Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity P.P 37-45

Vol. 12/ No. 4/ Winter 2024 ISSN 2322-2344 EISSN 2717-1639

Determining the optimal policy in condition-based maintenance for electrical panels

Saba Nasersarraf[1], Ph.D. Student, Shervin Asadzadeh[2], Associate Professor, Yaser Samimi[3], Assistant Professor

1- Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: s.nsarraf@iau-tnb.ac.ir

2- Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: sh_asadzadeh@iau-tnb.ac.ir

3- Department of Industrial Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Email: y_samimi@kntu.ac.ir

Abstract: Companies in the electrical industry are constantly looking for ways to reduce costs while improving and maintaining the reliability of equipment in the maintenance category. This paper studies a condition-based maintenance model in parallel electricity distribution networks. A single control limit is determined for all components to minimize the total expected cost during the planning horizon subject to the reliability constraint of the whole parallel system. Considering the covariate values on the component's deterioration, a proportional hazard model is adopted, and a closed-form analytical solution is provided for the reliability of the tampered failure rate of the load-sharing system. It means that the failure of one component will affect the failure rate of other components. In this research, if a component fails between both inspection points, a minimal repair action must be performed, so we have two cost types for each component: the cost of minimal repair and the cost of replacement. At each inspection point, the failure rate is measured and compared with the optimal control limit decided in the previous step. If it exceeds the control limit, the system must be replaced and the replacement cost is considered, but if it does not exceed the control limit, it will continue to work until the next inspection point without performing any maintenance. Inspection points are performed based on the amount of failure age-dependent and the value of covariate variables in time intervals. Modeling a multi-component system is challenging due to the interdependence of the failure behavior among the components and determining the optimal control limit for preventive replacement. Although different research works have been done in the literature on condition-based maintenance models, there is a research gap in considering the failure dependency of components. Most of them have considered independent failure between the components or the degree of failure dependency has precisely been specified. It can cause inefficient analysis and incorrect assessment of the situation. The proposed nonlinear programming model was evaluated in MATLAB software. This plan helps technicians control the reliability of the system and the operation of the components at a higher level by considering the failure dependency between the components during the inspection periods. Furthermore, they can be informed about failures earlier, before incurring the replacement costs. The results show that the network reliability of the proposed model outperforms the basic model. In the end, a case study of an electrical panel is examined to confirm the effectiveness of the approach.

Keywords: Condition-based maintenance, Parallel system, Reliability, Proportional hazard, Modeling

Date of sending the article: 2023/05/12
Acceptance date of the article: 2023/08/19

Name of responsible author: Dr. Shervin Asadzadeh
Corresponding author's address: Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۴۵-۳۷

Vol. 12 / No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

تعیین سیاست بهینه در نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط برای تابلوهای برق

نوع مطالعه: پژوهشی

صبا ناصرصراف[۱] ، دانشجوی دکتری، شروین اسدزاده[۲]، دانشیار، یاسر صمیمی[۳]، استادیار
۱- گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
s.nsarraf@iau-tnb.ac.ir
۲- گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
sh_asadzadeh@iau-tnb.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
y_samimi@kntu.ac.ir

چکیده: امروزه در صنعت برق، شرکت ها در مقوله تعمیرات و نگهداری در جستجوی روش‌هایی هستند که در عین بهبود و حفظ قابلیت اطمینان تجهیزات، هزینه‌ها نیز کاهش یابد. یکی از عمده‌ترین دلایل خاموشی‌ها و قطعی‌های شبکه‌های برق، خرابی تجهیزات و تاثیر خرابی‌های قطعات بر روی یکدیگر است. این تحقیق قصد دارد با هدف کاهش هزینه‌ها، مدل تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط را در شبکه توزیع برق موازی با نظارت دوره‌ای (گسسته) و حد کنترل یکتا برای تمام اجزاء به جهت تعویض پیشگیرانه و بالا بردن قابلیت اطمینان کل سیستم به کمک مدل مخاطره متناسب ارائه دهد. از مدل مخاطره متناسب برای نشان دادن تاثیر مقادیر متغیرهای تشخیصی و از مدل اشتراک بار با نرخ خرابی دستکاری شده جهت محاسبه قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده است. این طرح به تکنسین‌ها کمک می‌کند تا قابلیت اطمینان سیستم و کارکرد قطعات را در حد بالاتری کنترل کنند و در طول دوره‌های بازرسی از خرابی‌های حداقلی زودتر مطلع شده و پیش از متحمل شدن هزینه‌های تعمیر کامل با تعمیر حداقلی، از تعویض قطعات و هزینه‌های تعویض جلوگیری شود. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیشنهادی با کمک نرم افزار متلب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان شبکه مدل پیشنهادی نسبت به مدل پایه عملکرد بهتری دارد و هزینه‌های کل سیستم نیز کاهش می‌یابد. در پایان به منظور تایید اثربخشی عملکرد رویکرد مطرح شده یک مطالعه موردی سیستم تابلو برق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط، سیستم موازی، قابلیت اطمینان، مخاطره متناسب، مدل‌سازی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول : جناب آقای دکتر شروین اسدزاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر اهمیت موضوع نگهداری و تعمیرات به‌طور روزافزونی افزایش پیدا کرده است. نگهداری، مجموعه فعالیت‌ها یا وظایفی است که عملکرد سیستم را در حالت تعریف شده خود حفظ می‌کند. در مطالعات اخیر محققان، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات با توجه به پیچیدگی‌های سیستم، افزایش روزافزون تکنولوژی، تکنیک‌های جدید و تغییر نگرش سازمان‌ها به سمت افزایش کارایی تجهیزات، به عنوان موضوعی جذاب و دارای ارزش بالا جای خود را باز کرده است. شبکه‌های توزیع برق با حساسیتی که در دنیای امروز در تأمین انرژی مورد نیاز جوامع بشری دارند یکی از شریان‌های حیاتی کشور شمرده می‌شوند. عملکرد موفقیت‌آمیز این شبکه‌ها برابر با تأمین برق دائم و مطمئن برای مشتریان است که جز با پیش‌بینی عیب‌ها و پیشگیری از وقوع حوادث انجام نمی‌شود. شبکه توزیع انرژی الکتریکی امروزه در یک بازار آزاد فعالیت می‌کند و لذا بایستی بتواند انرژی الکتریکی را با بالاترین درجه قابلیت اطمینان و بیشترین سود اقتصادی برای توزیع‌کننده در اختیار مشتریان قرار دهد. باتوجه به طرح جامع فناوری اطلاعات و ارتباطات، خدمات این بخش بدان جهت که تمام اقشار جامعه و تمام منابع و مشاغل مختلف را شامل می‌شود و از طرفی لزوم برخورداری آحاد جامعه از برق مطمئن و مستمر به مشتریان که چرخ‌های اقتصادی صنایع و کلیه سازمان‌ها بدان وابسته است از اهمیت زیادی برخوردار است (اسدزاده، ۱۳۹۸). فرایند نگهداری و تعمیرات به عنوان رکنی ناگسستنی از فعالیت‌های پیرامون شبکه توزیع به شمار می‌رود که در افزایش قابلیت اطمینان المان‌ها، نقاط بار و کل شبکه نقشی بسیار پررنگ را ایفا می‌نماید. لذا همانطور که اخیراً تجربه شده است، تغییر نگرش شرکت‌های توزیع برق برای مؤثرتر شدن و پربازده‌تر شدن استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی و نقش مؤثر آن در کاهش تعداد خاموشی‌ها و انرژی تغذیه نشده اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. بنابراین باید مدلی مطرح شود که با کمینه‌سازی هزینه‌ها، قابلیت اطمینان سیستم را نیز در سطح قابل قبولی نگهداری کند. در این راستا یک مدل تعمیرپذیر نگهداری و تعمیرات در سیستم موازی ارائه خواهد شد که تاثیر خرابی‌های اجزاء سیستم بر روی یکدیگر در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن تاثیر این موضوع بر روی مدل پیشنهادی، اجزای سیستم از مدل نرخ شکست دستکاری شده[۱] جهت تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در سیستم اشتراک بار[۲] پیروی می‌کنند. تحقیقات متنوعی جهت حل مسائل بهینه‌سازی در تعمیرات و نگهداری انجام شده است ولی در اکثر تحقیقات بررسی شده تاکنون موضوع وابستگی خرابی[۳] مابین مؤلفه‌ها و تعامل اجزاء در نظر گرفته نشده است. در مرجع (Jardine et al., 1999) مسئله تعویض[۴] یک سیستم تک‌جزئی را مورد مطالعه قرار دادند، آن‌ها با استفاده از مدل مخاطره متناسب[۵] زمان تعویض سیستم را با استفاده از پایش وضعیت آن تعیین کردند. در این مدل پیشنهادی تابع ریسک جدیدی تعریف می‌شود که حاصل‌ضرب تابع ریسک اصلی سیستم یعنی میزان فرسودگی آن در طی زمان است. در واقع شرایط سیستم از طریق متغیرهای تشخیصی[۶] پایش می‌شود. متغیرهای تشخیصی می‌توانند مثل میزان براده آهن در روغن و یا میزان لرزش دستگاه در طی یک زمان مشخص باشد. تابع هدف نیز کمینه سازی میانگین هزینه به ازای زمان خواهد بود. اگر در زمان پایش نرخ خرابی سیستم از این حد کنترل فراتر رود، تعویض صورت می‌گیرد. از مدل مخاطره متناسب برای بهینه‌سازی تصمیمات نگهداری مبتنی بر شرایط[۷] در حوزه مدیریت دارایی‌های فیزیکی استفاده شده است (Banjevic et al., 2001). نرخ خرابی مدل ارائه شده از توزیع ویبول[۸] پیروی می‌کند. در مرجع (Smidt-Destombes et al., 2004) یک سیستم k از n را در نظر گرفته شده است که اجزای آن‌ها همگی یکسان بوده و برای این‌که سیستم کار کند نیاز دارد k تا از n جزء در سیستم عملکرد قابل قبول داشته باشند. در این مطالعه تقابل بین سه موضوع بررسی می‌شود؛ میزان موجودی قطعه یدکی، ظرفیت تعمیر و سیاست نگهداری پیشگیرانه[۹] و سطح خرابی.

