



# 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

## کلمات کلیدی

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

## چکیده:

صنعت برق همواره می‌کوشد که درکنار 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 وایبال 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 به این صورت است که هرگاه 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.

## ۱. مقدمه

روند خصوصی‌سازی، افزایش رشد مصرف برق و بالا رفتن عمر تجهیزات به کاررفته در صنعت برق، لزوم تجدیدنظر در روش‌های نگهداری و تعمیرات<sup>۱</sup> و سیاست‌های تخصیص بودجه را در این صنعت ضروری نموده است. کلیدهای فشار قوی یکی از مهم‌ترین تجهیزات شبکه برق بوده و نقشی حیاتی در این شبکه ایفا می‌کنند زیرا کار سوییچینگ<sup>۲</sup> 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

شبکه‌های برق و همچنین نیاز به قابلیت اعتماد بالای کلیدها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اغلب، نگهداری و تعمیر کلید با توجه به برنامه ودستورکار 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 فشار قوی شده است. هدف این بهینه‌سازی، مینیمم کردن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و ماکزیمم 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. هرکدام از این مقالات، سیاست‌ها و روش‌های مختلفی را برای برنامه‌ریزی نت در پیش گرفته‌اند. 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<sup>۴</sup> (به همراه تعمیرات اصلاحی در هنگام خرابی) می‌باشد.

تاریخ وصول: ۹۰/۲/۱۲

تاریخ تصویب: ۹۰/۳/۲۵

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

<sup>2</sup> Maintenance

<sup>3</sup> Switching

<sup>4</sup> 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 متوالی 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 پرودیک) انجام می‌گرفته‌است. از دهه ۹۰، صنعت برق با مسأله خصوصی‌سازی مواجه شد که منجر به تغییر این روند گردید. به تدریج مسأله نت با تمرکز بر هزینه‌ها، تبدیل به ابزاری 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 (بازه زمانی ثابت) را کنار گذاشته و به استراتژی‌های پیچیده‌تری مانند نت مبتنی بر قابلیت اعتماد (RCM) روی آوردند. [۱۲]

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

۱. تقریباً در تمام تحقیقات انجام‌گرفته زمان انجام تعمیرات-پیشگیرانه ثابت‌است و سیاست نت پرودیک به کار برده شده-است.

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

۳. بیشتر کارهای انجام‌شده 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 مسأله کمی کردن ارتباط بین قابلیت اعتماد و نت پرداخته شده‌است.

در تحقیق حاضر با ارائه یک مدل ریاضی، تأثیر فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر قابلیت اعتماد تجهیز مورد بررسی قرار گرفته و اثر هر یک از پارامترهای مدل بر پاسخ بهینه، قابل 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 ارائه‌شده به‌گونه‌ای است که علاوه بر حفظ قابلیت اعتماد سیستم در سطحی قابل 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 مدل‌سازی زمان‌های خرابی ضروری می‌باشد. توزیع وایبال یکی از متداول‌ترین توزیع‌ها برای مدل‌سازی 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 به نظر می‌رسد که انجام تعمیرات پیشگیرانه با فاصله زمانی ثابت، برای تمام طول عمر تجهیز مناسب نیست.

از این‌رو سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه متوالی<sup>۱</sup> توسط ناکاگاوا و کیجیما [۴] ارائه شده‌است. در برخی از روش‌ها، قابلیت اعتماد ملاک انجام تعمیرات است که لاو 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<sup>۲</sup>
۲. نت حداقل<sup>۳</sup>
۳. نت ناقص<sup>۴</sup>

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<sup>۵</sup> و ضریب بهبود<sup>۶</sup> 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 کرد که در آن، نت پیشگیرانه با احتمال  $p$  ناقص و با احتمال  $1-p$  کامل است. در این

<sup>1</sup> Sequential Maintenance

<sup>2</sup> Perfect Maintenance

<sup>3</sup> Minimal Maintenance

<sup>4</sup> Imperfect Maintenance

<sup>5</sup> Virtual Age

<sup>6</sup> Improvement Factor

خرابی هستند [۱۵]. از این رو، در این کار از توزیع آمیخته وایبال برای مدل سازی قابلیت اعتماد کلیدهای فشارقوی استفاده شده است.

