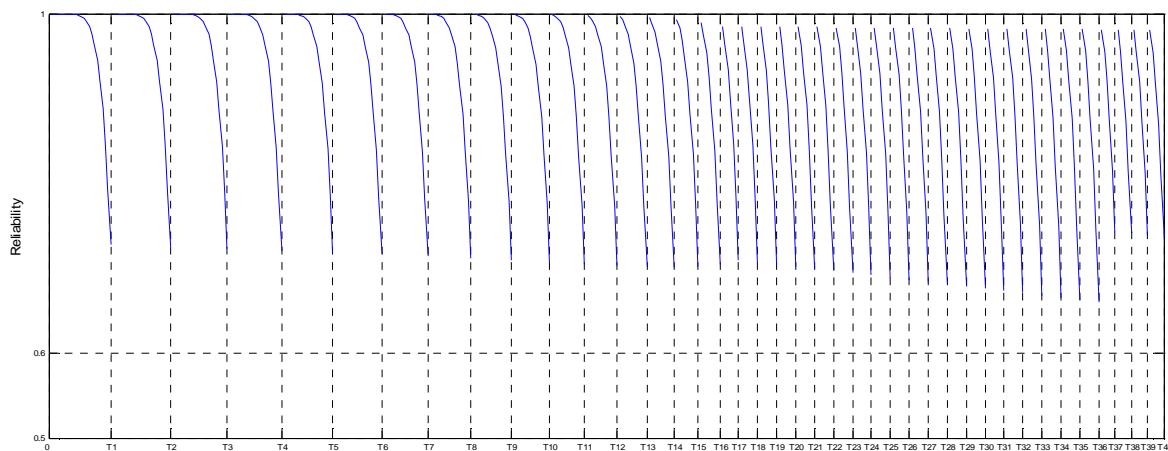
بازه‌های زمانی انجام نت پیشگیرانه T_i ، به صورت جدول ۴ به دست
آمده‌اند:

جدول ۴. بازه‌های زمانی به دست آمده برای انجام نت پیشگیرانه با به کارگیری توزیع آمیخته واپیال

شماره بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
فاصله زمانی - بازه	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شماره بازه	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸
فاصله زمانی - بازه	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شماره بازه	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
فاصله زمانی - بازه	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شماره بازه	۴۰	۳۹	۳۸	۳۷	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴
فاصله زمانی بازه	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شماره بازه	۷	۷	۷	۷	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸

اعتماد کلید نشان داده شده است.

در شکل ۳، روند تغییرات بازه‌های زمانی نت پیشگیرانه و قابلیت



شکل ۳. روند تغییرات بازه‌های زمانی نت و قابلیت اعتماد در حالت استفاده از توزیع آمیخته واپیال

- [6] Monga, A., Zuo, M.J., Toogood, R., "Reliability Based Design of Systems Considering Preventive Maintenance and Minimal Repair", International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 4, 1997, pp. 55–71.
- [7] Chung, S.H., Lau, H.C.W., Ho, W.H.Ip., "Optimization of System Reliability in Multi-Factory Production Networks by Maintenance Approach", Expert System with Applications, Vol. 36, 2009, 10188–10196.
- [8] Malik, M., "Reliable Preventive Maintenance Policy", AIIE Transactions, Vol. 11, No. 3, 1979, pp. 221–228.
- [9] Kijima, M., "Some Results for Repairable Systems with General Repair", J Appl Probab, Vol. 26, 1989, pp. 89–102.
- [10] Nakagawa, T., Nakagawa, K.X., "Optimal Policies for a System with Imperfect Maintenance", IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-36, No. 5, 1987, pp. 631–633.
- [11] Nakagawa, T., "Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies", IEEE Trans Reliab, Vol. 37, 1988, pp. 295–298.
- [12] McLory, C., Richey, K.R., Watson, R., "Circuit Breaker Condition Based Monitoring Developments", Trends in distribution switchgear, Publication No. 400, 1994, pp. 168–172.
- [13] Cross, R.J., Efficient Tools for Reliability Analysis Using Finite Mixture Distributions, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004.
- [14] Jiang, R., Jardine, A.K.S., "An Optimal Burn-in Preventive-Replacement Model Associated with a Mixture Distribution", Quality and Reliability Engineering International, Vol. 23, 2007, pp. 83–93.
- [15] Jiang, S., Kececioglu, D., "Maximum Likelihood Estimates, from Censored Data, for Mixed-Weibull Distributions", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 41, No. 2, 1992, pp. 248–255.
- [16] Lin, D., Zuo, M.J., Yam, R.C.M., "Sequential Imperfect Preventive Maintenance Models", Int J Reliab Qual Safety Eng, 2000.
- [17] Lin, D., Zuo, M.J., Yam, R.C.M., "Sequential Imperfect Preventive Maintenance Models with Two Categories of Failure Modes", John Wiley & Sons, Inc., 2001, pp. 172–183.
- [18] Xiaojun, Z., Lifeng, X., Jay, L., "Reliability-Centered Predictivemaintenance Scheduling for a Continuously Monitored System Subject to Degradation", Reliability Engineering & System Safety, 92, 2007, pp. 530–53.
- [19] Razali, A.M., "Combining Two Weibull Distributions Using a Mixing Parameter", European Journal of Scientific Research, Vol. 31, No. 2, 2009, pp. 296–305.