در مرجع (Van der Weide et al., 2010) روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی نگهداری سیستم‌های مهندسی که به وسیله شوک‌هایی آسیب می‌بینند، ارائه داده شده است. در مرجع (Golmakani & Fattahipour, 2011) یک سیاست تعویض را تعریف کردند که هزینه بازرسی هم به مدل اضافه شده است. در مرجع (Golmakani & Moakedi, 2012) مدلی برای بهینه‌سازی فواصل بازرسی (ثابت و غیرثابت) در یک سیستم چند مؤلفه‌ای[۱۰] با وابستگی خرابی بین مؤلفه‌ها ارائه دادند. خرابی‌های یکی از مؤلفه‌های سیستم از نوع سخت و خرابی‌های سایر مؤلفه‌ها از نوع نرم است. خرابی نرم موجب توقف سیستم نمی‌شود، ولی هزینه‌های عملیاتی سیستم را افزایش می‌دهد. خرابی سخت علاوه بر توقف کامل سیستم، موجب افزایش نرخ خرابی سایر مؤلفه‌های سیستم نیز می‌شود. در مرجع (Van Horenbeek & Pintelon, 2013) یک مدل جدید برای سیستم‌های اشتراک بار با استفاده از ساختار k از n [۱۱] ارائه کردند. فرض بر این است که توزیع خرابی اجزاء از یک توزیع کلی زمان شکست پیروی می‌کند. برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های اشتراک بار، میزان خرابی اجزاء باید بر حسب بار جاری و سن فعلی قطعه بیان شود. در این مقاله، نرخ شکست متغیر وابسته به زمان یک جزء با استفاده از مدل مخاطره متناسب کاکس[۱۲] بیان شده است. در مرجع (Ghasemi et al., 2007) یک سیاست بهینه تعویض و نگهداری مبتنی بر شرایط در زمانی که حالت سیستم نامعلوم است ارائه دادند. در این سیستم از مدل مخاطره متناسب برای نشان دادن وضعیت استهلاک آن استفاده شده است. بهینه‌سازی نگهداری بر اساس یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف برای مشاهدات ناکامل توسط برنامه‌ریزی پویا حل شده است. در مرجع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

(Asadzadeh et al., 2014) مدل سیستماتیک یکپارچه توسعه دادند که به طور موثر داده‌های قابلیت اطمینان را در فرآیندهای چند مرحله‌ای پایش می‌کند. در این فرآیندها تأثیر متغیرهای مشاهده شده و مشاهده نشده مشخص می‌شود.