به منظور پیشگویی روند تغییرات قابلیت اعتماد طی دوره های 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 می کند و به صورت یک تابع بازگشتی است. مدل هیبرید، میزان کاهش عمر تجهیز پس از تکمیل فعالیت نت و میزان افزایش تابع نرخ خرابی پس از بهره برداری مجدد تجهیز را در بر می گیرد [۱۷].

در شکل ۱، تابع نرخ خرابی مدل هیبرید و مدل های کاهش عمر و افزایش نرخ خرابی، قبل و بعد از انجام فعالیت نت پیشگیرانه نشان داده شده و مقایسه شده اند.

رابطه بین توابع نرخ خرابی قبل و بعد از آمین نت پیشگیرانه به صورت زیر تعریف می شود:

$$h_{i+1}(t) = b_i h_i(t + a_i T_i) \quad t \in (0, T_{i+1}) \quad \text{for} \quad (3)$$

$h_i$  دارای توزیع آمیخته وایبال می باشد. پارامتر  $(0 < a_i < a_i)$  را ضریب کاهش عمر<sup>۴</sup> می نامند و به این مفهوم است که انجام هر فعالیت نت ناقص، نرخ خرابی را درست بعد از انجام آن تغییر می دهد. پارامتر  $b_i$  ( $b_i > 1$ ) ضریب افزایش نرخ خرابی<sup>۵</sup> نامیده می شود و نشان می دهد که هر فعالیت نت ناقص، موجب افزایش نرخ خرابی سیستم در طول عمر آن می گردد. این دو پارامتر را می توان از تحلیل داده های 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 می آورند. در اینجا، پارامترهای  $a_i$  و  $b_i$  را در همه دوره ها ثابت در نظر گرفته و آن ها را با استفاده از داده های خرابی تجهیز و فعالیت های نت پیشگیرانه ای که در گذشته بر روی آن انجام گرفته تعیین می کنیم.

به این 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 می گیریم. با مقایسه این مقادیر، روند تابع نرخ خرابی در بازه های مختلف نت به دست آمده و می توانیم پارامترهای مذکور را تعیین کنیم. [۱۷]

اعتماد می باشد. 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 توزیع های استاندارد نامناسب می باشد و استفاده از توزیع های آمیخته در این موارد، می تواند انعطاف پذیری مدل های قابلیت اعتماد را افزایش دهد. توزیع های آمیخته، از مجموع توزیع های استاندارد حاصل می شوند و ابزاری مفید در آنالیز داده های جمعیتی ناهمگن از داده ها می باشند.

علاوه بر این، به کارگیری این توزیع ها روشی منطقی در مدل سازی توزیع احتمالی جامعه ای شامل زیرمجموعه های مجزا می باشد. همچنین، بسیاری از مدهای خرابی مثل تابع نرخ خرابی وان حمام<sup>۱</sup> را نمی توان با توزیع های استاندارد مدل کرد و به همین دلیل، توزیع های آمیخته برای مدل سازی توزیع های پیچیده خرابی مورد توجه قرار گرفته اند. گرچه، مشکلات برآورد پارامترهای این توزیع ها مانع استفاده گسترده از این توزیع ها شده است [۱۳].

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

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

$p_i$  بیانگر درصد وزنی هر یک از توزیع ها می باشد که به آن پارامتر اختلاط نیز گفته می شود. تابع چگالی متناظر با تابع توزیع فوق نیز به صورت زیر است:

$$f_T(t) = \sum_{i=1}^k p_i f_{T_i}(t) \quad (2)$$

توابع توزیع موجود در ساختار توزیع آمیخته لزوماً یکسان نیستند، گرچه در بیشتر موارد، جهت تسهیل در حل مسأله، فرض را بر این می گیرند که همه آنها از یک توزیع پیروی می کنند. ولی در چنین مواردی نیز، پارامترها را یکسان در نظر نمی گیرند. در مقوله قابلیت اعتماد،  $F_{T_i}(t)$  معمولاً یکی از توزیع های وایبال، نمایی، لاگ نرمال<sup>۲</sup> و یا گاما<sup>۳</sup> بوده  $k=2$  می باشد [۱۴]. توزیع آمیخته وایبال، مدلی مناسب برای بررسی قابلیت اعتماد سیستم-ها و تجهیزات الکتریکی و مکانیکی است که دارای مدهای مختلف

