



Reliability optimization of freight locomotive turbochargers via weibull analysis and maintenance modeling

Mohsen Masoudifar¹, Seyed Alireza Sharifi², Mohammad Ali Ehteram^{3*}

1- Zist Pak Gostar Nafis Company, Tehran, Iran

2- Rahahan Keshesh Company, Tehran, Iran

3- Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Turbocharger Reliability
Weibull Analysis
Monte Carlo Simulation
Preventive Maintenance

ABSTRACT

This study evaluates the reliability of freight locomotive turbochargers using Weibull distribution analysis. We analyzed a dataset comprising 516 operational records from 132 units collected between 2016 and 2023. Following rigorous data cleaning, we determined the characteristic life of the turbochargers and developed reliability models stratified by manufacturer type and maintenance personnel. Our findings indicate that turbochargers from Manufacturer D—which operate at lower rotational speeds—exhibit superior mean time to failure (MTTF) and reliability compared to Type A units, which demonstrate a marked propensity for infant mortality failure. To refine maintenance strategies, we developed a life-cycle model utilizing Monte Carlo simulation, parameterized by empirical probability distributions of failure times, repairs, and preventive maintenance (PM) intervals. By iterating the Maximum Permitted Repair Time (MPRT) parameter, we evaluated the sensitivity of fleet operational availability and downtime. These results provide a robust quantitative framework for designing optimal maintenance policies that maximize fleet availability while minimizing operational costs.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: m_ehteram@sbu.ac.ir (MA. Ehteram)

Received 25 November 2025; Accepted 7 July 2026

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Masoudifar M, Sharifi SA, Ehteram MA. Reliability optimization of freight locomotive turbochargers via weibull analysis and maintenance modeling. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):81-96. doi: [10.22034/ER.2026.2076541.1114](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2076541.1114)

بررسی قابلیت اطمینان پرخوران‌های لوکوموتیوهای باری با استفاده از تحلیل ویبول به منظور بهینه‌سازی شیوه تعمیرات

محسن مسعودی‌فر^۱، سید علیرضا شریفی^۲، محمدعلی احترام^{۳*}

۱- شرکت زیست پاک گستر نفیس، تهران، ایران

۲- شرکت راه آهن کشش، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، قابلیت اطمینان پرخوران‌های نصب‌شده بر روی لوکوموتیوهای باری با استفاده از توزیع ویبول مورد بررسی قرار گرفته‌است. داده‌های آماری شامل ۵۱۶ مورد از ۱۳۲ پرخوران در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ تحلیل شده‌اند. ابتدا با پالایش داده‌ها، عمر مفید پرخوران‌ها استخراج و سپس الگوهای قابلیت اطمینان برحسب دو نوع پرخوران و تعمیرکار تدوین گردید. نتایج نشان می‌دهد که پرخوران‌های با سازنده D که سرعت چرخش کمتری دارند، عمر متوسط و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به نوع A دارند و نرخ خرابی در مرحله شکست اولیه متمرکز است. به منظور بهینه‌سازی سیاست‌های نگهداشت، یک الگوی چرخه عمر بر پایه شبیه‌سازی مونت کارلو توسعه داده شد که در آن توزیع‌های احتمالاتی زمان خرابی، تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه با استفاده از داده‌های واقعی برآورد شده‌اند. سپس با تغییر متغیرهای تصمیم‌گیری حداکثر مدت انتظار برای جایگزینی پرخوران، میزان پرخوران‌های آماده به کار و مدت زمان عدم بهره‌برداری تحلیل شد. نتایج این الگو می‌تواند به طراحی سیاست‌های تعمیر و نگهداری بهینه در جهت افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها کمک شایانی نماید.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

قابلیت اطمینان پرخوران
تابع ویبول
شبیه‌سازی مونت کارلو
نگهداشت پیشگیرانه



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: m_ehteram@sbu.ac.ir (محمدعلی احترام)