در مدل‌های دارای ساختار اشتراک بار، از مدل‌های اولیه و پایه‌ای آن می‌توان به مراجع (Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2015) اشاره کرد. خروجی این تحقیق نشان می‌دهد هزینه‌های ناشی از نادیده گرفتن وابستگی مؤلفه‌ها با توجه به تعداد و درجه وابستگی آن‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مرجع (Yahyatabar & Najafi, 2018) به بررسی مدل نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط پرداختند که تصمیم-گیری در آن بر اساس اطلاعات به دست آمده از سنجش وضعیت دستگاه صورت می‌گیرد. مهم‌ترین هدف این سیاست نگهداری جلوگیری از اقدامات غیرضروری و هزینه‌بر است. در این استراتژی فقط در صورت وجود شواهدی در اطلاعات پایش وضعیت که نشانگر رفتار غیرعادی سیستم است اقدام به اجرای نگهداری و تعمیرات توصیه می‌شود. بنابراین اگر به طور مناسب طراحی و اجرا شود هزینه نگهداری و تعمیرات به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با اجرای آن قابلیت اطمینان سیستم نیز در مقایسه با اجرای سایر روش‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بیش‌تر خواهد شد. در مراجع (Keizer et al., 2018; Keizer et al., 2017) روند تخریب یک جزء به سطح تخریب و وضعیت آن مؤلفه و سایر اجزاء بستگی دارد. در مرجع (Yahyatabar & Najafi, 2018) کل بار سیستم بین چند مؤلفه به اشتراک گذاشته شده است و بازرسی و سنجش وضعیت عملکرد سیستم به صورت پیوسته یا دوره‌ای انجام می‌شود. در سنجش پیوسته معمولا سیستم توسط حسگرهایی تحت نظارت مداوم قرار می‌گیرد. در سنجش وضعیت دوره‌ای، سیستم در فواصل زمانی خاص که می‌تواند این فواصل یکسان باشد یا یکسان نباشد، بازرسی و مقادیر متغیرهای تشخیصی اندازه‌گیری می‌شوند. واضح است که در سنجش دوره‌ای اطلاعات مربوط به خرابی‌ها در زمان‌های بین فواصل بازرسی از دست داده خواهد شد. در مرجع (Zhang et al., 2020) یک سیاست نگهداری مبتنی بر شرایط با آستانه‌های پویا و اقدامات نگهداری متعدد برای سیستم بازرسی دوره‌ای پیشنهاد دادند که هم به سن و هم به فرآیند متغیر تشخیصی وابسته است. زمان خرابی نیز توسط مدل مخاطره متناسب مدل‌سازی شده است. خط‌مشی پیشنهادی شامل اقدامات مختلف نگهداری از قبیل عدم تعمیر و نگهداری، نگهداری ناقص، تعویض پیشگیرانه، تعمیر حداقلی و تعویض اصلاحی است. در مرجع(Zhang & Si, 2020) سیستم‌های چندجزئی نگهداری و تعمیرات در یک افق برنامه‌ریزی محدود با برنامه ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مدل‌سازی شده است که دارای متغیرهای تصمیم صحیح و ماتریس انتقال احتمالی غیرخطی است. در مرجع (Wang et al., 2022) یک سیاست تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط جدید را برای سیستم‌های چند جزئی دارای ساختار k از n از طریق ترکیب وابستگی‌های تصادفی و اقتصادی تحت بازرسی‌های دوره‌ای توسط فرآیند وینر مدل‌سازی کردند. در مرجع (Arabzadeh & Pham, 2022) یک مدل تعمیر و نگهداری فرصت‌طلبانه برای سیستم‌های k از n با اشتراک بار پیشنهاد دادند که در آن خرابی جزئی با نگهداری اصلاحی و پیشگیرانه ترکیبی مجاز است. سیستم با اجزای یکسان و با توزیع نمایی تحت یک بار ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در مرور ادبیات بیان شد اکثر پژوهش‌ها در مورد نگهداری مبتنی بر شرایط با استفاده از رویکرد مخاطره متناسب دارای ساختار تک جزئی هستند و در مورد ساختار سیستمی چندجزئی همچون سری، سری_موازی، موازی، k از n، سیستم‌های آماده به کار خلاء تحقیقاتی وجود دارد. بر اساس بررسی نقایص مطالعات بالا از نوآوری‌های تحقیق می‌توان به ارائه یک مدل بهینه‌سازی با ساختار عملکردی موازی و در نظر گرفتن تسهیم بار به کمک نرخ شکست دستکاری شده در سیستم نگهداری مبتنی بر شرایط اشاره کرد که در مدل ارائه شده ماتریس احتمال انتقال وضعیت اجزاء غیرخطی تعریف شده است.

ساختار مقاله بدین صورت سازماندهی شده است: در بخش ۲، بیان مسئله و مفروضات مطرح شده است. در بخش ۳، روش و مدل پیشنهادی معرفی شده است. در بخش ۴، مطالعه موردی تشریح می‌گردد و در پایان، نتیجه‌گیری و داده‌های نهایی نشان داده شده است.

۲- بیان مسئله

در این مطالعه، یک تابلو برق متشکل از دو مؤلفه با چینش موازی در نظر گرفته شده است که خرابی آن‌ها از توزیع ویبول پیروی می‌کند و مؤلفه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص و به طور گسسته بازرسی می‌شوند و شرایط آن‌ها جهت محاسبه نرخ مخاطره متناسب مورد مشاهده قرار می‌گیرد. شرایط هر جزء در هر مشاهده می‌تواند نقشی حیاتی در تأثیرگذاری بر قابلیت اطمینان کل سیستم داشته باشد. در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط پیشنهاد می‌شود که در آن هزینه‌های اقدامات تعمیر و نگهداری برای یک افق برنامه‌ریزی معین به عنوان تابع هدف، با توجه به محدودیت قابلیت اطمینان کل سیستم به حداقل می‌رسد. مجموعه زیرسیستم ها با I و مجموعه اجزاء سیستم با J نشان داده می‌شود. T افق برنامه‌ریزی و Δ طول بازه‌ی بازرسی در نظر گرفته شده است. K مجموعه نقاط بازرسی و معادل $K=\left[\frac{T}{\Delta}\right]-1$ است. در هر نقطه بازرسی اگر حد کنترل تعیین شده در هر مشاهده برای هر جزء کمتر از میزان مخاطره متناسب جزء باشد، آن جزء باید جایگزین شود، در غیر این صورت سیستم تا مشاهده بعدی به همان شکل کار می‌کند و بین دو بازرسی یا مشاهده، در صورت خرابی قطعه، حداقل تعمیر باید بلافاصله انجام شود. بنابراین دو نوع هزینه برای هر جزء لحاظ شده است: هزینه حداقل تعمیر و هزینه تعویض. Cmr_{ij} هزینه حداقل تعمیر مؤلفه j در زیرمجموعه i و Crp_{ij} هزینه تعویض مؤلفه j در زیرمجموعه i است. اگر تمام اجزای هر زیرسیستم در آن دوره جایگزین شوند، C_{down} یک هزینه ثابت از کار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

افتادگی به نام هزینه خاموشی در هر دوره در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم اگر یک حد کنترل پایین برای اجزاء در نظر گرفته شود، منجر به تعویض در زمان‌های کوتاه می‌شود که این موضوع به معنای بالا نگه داشتن قابلیت اطمینان و هزینه‌بر بودن سیستم است. چنانچه حد کنترل بالا برای اجزاء در نظر گرفته شود، منجر به اقدامات جایگزینی در زمان‌های طولانی‌تری می‌شود و متعاقباً هزینه تعویض کاهش می‌یابد، در حالی که قابلیت اطمینان سیستم نیز ممکن است کاهش یابد. این موضوع بدان معناست که سیستم بین بازرسی‌ها بیشتر از کار می‌افتد و هزینه‌های حداقل تعمیر افزایش می‌یابد. بنابراین هدف مدل پیشنهادی تعیین حد کنترل بهینه[۱۳] است.

همان‌طور که بیان شد، در این مطالعه سیستم نگهداری مبتنی بر شرایط با توجه به کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان یا دسترسی‌پذیری سیستم بهینه‌سازی می‌شود و یک مدل مخاطره متناسب پارامتریک با توجه به پوشش انواع مختلف نرخ شکست (به عنوان مثال افزایش نرخ شکست، نرخ شکست ثابت و کاهش نرخ شکست) از توزیع ویبول به عنوان مدل زمان خرابی تجهیزات استفاده می‌شود و همچنین وضعیت سیستم با استفاده از مدل مخاطره متناسب بسته به سن سیستم و متغیر نظارت شده اندازه‌گیری خواهد شد. τ_{ijk} عمر مؤلفه j در زیرمجموعه i در نقطه اولیه بازرسی kام و τ'_{ijk} عمر مؤلفه j در زیرمجموعه i در نقطه پایانی بازرسی kام است. مجموعه تعداد حالات (شرایط) متغیر تشخیصی M حالت است که با علامت $S=\{0,1,....M\}$ و متغیر آن برای سهولت در فرمول‌نویسی با علامت $Z(K\Delta)\in S$ نشان داده می‌شود. در واقع $Z_{ijk}(t)$ نشان‌دهنده وضعیت سیستم یا پارامتر عدم اطمینان است که در دوره بازرسی k مقدار آن می‌تواند یکی از اعضای مجموعه S باشد. اجزای سیستم دارای وابستگی از نوع تقسیم بار هستند که پس از خرابی قطعه، حجم کل بار L باید بین اجزای باقیمانده توزیع شود. به منظور تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم و محاسبه اثر افزایش نرخ شکست اشتراک بار بر روی جزء باقیمانده از مدل نرخ شکست دستکاری شده استفاده می‌شود. در این مدل شتاب شکست، زمانی که بار از سطح پایین‌تر به سطح بالاتر افزایش می‌یابد در تابع نرخ شکست منعکس خواهد شد (Pozsgai et al., 2003).