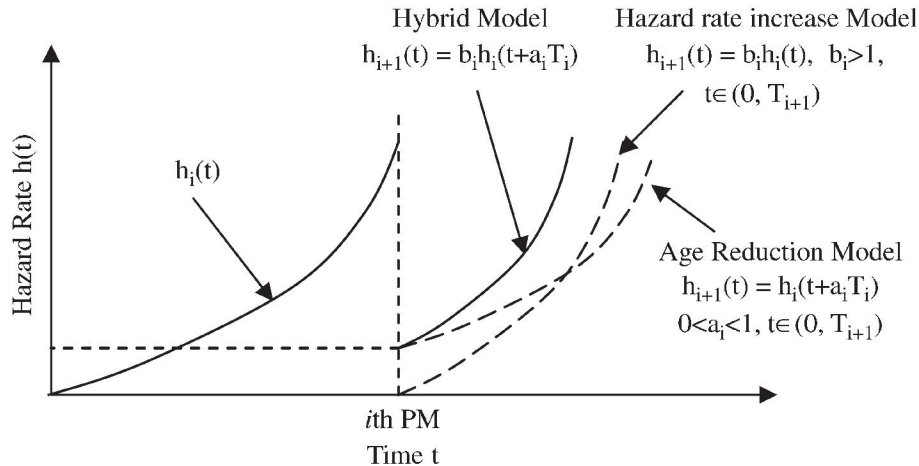
<sup>4</sup> Age Reduction Factor

<sup>5</sup> Hazard Rate Increase Factor

<sup>1</sup> Bath Tube Failure Rate Function

<sup>2</sup> Lognormal

<sup>3</sup> 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 شده‌است. در این بخش، مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات کلید فشارقوی ارائه خواهد شد که ایده اصلی آن از لین وهمکارانش [۱۷] می‌باشد. این مدل توسط ژو و همکارانش [۱۸] گسترش داده شده‌است. نمادها و متغیرهای به کار برده 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 شده‌است.
  ۲. شرایط محیطی و تنش‌های وارده بر کلید، همچنین شرایط فعالیت‌های نت کلید در طول عمر آن ثابت می‌باشد.
  ۳. داده‌های خرابی و تعمیر و نگهداری سیستم، موجود و در دسترس می‌باشد.
  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 پرئودیک می‌تواند تاحدزیادی ناکارآمد باشد. ازاینرو در این تحقیق، سیاست نت متوالی مبنای کار قرار گرفته‌است. ازطرفی در تحقیقات پیشین، فعالیت‌های نت پیشگیرانه برای کلید که یک سیستم تعمیرپذیر می‌باشد، از نوع نت کامل و نت حداقل بوده‌است. این درحالی‌است 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,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$
- $N$ : تعداد بازه‌های نت پیشگیرانه
- $N^*$ : تعداد بهینه بازه‌های نت پیشگیرانه
- $h_i(t)$ : نرخ خرابی تجهیز قبل از  $i$ امین نت پیشگیرانه
- $T_i$ : بازه زمانی انجام  $i$ امین 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 تجهیز گردد. در آخرین بازه ( $N$ امین) تعیین‌شده، 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:

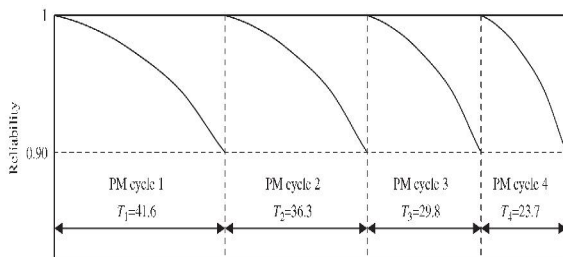
$$\exp\left[-\int_0^{T_1} h_1(t)dt\right] = \exp\left[-\int_0^{T_2} h_2(t)dt\right] = \dots = \exp\left[-\int_0^{T_N} h_N(t)dt\right] = R \quad (4)$$

رابطه فوق را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد: از  $h_i(t)$  در رابطه فوق، از مدل نرخ خرابی هیبرید تبعیت کرده و از رابطه ۳ به دست می آید.