۵. نتایج

نتایج این تحقیق را می‌توان در ۲ بخش زیر بیان نمود: در مبحث مدل‌سازی قابلیت اعتماد، از توزیع آمیخته وایبال که مدلی مناسب برای سنجش قابلیت اعتماد سیستم‌ها و تجهیزات الکتریکی و مکانیکی با مدهای مختلف خرایی است، برای ارزیابی قابلیت اعتماد کلید فشارقوی استفاده شد. با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به مطالعه موردنظر، مشاهده شد که توزیع آمیخته وایبال، داده‌ها را به خوبی برآورد نمود در حالیکه نتیجه برآش داده‌ها با توزیع وایبال، چندان رضایت‌بخش نبود و این توزیع، داده‌ها را به خوبی پوشش نداد.

تحقیقات پیشین در زمینه نگهداری و تعمیرات کلیدهای فشارقوی، فعالیتهای نت را کامل درنظر گرفته‌اند. بر اساس این فرض، وضعیت تجهیز پس از انجام هر فعالیت نت، به حالت AGAN برمی‌گردد. این فرض برای موقعیت‌های واقعی، چندان درست به نظر نمی‌رسد و در سیستم‌های واقعی، دستیابی به حالت AGAN پس از انجام نت، عملًا غیرممکن است. در این تحقیق، مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، فعالیت‌های نت را ناقص فرض کرده و شرایط تجهیز را پس از انجام فعالیت نت، حالتی مابین AOAB و AGAN درنظر می‌گیرد. در واقع این مدل، روندی فرسایشی را برای تجهیز در نظر می‌گیرد. نتایج مدل نشان می‌دهند که بازه‌های زمانی نت، به مرور زمان کوچکتر می‌شوند که این حالت، تطبیق بیشتری با سیستم‌های واقعی دارد. زیرا انتظار می‌رود که با افزایش عمر تجهیز و فرسایش آن، نیاز به بازه‌های کوچکتر نت داشته باشیم.

مراجع

- [1] Bosma, A., Thomas, R., "Condition Monitoring And Maintenance Strategies For High Voltage Circuit Breakers", Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM, Hong Kong, November 2003.
- [2] Polimac, J., Polimac, V., "Maintenance Scheduling According To Reliability Targets & Actual Equipment Performance", CIRED2001, Conference Publication No. 482, 3.13.
- [3] Pham, H., Wang, H., "Imperfect Maintenance", European Journal of Operational Research, Vol. 94, pp. 425–438, 1996.
- [4] Kijima, M., Nakagawa, T., "Replacement Policies of a Shock Model with Imperfect Preventive Maintenance", European Journal of Operations Research, Vol. 57, 1992, pp. 100–110.
- [5] Love, C.E., Guo, R., "Utilizing Weibull Failure Rates in Repair Limit Analysis for Equipment Replacement/ Preventive Maintenance Decisions", Journal of the Operational Research Society, Vol. 47, 1996, pp. 1366–1376.