فرآیند متغیر تشخیصی دارای ویژگی‌های مارکوفی است که در طول زمان تغییر می‌کند و به حالات قبلی بستگی ندارد. در خصوص انتقال از وضعیت a در زمان Δk به وضعیت b در زمان $\Delta(k+1)$ بستگی تنها و تنها به a دارد نه وضعیت‌های قبلی. η_{ij} و β_{ij} پارامترهای توزیع ویبول هستند و γ_{ij} وزن متغیر در تابع خرابی مؤلفه j در زیرمجموعه i (توسط روش حداکثر درستنمایی[۱۴] از تاریخچه خرابی‌های سیستم به دست می‌آید.) نرخ خرابی مؤلفه i در زیرمجموعه j در فرمول (۱) آورده شده است.

$$h_{ij}(t,z(t))=\frac{\beta_{ij}}{\eta_{ij}}\left(\frac{t}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}-1}\exp\left\{\gamma_{ij}Z(t)\right\}$$
$$t=0,\Delta,2\Delta,\ldots\quad \Delta>0 \qquad (۱)$$

در ادامه در قسمت روش پیشنهادی، مدل ارائه شده به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش با بهره‌گیری از مفروضات و بیان مسئله مطرح شده در بخش قبل مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود. در یک سیستم موازی، زمانی که یک مؤلفه از کار می‌افتد میزان بار آن مؤلفه به مؤلفه دیگر منتقل می‌شود. در مرجع (Rykov et al., 2022) که مدل نرخ خرابی دستکاری شده را برای سیستم تقسیم بار پیشنهاد دادند؛ پس از خرابی قطعه حجم کار باید دوباره با نرخ خرابی دستکاری شده در میان اجزای باقی مانده توزیع شود. اکثراً بار به طور مساوی بین هر جزء باقی‌مانده تقسیم می‌شود. در این تحقیق بار به طور مساوی تقسیم نمی‌شود و نرخ خرابی برای هر جزء متفاوت است. اگر حجم کل کار L، تعداد کل اجزاء n و j جزء از کار افتاده باشد، zl_j نشان‌دهنده میزان بار روی اجزای باقیمانده و در یک سیستم دو جزئی معادل $zl_j=2zl_0$ است (n_i تعداد کل اجزای زیرسیستم i است). حجم بار $zl_j(j=0,1)$ در بازه‌ی زمانی $[\tau_{ijk},\tau'_{ijk}]$ مد نظر قرار می‌گیرد. به عبارتی میزان بار در بازه زمانی تغییر می‌کند.

فرمول محاسبه آن در (۲)، (۳) و (۴) بیان شده است.

$$zl_0=\frac{L}{n} \qquad (۲)$$
$$zl_j=\frac{L}{(n-j)} \qquad (۳)$$
$$zl_j=(j=0,2,\ldots,n-k) \qquad (۴)$$

$\lambda_0(t)$ نرخ خرابی پایه که هیچ ارتباطی با میزان بار در سیستم ندارد. $\lambda_1(t)$ نرخ خرابی n-1 مؤلفه‌ی در حال کار و $\lambda_j(t)$ نشان‌دهنده نرخ خرابی n-j مؤلفه‌ی در حال کار است که در فرمول (۵) نشان داده شده است.

$$\lambda(t)=\lambda_j(t)=\delta(zl_j).\lambda_0(t)\quad \tau_{ijk}\le t\le \tau'_{ijk} \qquad (۵)$$

$\delta_j(t)$ نرخ خرابی عامل دستکاری شده در حجم بار zl_j، بار تقسیم شده بر روی جزء دیگر در زمان t است که در فرمول (۶) محاسبه شده است.

$$\delta_j=\delta(zl_j)=(zl_j)^{1.5}=\left(\frac{zl}{n-j}\right)^{1.5} \qquad (۶)$$

j امین جزء در نرخ خرابی $\alpha_j(t)$ از کار می‌افتد. $\alpha_2(t)$ نرخ خرابی اولین شکست و همان‌طور که در فرمول (۷) نشان داده شده است، $\alpha_n(t)$ نرخ خرابی nامین شکست است.

$$\alpha_j(t)=(n-j).\lambda_j(t)=(n-j).\ \delta(zl_j) \qquad (۷)$$

$h(t)$ تابع نرخ مخاطره متناسب و $h_0(t)$ تابع نرخ مخاطره متناسب پایه تعریف شده است که در زمان t برابر است با:

$$h(t)=h_j(t)=\delta_j.h_0(t)\quad \tau_{ijk}\le t\le \tau'_{ijk} \qquad (۸)$$
$$h(t)=\delta(zl_j).h_0(t) \qquad (۹)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

همان‌طور که در فرمول (۵) اشاره شد نرخ خرابی هر مؤلفه با λ_0 نشان داده می‌شود و معادل است با:

$$h_0(t)=\lambda_{ij}(t)=\frac{\beta_{ij}}{\eta_{ij}}\left(\frac{t}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}-1} \quad (۱۰)$$

۳-۱- هزینه نگهداری حداقلی

بین دو بازرسی، فاصله زمانی وجود دارد که سیستم ممکن است خراب شود. سیاست در این شرایط تعمیر حداقلی است. این نوع تعمیر هر نرخ خرابی سیستم را دقیقا به حالت قبل از خرابی برمی‌گرداند و سیستم می‌تواند شروع به کار کند. در واقع هیچ بهبودی در نرخ خرابی سیستم بعد از این نوع تعمیر اتفاق نمی‌افتد. از این رو جهت به دست آوردن مجموع هزینه نگهداری در طی افق برنامه‌ریزی می‌بایست متوسط تعداد خرابی بین هر فاصله بازرسی را به دست آورد. برای مثال در kامین نقطه بازرسی متوسط تعداد خرابی سیستم برابر است با:

$$H_0(t)=\int_0^t \lambda_{ij}(t).dx = \int_0^t \frac{\beta_{ij}}{\eta_{ij}}\left(\frac{t}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}-1}.dx=\left(\frac{t}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}} \quad (۱۱)$$

$H_{ijk}(\tau_{ijk},\tau'_{ijk})$ تابع مخاطره با توجه به عمر سیستم با در نظر گرفتن متغیر تصادفی لرزش قطعات و همچنین نرخ دستکاری شده تقسیم بار برابر است با:

$$h(t,Z(\tau_{ijk}),zl_j)=h_0(t).\exp(Z_{ijk}(t)).\delta(zl_j) \quad \tau_{ijk}\le t\le \tau'_{ijk} \quad (۱۲)$$

$$H_{ijk}(\tau_{ijk},\tau'_{ijk})=\int_{\tau_{ijk}}^{\tau'_{ijk}} h_{ij}(t,Z(\tau_{ijk}),zl_j).dt= \int_{\tau_{ijk}}^{\tau'_{ijk}} \frac{\beta_{ij}}{\eta_{ij}}\left(\frac{t}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}-1}\exp\{\gamma_{ij}Z_{ijk}(t)\}.\delta(zl_j).dt = \left(\left(\frac{\tau'_{ijk}}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}}-\left(\frac{\tau_{ijk}}{\eta_{ij}}\right)^{\beta_{ij}}\right)\exp\left\{\gamma_{ij}Z_{ijk}(t)\right\}.\delta(zl_j)= \left(\frac{\tau'_{ijk}-\tau_{ijk}}{\eta_{ij}}\right)^{\beta}.\exp\left\{\gamma_{ij}Z_{ijk}(\tau_{ijk},\tau'_{ijk})\right\}.\delta(zl_j) \quad (۱۳)$$

با توجه به اینکه هزینه هر بار تعمیر حداقلی به صورت ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شود، با ضرب Cmr_{ij} در تعداد خرابی، متوسط هزینه نگهداری حداقلی به دست می‌آید.