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

$C_r$  هزینه تعویض تجهیز می باشد که علاوه بر هزینه فعالیت نت در زمان تعویض بر سیستم تحمیل می گردد. با تعیین  $R^*$ ، مقادیر  $T_i$  و  $N$  نیز به دست آمده و برنامه زمان بندی فعالیت های نت پیشگیرانه مشخص می گردد. برای تعیین  $R^*$ ، رابطه ۸ را مینیمم می کنیم. در این رابطه،  $T_i$ ها را می توان از رابطه ۵ و به صورت تابعی از  $R$  به دست آورد. محدودیت های حاکم بر مسأله عبارتند از محدودیت در تعداد بازه های زمانی انجام فعالیت های نت پیشگیرانه  $N$  و حد پایینی مجاز برای قابلیت اعتماد تجهیز که در حل مسأله لحاظ می شوند. اگر مسأله را بدون در نظر گرفتن محدودیت تعداد بازه های زمانی نت پیشگیرانه حل کنیم، در صورت کوچک بودن مقدار هزینه های نت، تعداد این بازه ها بی نهایت خواهد بود که عملاً غیرممکن است.

بنابراین، به منظور اجتناب از موقعیت "بی نهایت فعالیت نت، بدون تعویض"، حد بالایی تعداد بازه های نت به عنوان محدودیت مسأله مشخص می گردد. شکل نمونه ای از خروجی مدل نت پیشنهادی برای زمان بندی فعالیت های نت پیشگیرانه با فرض توزیع وایبال برای خرابی های سیستم می باشد. همانطور که ملاحظه می شود، بازه های زمانی انجام نت پیشگیرانه به مرور زمان کوچکتر می شوند.



شکل ۲. نمونه ای از خروجی مدل پیشنهادی نت پیشگیرانه

#### ۴. مطالعه موردی

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

در رابطه فوق، ریسک تجمعی خرابی<sup>۱</sup> در بازه  $i$  است. رابطه فوق بدین معنی است که تعداد تعمیرات حداقل تجهیز در هر بازه نت، برابر با  $-\ln R$  می باشد. بنابراین می توان، هزینه انتظاری بر واحد زمان در هر بازه  $i$  را به صورت زیر محاسبه نمود:

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

$C_m$  و  $C_i$  به ترتیب، هزینه در واحد زمان نت اصلاحی و هزینه در واحد زمان نت پیشگیرانه می باشند.  $\tau_\rho$  مدت زمان لازم برای انجام عملیات نت می باشد و فرض بر این 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 می توان 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 فعالیت های نت، می توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

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

<sup>۱</sup> Cumulative Failure Risk

معاونت محترم بهره‌برداری برق منطقه‌ای اصفهان، خرابی 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:

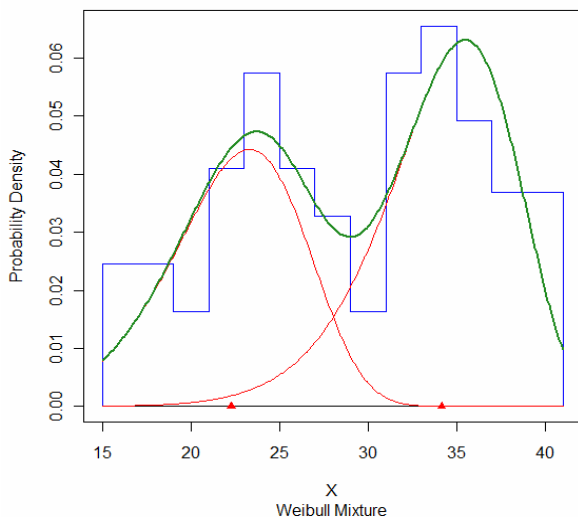
برای محاسبه قابلیت اعتماد از نرم افزار آماری R استفاده شده- است. از آنجاییکه میزان خرابی‌ها قبل از سال ۱۳۷۵ هر ۱۵ ماه یکبار در نظر گرفته شده، برای تعیین صحیح مبدأ زمان فرض را بر این می‌گیریم که اولین خرابی گزارش شده، ۱۵ ماه پس از خرابی قبلی رخ داده‌است. یادآور می‌شود که واحد زمان بر حسب ماه می‌باشد.