دریافت ۴ آذر ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۶ تیر ۱۴۰۵

شاپای الکترونیکی: ۳۳۴۵-۴۱۲۱ / شاپای چاپی: ۱۷۳۵-۵۲۱۴

Cite this article: Masoudifar M, Sharifi SA, Ehteram MA. Reliability optimization of freight locomotive turbochargers via weibull analysis and maintenance modeling. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):81-96. doi: 10.22034/ER.2026.2076541.1114

۱- مقدمه

پرخوران‌ها اجزای محوری در موتورهای دیزل مدرن لکوموتیو هستند و نقشی ضروری در افزایش توان خروجی موتور، بهبود راندمان سوخت و کاهش آلاینده‌های مضر ایفا می‌کنند. پرخوران‌ها با وارد کردن توده هوای بیشتر و در نتیجه اکسیژن بیشتر به استوانه‌های موتور، احتراق کامل‌تر و پرانرژی‌تری را ممکن می‌سازند. این امر نه تنها گشتاور و عملکرد کلی موتور را افزایش می‌دهد، بلکه به کاهش تلفات پمپاژ در داخل موتور نیز کمک می‌کند. این اجزا به دلیل شرایط عملیاتی سخت شامل سرعت‌های چرخش بسیار بالا و قرار گرفتن در معرض دماهای بالا تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ذاتاً در برابر سایش سریع و خرابی زود هنگام بسیار آسیب‌پذیر هستند [۱]. خرابی پرخوران‌ها می‌تواند منجر به اختلالات عملیاتی قابل توجه، از جمله کاهش توان موتور، خاموشی کامل موتور، تأخیرات عملیاتی چشمگیر و زیان‌های مالی قابل توجهی شود [۲]. همچنین، فراتر از پیامدهای مالی مستقیم تعمیرات و زمان از دست رفته عملیاتی، نقص یا خرابی پرخوران خطرات ایمنی قابل توجهی را به همراه دارد که می‌تواند منجر به آسیب جدی به سایر تجهیزات مرتبط و تهدید پرسنل شود. همچنین با توجه به اینکه پرخوران‌ها به عنوان اجزای حیاتی که تحت شرایط شدید کار می‌کنند، قابلیت اطمینان فردی آن‌ها مستقیماً به قابلیت اطمینان کلی و پایداری اقتصادی کل شبکه ریلی منجر می‌شود [۳]. از این رو، بهینه‌سازی نگهداری پرخوران نه تنها یک وظیفه مهندسی است، بلکه یک الزام راهبردی است که زیربنای قابلیت‌های حمل‌ونقل ملی را تشکیل می‌دهد.

حالات خرابی رایج شناسایی شده در پرخوران‌های لکوموتیو از طریق مطالعات دقیق تحلیل حالات و اثرات خرابی (FMEA)^۱ شامل مسائل مکانیکی مانند شکست ناشی از خستگی در اجزای توربین، ترک‌های اولیه در چرخ‌های دمنده، نرسیدن روغن به محور یا سایر خرابی‌های روانکاری منجر به سایش و گریپاژ یا تاقان، آسیب ناشی از ورود جسم خارجی به حلقه نازل، شکست نگهدارنده به دلیل تنش حرارتی و ارتعاش بیش از حد منجر به سایش یا عدم تعادل است. نشتی روغن و تغییر شکل پلاستیک اجزا مانند پوشش تحت تنش حرارتی نیز می‌تواند منجر به خرابی شوند [۲]. برای پرداختن به این مسائل، روش‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)^۲ به کار گرفته شده که به راهبردهای نگهداری و تعمیرات بهینه‌سازی شده منجر شده است. به عنوان مثال، مطالعه‌ای بر روی لکوموتیو CC 203 نشان داد که اجرای وظایف دقیق‌تر مبتنی بر وضعیت (مانند بررسی‌های روتور، پایش ارتعاشات، اندازه‌گیری لقی‌ها) و وظایف بازایی برنامه‌ریزی شده برای پرخوران‌ها، همراه با فواصل نگهداری و تعمیرات تنظیم شده، قابلیت اطمینان کلی سامانه موتور دیزل را به طور قابل توجهی بهبود بخشید و هزینه‌های گزاف نگهداری و تعمیرات اصلاحی را علی‌رغم افزایش جزئی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده، کاهش داد [۴]. در حوزه نگهداری و تعمیرات موتور، رویکردهای نوین هوشمند مانند استفاده از تحلیل‌های صوتی و یادگیری عمیق برای تشخیص عیب اجزا توسعه یافته‌اند. با این حال، در مقیاس ناوگان، تحلیل‌های آماری قابلیت اطمینان همچنان ابزاری حیاتی برای مدیریت راهبردی قطعات و کاهش هزینه‌های چرخه عمر محسوب می‌شوند.