۳-۲- هزینه تعویض سیستم

متغیر تعویض قطعات با نشان‌گر Ir_{ijk} که در قالب فرمول (۱۴) تعریف شده است، حاصل مقایسه حد کنترل تعیین شده با نرخ مخاطره متناسب است که اگر بزرگتر از صفر باشد معادل عدد یک خواهد بود و نشان‌دهنده تعویض است و در غیر این صورت معادل صفر خواهد بود که نشان دهنده ادامه کار است.

$$Ir_{ijk}(h_{ij}(\tau'_{ijk},Z_{ijk})-d)=\begin{cases}0 & if\,(h_{ij}(\tau'_{ijk},Z_{ijk})-d)<0\\ 1 & if\,(h_{ij}(\tau'_{ijk},Z_{ijk})-d)\ge 0\end{cases} \quad (۱۴)$$

هزینه هر بار تعویض برابر است با Crp_{ij} که به عنوان پارامتر ورودی مسئله خواهد بود.

تصمیم‌گیری در خصوص تعویض و یا عدم تعویض قطعه‌ها در معادله (۱۵) نشان داده شده است. اگر متغیر Ir_{ijk} معادل یک باشد مؤلفه باید تعویض گردد، در غیر این صورت عمر مؤلفه به ازای یک دوره بازرسی افزایش می‌یابد که در معادلات (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) عمر سیستم در ابتدا و انتهای مرحله k را نشان می‌دهد.

$$\tau_{ijk}=\tau'_{ijk}(1-Ir_{ijk}(h_{ij}(\tau'_{ijk},Z_{ijk},zl_j)-d)) \quad \forall\, k\in\{2,\dots,k\},\ Z_{ijk}\in\{1,2,\dots,S\} \quad (۱۵)$$

$$\tau'_{ijk}=\Delta+\tau_{ijk} \quad \forall\, k\in\{2,\dots,k\},\ Z_{ijk}\in\{1,2,\dots,S\} \quad (۱۶)$$

$$\tau_{ijk}=0 \quad (۱۷)$$

$$\tau_{ijk},\ \tau'_{ijk}\ge 0 \quad (۱۸)$$

متغیر تعویض از نوع صفر و یک است.

$$Ir_{ijk}\in\{0,1\} \qquad \forall\, i\in I,\ j\in n_i,\ k\in K \quad (۱۹)$$

۳-۳- هزینه خاموشی سیستم

اگر تمام اجزای هر زیرسیستم در یک دوره جایگزین شوند، یک هزینه ثابت از کار افتادگی، به نام هزینه خاموشی در هر دوره در نظر گرفته می‌شود. فرمول (۲۰) هزینه خاموشی را مشخص می‌کند.

$$y_k=1-\prod_{i=1}^{i=I}(1-\prod_{j=1}^{n_i} Ir_{ijk}) \quad (۲۰)$$

۳-۴- قابلیت اطمینان سیستم

در این تحقیق هدف پیدا کردن حد کنترل بهینه برای اجزاء سیستم است، با توجه به اینکه قابلیت اطمینان کل سیستم در تمامی فواصل افق برنامه‌ریزی از یک حد داده شده‌ای تجاوز نکند. وضعیت هر یک از اجزاء در قابلیت اطمینان سیستم تاثیرگذار است. بر اساس مرجع (Lawless, 2011) اثر متغیر تصادفی لرزش که عضو مجموعه $S=\{0,1.....M\}$ است، در مبحث قابلیت اطمینان با فرمول (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$R(t|x)=[R_0(t)]^{\exp(\gamma Z)} \quad (۲۱)$$

قابلیت اطمینان هر زیرسیستم می‌تواند به کمک فرمول‌های (۲۲) و (۲۳) محاسبه شود:

$$R_i(t)=\left[\sum_{j=1}^{n-j+1} A_j.\exp(-\alpha_j t)\right]^{\exp(\gamma_{ij}x)}= \left[\sum_{j=1}^{n-j+1} A_j.\exp(-(n-j+1)\delta_{j-1}\mathrm{H}_0(t))\right]^{\exp\{\gamma_{ij}Z_{ijk}(t)\}} \quad \forall\, i\in\{1,\dots,I\},\ Z\in\{1,\dots,S\} \quad (۲۲)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

$$A_j=\prod_{\substack{j'=1\\ j'\neq j}}^{2}\frac{(n\text{-}j'+1).\delta_{j'\text{-}1}}{(n\text{-}j'+1).\delta_{j'\text{-}1}\text{-}(n\text{-}j+1).\delta_{j\text{-}1}}=\prod_{\substack{j'=1\\ j'\neq j}}^{n\text{-}j+1}\frac{\alpha_{j'}}{\alpha_{j'}\text{-}\alpha_j}$$
$$\forall\ n=2,\ \mathrm{i}\in\{1,\ldots,I\},\ \ \mathrm{Z}\in\{1,\ldots,S\} \qquad (۲۳)$$

قابلیت اطمینان هر زیرسیستم با در نظر گرفتن میانگین وضعیت قطعه-های آن زیرسیستم و با کمک فرمول (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$R_i(t|x)=[R_0(t)]^{\exp\left(\frac{\gamma_{ij}Z_{ij}+\gamma_{ij}Z_{ij}}{2}\right)} \qquad (۲۴)$$

فرمول (۲۵) قابلیت اطمینان سیستم موازی را محاسبه می‌کند.

$$\mathrm{R}\left(k\Delta,\phi_k,\Delta\right)=\prod_{i=1}^{i=I}R_{ijk}\left(k\Delta,Z_{ijk},\Delta\right)^{\exp\left(\frac{\sum_j^{n_i}\gamma_{ij}Z_{ijk}}{j_i}\right)}=$$
$$\prod_{i=I}^{i=I}\left(\sum_{j=1}^{n_i\text{-}j+1}A_j.\ exp\left(\text{-}\alpha_j t\right)\right)^{exp\left(\frac{\sum_j^{n_i}\gamma_{ij}Z_{ijk}}{j_i}\right)}=$$
$$\left[\sum_{j=1}^{n\text{-}j+1}A_j.\ exp\left(\text{-}(n\text{-}j+1)\delta_{j\text{-}1}H_0(t)\right)\right]^{exp\left(\frac{\sum_j^{n_i}\gamma_{ij}Z_{ijk}}{j_i}\right)}$$
$$\forall\ k\in\{1,\ldots,N\},\ \ Z_{ijk}\in\{1,2,\ldots,S\} \qquad (۲۵)$$

محدودیت (۲۶) حداقل مجاز درصد قابلیت اطمینان را تعیین می‌کند.

$$\mathrm{R}\left(k\Delta,\phi_k,\Delta\right)\geq R_0$$
$$\forall\ k\in\{1,\ldots,N\},\ \ Z_{ijk}\in\{1,2,\ldots,S\} \qquad (۲۶)$$