با بررسی داده‌های خرابی کلیدها، متوجه شدیم که همه خرابی‌ها در دو قسمت مکانیزم فرمان و پل‌های کلید می‌باشند. از این‌رو، به‌منظور تفکیک این دو جزء، از توزیع آمیخته وایبال دوجزئی برای برازش داده‌ها استفاده خواهیم‌کرد. قابلیت اعتماد و تابع نرخ خرابی توزیع آمیخته وایبال دوجزئی، از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۹]:

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

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

هیستوگرام داده‌ها و برازش آن‌ها با توزیع‌های وایبال و آمیخته وایبال را در محیط نرم‌افزار R نشان می‌دهند.



نمودار ۲. هیستوگرام داده‌ها و برازش آن‌ها با توزیع آمیخته وایبال دوجزئی

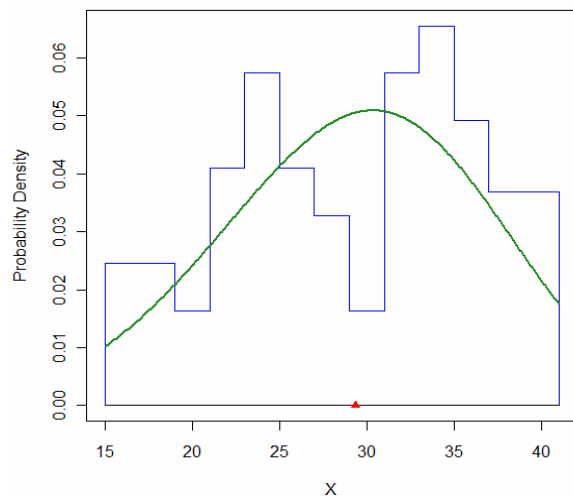
تغییرات تابع نرخ خرابی در بازه‌های انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه، مقدار ضریب کاهش عمر ۰،۰۰۶ و ضریب افزایش نرخ

معاونت بهره‌برداری برق اصفهان جمع‌آوری و تهیه شده‌است. همچنین، اطلاعات مورد نیاز مربوط به هزینه‌های نت و تعویض نیز از معاونت محترم بهره‌برداری برق اصفهان دریافت گردیده‌است. 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 قرار داده‌ایم. داده‌های خرابی کلیدها از سال ۱۳۷۵ ثبت شده و اطلاعاتی در رابطه با آمار خرابی‌های ماقبل آن در دسترس نمی‌باشد. به این مفهوم که داده‌های خرابی کلیدهای ۳۰ ساله، از ۱۷ سالگی موجود بوده و اطلاعات خرابی آن‌ها از زمان بهره‌برداری تا ۱۷ سال، در دسترس نمی‌باشد.

لذا با بهره‌گیری از اطلاعات تجربی متخصصین شرکت برق منطقه‌ای اصفهان در رابطه با میزان خرابی‌های کلید در ۱۷ سال اول بهره‌برداری، این مشکل تا حدی مرتفع شده‌است. بنابر نظر

جهت مقایسه نتایج، ابتدا توزیع وایبال و سپس توزیع آمیخته وایبال را برای برآورد پارامترها به‌کار خواهیم‌برد. نمودارهای ۱ و ۲،



نمودار ۱. هیستوگرام داده‌ها و برازش آن‌ها با توزیع وایبال

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

خرابی ۱،۰۱ به دست آمدند. برای اجرای مدل، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. مقادیر هزینه ها و دیگر پارامترها برای کلیدهای مورد مطالعه مستقیماً از معاونت محترم بهره- برداری برق منطقه ای اصفهان اخذ گردیده و به صورت زیر می- باشد:

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

مبدأ زمانی اجرای بازه های فوق، پایان دوره گارانتی کلید می باشد که این دوره معمولاً یک سال است. با به کارگیری توزیع آمیخته وایبال برای تعیین قابلیت اعتماد، نتیجه اجرای برنامه به صورت جدول بوده است:

جدول ۱. جدول آنالیز واریانس

| توزیع وایبال |        | توزیع آمیخته وایبال |
|--------------|--------|---------------------|
| Df           | 8      | 5                   |
| Chisq        | 7.847  | 3.7031              |
| Pr(>Chisq)   | 0.4486 | 0.5929              |

جدول ۲. نتایج برآورد پارامترها

| توزیع وایبال |          | توزیع آمیخته وایبال |           |
|--------------|----------|---------------------|-----------|
| pi           | 1        | 0.4191539           | 0.5808461 |
| shape        | 4.333188 | 6.772178            | 10.527644 |
| scale        | 32.23605 | 23.86711            | 35.82111  |

جدول ۳. نتایج برنامه زمان بندی نت پیشگیرانه با به-

کارگیری توزیع آمیخته وایبال

| $R^*$ | $N$ | $CE_{rMin}$ | $T_{replace}$ |
|-------|-----|-------------|---------------|
| ۰.۶۶  | ۴۰  | ۲،۶۷۴۱      | ۳۷،۶۶ سال     |

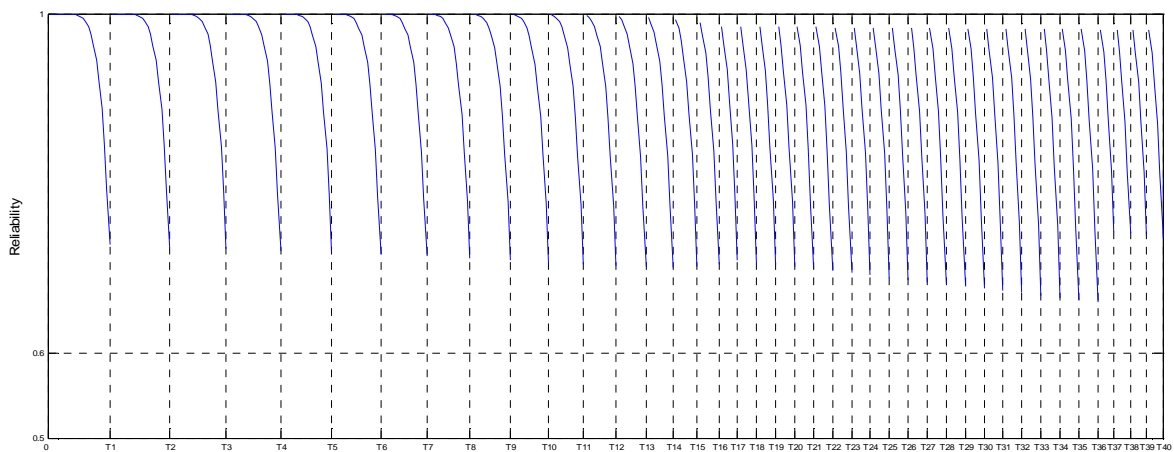
بازه های زمانی انجام نت پیشگیرانه  $T_i$ ، به صورت جدول ۴ به دست آمده اند:

یادآور می شود مقادیر هزینه ها به میلیون ریال می باشد. همچنین

جدول ۴. بازه های زمانی به دست آمده برای انجام نت پیشگیرانه با به کارگیری توزیع آمیخته وایبال

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

در شکل ۳، روند تغییرات بازه های زمانی نت پیشگیرانه و قابلیت اعتماد کلید نشان داده شده است.



شکل ۳. روند تغییرات بازه های زمانی نت و قابلیت اعتماد در حالت استفاده از توزیع آمیخته وایبال

## 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 خرابی است، برای ارزیابی قابلیت اعتماد کلید فشارقوی استفاده شد. با استفاده از داده‌های واقعی مربوط به مطالعه موردی، مشاهده شد که توزیع آمیخته وایبال، داده‌ها را به خوبی برازش نمود در حالیکه نتیجه برازش 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 در نظر 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، عملاً غیرممکن است. در این تحقیق، مدل ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه، فعالیت‌های نت را ناقص فرض کرده و شرایط تجهیز را پس از انجام فعالیت نت، حالتی مابین AGAN و AOAB در نظر 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

- [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 Predictive Maintenance 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.
- [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 Kon, 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.