۳-۵- ماتریس احتمالی انتقال

ماتریس احتمال انتقال با کمک متغیرهای دامی صفر و یک، میزان تاثیر مؤلفه‌ی دیگر بر روی مؤلفه j در همان زیرسیستم را نشان می‌دهد و در قالب فرمول‌های (۲۷) محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} Z_{ijk}\in\{s=0\} & \omega=0\ ,\ \omega'=0 \\ Z_{ijk}\in\{s=1\} & \omega=1\ ,\ \omega'=0 \\ Z_{ijk}\in\{s=2\} & \omega=0\ ,\ \omega'=1 \end{cases} \qquad (۲۷)$$

در ادامه نحوه محاسبه ماتریس‌های احتمال P، P' و P'' توضیح داده خواهد شد. هر سه ماتریس انتقال احتمال شرطی $\{M\times M\}$ مؤلفه j در زیرمجموعه i، در نقطه بازرسی k و حالت s در شرایط عملکرد سیستم است که ماتریس انتقال P میزان انتقال نرخ خرابی به سایر مؤلفه‌ها را نشان می‌دهد، در زمانی که وضعیت مؤلفه‌ی دیگر در زیرسیستم i دارای مقدار s=0 است. ماتریس انتقال P' میزان انتقال نرخ خرابی به سایر مؤلفه‌ها در زمانی را که وضعیت مؤلفه‌ی دیگر در زیرسیستم i دارای مقدار s=1 است، به نمایش می‌گذارد و ماتریس انتقال P'' نیز بیان‌گر میزان انتقال نرخ خرابی به سایر مؤلفه‌ها است، در زمانی که وضعیت مؤلفه‌ی دیگر در زیرسیستم i دارای مقدار s=2 باشد.

ϕ_k بردار کل متغیرهای تشخیصی معادل بردار $\phi_k=\left(Z_{11k}\middle|Z_{12(K\text{-}1)}\right),\left(Z_{12k}\middle|Z_{11(K\text{-}1)}\right)$ است و همچنین ϕ'_k مقادیر تحقق یافته، $\phi_{k\text{-}}$ است که معادل بردار $\phi'_k=\phi_{k\text{-}1}=(Z_{11(k\text{-}1)},Z_{12(k\text{-}1)})$ خواهد بود. به کمک دو بردار ذکر شده می‌توان تابع میانگین مقدار تحقق یافته ϕ'_k و تصمیم‌گیری در k-1 امین مرحله را که با $E_{\left(\phi_k|\phi'_k\right)}$ نشان داده شده است، محاسبه کرد.

نحوه محاسبه ماتریس انتقال و احتمال رخدادها با در نظر گرفتن وابستگی خرابی بین مؤلفه‌ها و تاثیر آن‌ها بر یکدیگر در معادله (۲۸) بیان شده است که احتمال انتقال کلی برابر است با حاصل‌ضرب احتمال انتقال مؤلفه یک تحت تاثیر وضعیت خود آن مؤلفه و مؤلفه دیگر در دوره بازرسی قبلی در احتمال انتقال مؤلفه دو تحت تاثیر وضعیت خود آن مؤلفه و مؤلفه دیگر در دوره بازرسی قبلی. در این معادله از متغیرهای کمکی جهت محاسبه ماتریس احتمال انتقال استفاده شده است. معادله-های (۲۹) تا (۳۳) روابط بین متغیرهای کمکی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} &P_{\left(\phi_k|\phi_{k\text{-}1}\right)}= \\ &\prod_{i=1}^{I}\Big(P_{\left(Z_{i1(k\text{-}1)},Z_{i1k}\middle|Z_{i2(k\text{-}1)}\right)}(1\text{-}\omega\text{-}\omega') \\ &+P'_{\left(Z_{i1(k\text{-}1)},Z_{i1k}\middle|Z_{i2(k\text{-}1)}\right)}\omega+ \\ &P''_{\left(Z_{i1(k\text{-}1)},Z_{i1k}\middle|Z_{i2(k\text{-}1)}\right)}\omega') \\ &\Big(P_{\left(Z_{i2(k\text{-}1)},Z_{i2k}\middle|Z_{i1(k\text{-}1)}\right)}(1\text{-}\omega\text{-}\omega') \\ &+P'_{\left(Z_{i2(k\text{-}1)},Z_{i2k}\middle|Z_{i1(k\text{-}1)}\right)}\omega \\ &+P''_{\left(Z_{i2(k\text{-}1)},Z_{i2k}\middle|Z_{i1(k\text{-}1)}\right)}\omega' \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

$$\omega+\omega'\leq 1 \qquad (۲۹)$$

$$\omega+\omega'=0 \qquad \forall\ Z_{ijk}\in\{s=0\} \qquad (۳۰)$$

$$\omega=1 \qquad \forall\ Z_{ijk}\in\{s=1\} \qquad (۳۱)$$

$$\omega'=1 \qquad \forall\ Z_{ijk}\in\{s=2\} \qquad (۳۲)$$

$$\omega,\omega'\in\{0,1\} \qquad (۳۳)$$

۳-۶- تابع هدف

با توجه به محدویت‌های بیان شده در بخش قبل، تابع هدف جهت حداقل‌سازی هزینه‌های تعویض با توجه به متغیر تعویض، تعمیر حداقلی با توجه به تعداد مورد انتظار خرابی هر قطعه بین دو نقطه بازرسی و هزینه‌های خاموشی بیان می‌شود. همچنین به دلیل وجود فضای عدم اطمینانی که متغیرهای تشخیصی در سیستم ایجاد می‌کنند، در هر نقطه بازرسی باید برای وضعیت قطعات در نقطه بازرسی بعدی تصمیم‌گیری شود.

$$\begin{aligned} &Min \\ &=E_{\phi_1}\left[\sum_i^I\sum_j^{n_i}\begin{matrix}(Cmr_{ij}H_{ij1}\left(\tau_{ijk},\tau'_{ijk}\right) \\ +Crp_{ij}Ir_{ijk}\left(\left(h_{ij}\left(\tau'_{ijk},Z_{ijk},zl_j\right)\text{-}d\right)\right)\end{matrix}+C_{down}y_1\right. \\ &+E_{\left(\phi_2|\phi'_2\right)}\left[\sum_i^I\sum_j^{n_i}\begin{matrix}(Cmr_{ij}H_{ij2}\left(\tau_{ij2},\tau'_{ij2}\right) \\ +Crp_{ij}Ir_{ij2}\left(\left(h_{ij}\left(\tau'_{ij2},Z_{ij2},zl_j\right)\text{-}d\right)\right)+ \\ C_{down}y_2\end{matrix}\right. \\ &\left.+E_{\left(\phi_K|\phi'_K\right)}\left[\sum_i^I\sum_j^{n_i}\begin{matrix}(Cmr_{ij}H_{ijk}\left(\tau_{ijk},\tau'_{ijk}\right) \\ +Crp_{ij}Ir_{ijk}\left(\left(h_{ij}\left(\tau'_{ijk},Z_{ijk},zl_j\right)\text{-}d\right)\right)+ \\ C_{down}y_k\end{matrix}\right]\ldots\right]\right] \end{aligned}$$

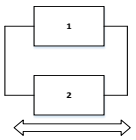
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

(۳۴)

در ادامه مدل پیشنهادی در قالب یک مثال برای شبکه الکتریکی تابلو برق حل خواهد شد.

۴- مطالعه موردی

با توجه به مطالب مطرح شده در مقدمه و بیان مسئله، تعمیرات و نگهداری در صنعت برق از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین جهت پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، برای یک شبکه الکتریکی تابلو برق با مدارهای الکتریکی به صورت موازی طی دو دوره بازرسی در شکل (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): چینش شبکه توزیع برق

مطابق مرجع (Makis & Jardine, 1992) در نقطه شروع، وضعیت سیستم صفر است و بر این مبنا که وضعیت سیستم در مرحله بعد مقادیر متفاوتی با احتمال مشخصی خواهند داشت، قبل از ورود به مرحله اول، حد کنترل پایه باید از ابتدا مشخص باشد.

با کمک معادلات مطرح شده در قسمت قبل، ماتریس احتمال و انتقال حالات مختلف مدارهای الکتریکی با در نظر گرفتن وضعیت‌های متفاوت لرزش آن‌ها مطابق جدول (۱) محاسبه شده است. متغیر مخاطره متناسب نیز در سه حالت در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): ماتریس احتمال انتقال

قطعات	S	P	P'	P''
۱-۲	$s \in \{۰,۱,۲\}$	$\begin{bmatrix} ۰.۶ & ۰.۳ & ۰.۱ \\ ۰ & ۰.۴ & ۰.۶ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ۰.۲ & ۰.۶ & ۰.۳ \\ ۰ & ۰.۴ & ۰.۶ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ۰.۱ & ۰.۴ & ۰.۵ \\ ۰ & ۰.۳ & ۰.۷ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix}$

با توجه به احتمال رخدادها در جدول (۱) و سایر داده‌های ورودی در جدول (۲) قابلیت اطمینان سیستم، نرخ خرابی‌ها و هزینه‌های سیستم محاسبه می‌شود.

جدول داده‌های ورودی شامل هزینه‌های حداقلی، تعویض و خاموشی، پارامترهای توزیع ویبول و دوره بازرسی است.

جدول (۲): داده های ورودی

قطعات	Cmr	Crp	$Cdown$	β	η	γ	T	S
۱	۲	۱۵	۱۰	۱.۵	۱۰۰۰	۰.۱	۱۰۰	۰
۲	۲	۱۵	۱۰	۱.۵	۱۰۰۰	۰.۲	۱۰۰	

مدل:

$K=1;\ N=2;\ L=4;\ T=10\ ;\ S=0$

مدل پایه:

$$H_0(t)=\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \quad ;\ R_0(t)=\exp\left(-H_0(t)\right)$$

مدل نرخ دستکاری شده:

$$\delta_j=\delta(zl_j)=(zl_j)^{1.5}=\left(\frac{zl}{n-j}\right)^{1.5}$$

راه حل:

$$\alpha_j=(n-j).\delta_j=8*(n-j)^{-0.5}$$

در نتیجه:

$$y=H_0(t)=0.032$$
$$\alpha_1=5.6569\ ;\ \alpha_2=8$$

با توجه به مقادیر α_j و وضعیت اولیه قطعات در حالت s=0 قابلیت اطمینان سیستم به کمک معادله (۲۳) برابر است با:

$$R_y(0.032)=0.9804 \quad \rightarrow R(t=100)=0.9804$$

مقدار قابلیت اطمینان به دست‌آمده مورد قبول متخصصین این حوزه است.

در جدول (۳) نرخ خرابی‌ها و نتایج معادلات مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان با کمک نرم افزار متلب محاسبه شده است.

جدول (۳): خروجی داده های مرتبط با قابلیت اطمینان

قطعات	A	A	جمع
۱	۵.۶۵۶۹	۳.۴۱	۲.۸۵۴۹۷۱۱۵۳
۲	۸.۰۰۰۰	-۲.۴۱	-۱.۸۷۴۵۹۲۶۳۴
		R	۰.۹۸۰۳۷۸۵۱۹

در آخر مقدار تابع هدف و حد کنترل بهینه محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): مقدار حد کنترل بهینه و هزینه کل سیستم

قطعات	مقدار تابع هدف	D	R
۱-۲	۲۱۲.۷۱۲	۰.۲۱۴۴	۰.۹۸۰۴

نتایج نشان می‌دهد که حد کنترل بهینه معادل مقدار ۰.۲۱۴۴ است که اگر در نقاط بازرسی نرخ خرابی مدارهای الکتریکی از این مقدار تجاوز کند، سیستم متحمل اقدام به تعویض مؤلفه و هزینه‌های آن خواهد شد.

جهت بررسی کارآیی مدل پیشنهادی خروجی آن با خروجی مدل پایه در جدول (۵) مقایسه شده است، یعنی در حالتی که تقسیم بار و اثر تخریب قطعات بر روی یکدیگر در نظر گرفته نشده است. در مدل پایه از فرمول (۱) و تنها ماتریس احتمال انتقال P استفاده می‌شود و برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های با پیکربندی موازی و مستقل از فرمول (۳۵) استفاده شده است.

$$R(k\Delta,\phi_k,\Delta)=1-\prod_{i=1}^{i=l}\left(1-R_{ijk}(k\Delta,Z_{ijk},\Delta)\right) \qquad (۳۵)$$

نتیجه‌ها نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان نسبت به حالت پایه افزایش پیدا کرده و همچنین هزینه‌های کل سیستم نیز کاهش یافته است.

جدول (۵): مقدار حد کنترل بهینه و هزینه کل سیستم در حالت مدل پایه و بدون در نظر گرفتن تقسیم بار

قطعات	مقدار تابع هدف	D	R
۱،۲	۳۵۴.۱۳	۰.۱۳۷۶	۰.۹۵۳۶۷

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است در مدل پایه حد کنترل بهینه معادل مقدار ۰.۱۳۷۶ است و از حد کنترل مدل پیشنهادی کمتر است، زیرا در مدل ارائه شده خرابی‌های احتمالی پیش‌بینی شده است و مواجهه با تعویض قطعات کمتر خواهد بود. قابلیت اطمینان سیستم نیز معادل مقدار ۹۵ درصد و حدود ۳ درصد از مدل پیشنهادی کمتر است. هزینه‌های کل سیستم نیز حدودا معادل ۴۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین خروجی‌ها نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی کارا است و با قابلیت اطمینان بالاتری طراحی و مدل‌سازی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در شرکت‌های توزیع برق به منظور جلوگیری از خاموشی‌ها و اتفاقات متاثر از اتفاقات فنی و غیر فنی، نگهداری مبتنی بر شرایط از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از عمده‌ترین دلایل خاموشی‌ها و قطعی‌های شبکه‌های برق خرابی تجهیزات و تاثیر خرابی‌های قطعات بر روی یکدیگر است. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط برای یک سیستم مکانیکی چندجزئی چالش برانگیز است زیرا وابستگی متقابل تخریب اجزای سیستم به طور کامل درک نشده و فقدان مدل‌های فیزیکی در این حوزه وجود دارد. بیشتر ادبیات موجود معمولاً فرض می‌کنند که تخریب و عدم موفقیت اجزاء در یک سیستم مکانیکی مستقل است که این امر می‌تواند منجر به نتایج نادرست در تشخیص شود. به این منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی خرابی‌های تجهیزات مورد توجه قرار گرفته است و در این تحقیق به استراتژی نگهداری مبتنی بر شرایط و سیستم‌های موازی دارای همبستگی ساختاری[۱۵] پرداخته شده است. به دلیل پیچیدگی ذاتی این سیستم‌ها و مرور ادبیات محدود در زمینه وابستگی خرابی مابین مؤلفه‌ها و تعامل اجزاء، روش‌های موجود برای تجزیه و تحلیل آن‌ها نیز محدود است. به همین جهت از مدل مخاطره متناسب برای نشان دادن تاثیر مقادیر متغیرهای تشخیصی و از مدل اشتراک بار با نرخ خرابی دستکاری شده جهت محاسبه قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده است. با کمک نرخ شکست دستکاری شده تاثیر خرابی مابین اجزاء برای بالاتر بردن قابلیت اطمینان سیستم لحاظ شده است و از مدل پیشنهادی یک حد کنترل بهینه برای مؤلفه‌ها به دست می‌آید که از مقایسه آن با حد کنترل بهینه اقدامات پیش‌گیرانه انجام می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، در سیستم‌هایی که در آن‌ها اشتراک بار وجود دارد خرابی قطعه منجر به نرخ شکست بالاتر سایر قطعات می‌شود. در صورت تجاوز از حد کنترل، تمام اجزا باید تعویض شوند یا اگر بیشتر از آن نباشد، سیستم به کار خود ادامه خواهد داد. در طول بازه زمانی اگر تمام اجزاء خراب شود، همه آن‌ها باید با اجزای جدید جایگزین شوند. مزیت این نوع از برنامه‌ریزی این است که با در دسترس قرار گرفتن داده‌ها به طور موثر، تصمیم‌گیری‌های پویا اتخاذ می‌شود و از تصمیم‌گیری‌های بدون برنامه و ثابت در ابتدای برنامه تعمیر و نگهداری جلوگیری خواهد شد. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، مطالعه موردی بیان شد و با کمک نرم‌افزار متلب و حل مسئله، نتایج حاکی از آن است که هزینه‌های ناشی از سیستم کاهش یافت و قابلیت اطمینان سیستم نیز به طور قابل توجهی افزایش یافت. بنابراین این تحقیق امکان محاسبات کارآمد قابلیت اطمینان سیستم را فراهم کرده است و دستاوردهای آن کمک شایانی به افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع برق و تصمیم‌گیری به موقع در برابر خرابی‌های پیش‌رو خواهد داشت. در آخر برای مطالعات آتی می‌توان به بهینه‌سازی چینش سیستم‌های پیچیده‌تر نظیر سری-موازی و یا برای ساختارهای دیگر مانند حالت آماده به کار سرد در نظر گرفت. همچنین می‌توان اجزاء سیستم را با وابستگی اقتصادی[۱۶] در نظر گرفت و مدل‌هایی با ترکیب رویکردهای فرصت‌طلبانه، نگهداری مبتنی بر شرایط و نگهداری مبتنی بر زمان طراحی کرد و در عین حال مباحث اقتصادی سیستم‌ها و ساختارهای مختلف آن‌ها را نیز در نظر گرفت.

مراجع

Arabzadeh Jamali, M., & Pham, H. (2022). Opportunistic maintenance model for load sharing k-out-of-n systems with perfect PM and minimal repairs. *Quality Engineering*, *34*(2), 205-214.

Asadzadeh, S., Aghaie, A., Shahriari, H., & Niaki, S. T. A. (2014). The application of proportional hazards and frailty models to multistage processes surveillance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *74*, 461-470.

Banjevic, D., Jardine, A. K. S., Makis, V., & Ennis, M. (2001). A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, *39*(1), 32-50.

Ghasemi, A., Yacout, S., & Ouali, M. S. (2007). Optimal condition-based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model. *International journal of production research*, *45*(4), 989-1012.

Golmakani, H. R., & Fattahipour, F. (2011). Age-based inspection scheme for condition-based maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *17*(1), 93-110.

Golmakani, H. R., & Moakedi, H. (2012). Optimal non-periodic inspection scheme for a multi-component repairable system using A∗ search algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *63*(4), 1038-1047.

Jardine, A. K. S., Joseph, T., & Banjevic, D. (1999). Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *5*(3), 192-202.

Keizer, M. C. O., Teunter, R. H., Veldman, J., & Babai, M. Z. (2018). Condition-based maintenance for systems with economic dependence and load sharing. *International Journal of Production Economics*, *195*, 319-327.

Keizer, M. C. O., Teunter, R. H., & Veldman, J. (2017). Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research*, *257*(1), 209-222.

Lawless, J. F. (2011). *Statistical models and methods for lifetime data*. John Wiley & Sons.

Makis, V., & Jardine, A. K. (1992). Optimal replacement in the proportional hazards model. *INFOR: Information Systems and*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]

Operational Research, *30*(1), 172-183.

Pozsgai, P., Neher, W., & Bertsche, B. (2003, January). Models to consider load-sharing in reliability calculation and simulation of systems consisting of mechanical components. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003.* (pp. 493-499). IEEE.

Rykov, V., Ivanova, N., & Kochetkova, I. (2022). Reliability Analysis of a Load-Sharing k-out-of-n System Due to Its Components' Failure. *Mathematics*, *10*(14), 2457.

Smidt-Destombes, K. S. D., van der Heijden, M. C., & van Harten, A. (2004). On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition-based maintenance strategy. *Reliability engineering & System safety*, *83*(3), 287-300.

Van der Weide, J. A., Pandey, M. D., & van Noortwijk, J. M. (2010). Discounted cost model for condition-based maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, *95*(3), 236-246.

Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2013). A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability engineering & system safety*, *120*, 39-50.

Wang, X., Zhao, X., Wu, C., & Wang, S. (2022). Mixed shock model for multi-state weighted k-out-of-n: F systems with degraded resistance against shocks. *Reliability Engineering & System Safety*, *217*, 108098.

Yahyatabar, A., & Najafi, A. A. (2018). A multi-stage stochastic programming for condition-based maintenance with proportional hazards model. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, *12*(1), 18-38.

Yahyatabar, A., & Najafi, A. A. (2018). Condition based maintenance policy for series-parallel systems through Proportional Hazards Model: A multi-stage stochastic programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, *126*, 30-46.

Zhang, N., Fouladirad, M., Barros, A., & Zhang, J. (2020). Condition-based maintenance for a K-out-of-N deteriorating system under periodic inspection with failure dependence. *European Journal of Operational Research*, *287*(1), 159-167.

Zhang, N., & Si, W. (2020). Deep reinforcement learning for condition-based maintenance planning of multi-component systems under dependent competing risks. *Reliability Engineering & System Safety*, *203*, 107094.

Zhang, Z., Wu, S., Lee, S., & Ni, J. (2014). Modified iterative aggregation procedure for maintenance optimisation of multi-component systems with failure interaction. *International Journal of Systems Science*, *45*(12), 2480-2489.

Zhang, Z., Wu, S., Li, B., & Lee, S. (2015). (n, N) type maintenance policy for multi-component systems with failure interactions. *International Journal of Systems Science*, *46*(6), 1051-1064.

اســـدزاده، ش، (۱۳۹۸)، مدلســـازی و پیش‌بینی بهینه نرخ خرابی تجهیزات شبکه توزیع برق، *کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، ۸ (۱)، صص ۶۱-۵۳.

زیرنویس‌ها

[1] Tampered Failure Rate Model
[2] Load Sharing
[3] Failure Dependency
[4] Replacement
[5] Proportional Hazard
[6] Covariate
[7] Condition-Based Maintenance
[8] Weibull distribution
[9] Predictive Maintenance
[10] Multi-Component Systems
[11] K out of n
[12] COX
[13] Optimal Control Limit
[14] Maximum Likelihood Estimation
[15] Structural Dependency
[16] Economic Dependency

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-05]