تحلیل قابلیت اطمینان مربوط به پرخوران‌های لکوموتیو شامل یک رویکرد ساختاری برای درک سازوکارهای خرابی آن‌ها، پیش‌بینی احتمال چنین خرابی‌هایی، شناسایی اجزایی که برای عملکرد پایدار حیاتی‌تر هستند و تدوین راهبردهایی برای کاهش این خرابی‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر عملیاتی پرخوران است. در حالی که پرخوران‌ها تحت شرایط سخت کاری دماهای بالا و سرعت‌های دورانی زیاد عمل می‌کنند و اغلب به عنوان نقاط خرابی بحرانی برجسته می‌شوند، شواهد نشان می‌دهد که اکثریت قابل توجهی از خرابی‌های آنها به دلیل نقص‌های ذاتی ساخت نیست، بلکه ناشی از مشکلات موجود در سامانه‌های جانبی موتور، مانند روانکاری و صافی هوا، یا ناشی از رویه‌های عملیاتی هستند [۵]. این نشان می‌دهد

¹ Failure Mode and Effects Analysis

² Reliability Centered Maintenance

که قابلیت اطمینان پرخوران تنها مسئله طراحی قطعه نیست، بلکه عمیقاً با سلامت کل ماهیت موتور و کیفیت نگهداری و تعمیرات و انضباط عملیاتی درهم تنیده است.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی، بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که شکاف قابل توجهی در پیوند دادن تحلیل‌های آماری خرابی با سیاست‌گذاری‌های کلان و عملیاتی نگهداری وجود دارد. درحالی‌که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر عیب‌یابی اجزا یا ارائه تحلیل‌های توصیفی از قابلیت اطمینان تمرکز داشته‌اند، فقدان یک الگوی یکپارچه که بتواند توزیع‌های احتمالاتی خرابی را مستقیماً به متغیرهای تصمیم‌گیری مدیریتی ملموس تبدیل کند، کاملاً مشهود است. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی است که خروجی‌های تحلیل آماری قابلیت اطمینان (با استفاده از توزیع ویبول بر روی پایگاه داده‌ای شامل ۵۱۶ مورد واقعی در مقیاس ناوگان) را به الگوی شبیه‌سازی مونت کارلو پیوند می‌دهد [۶]. این رویکرد نوآورانه امکان ارزیابی سناریو محور را فراهم می‌آورد تا بتوان میان شاخص‌های متضادی همچون حداکثر زمان مجاز انتظار برای تعمیر (MPRT)، میزان زمان از کار افتادگی (Downtime) لوکوموتیو و خواب سرمایه قطعات یدکی در انبار یک موازنه (Trade-off) دقیق و بهینه برقرار کرد [۷]. نتایج مورد انتظار این مطالعه راهنمایی‌های ملموس و مبتنی بر داده‌های واقعی را به منظور اصلاح راهبردهای نگهداری موجود ارائه می‌دهد که به بهبود در دسترس بودن ناوگان و کارایی اقتصادی عملیات ریلی منجر خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی احتمالاتی رفتار پرخوران‌ها

به منظور شبیه‌سازی احتمالاتی رفتار پرخوران‌ها در چرخه عمر عملیاتی آن‌ها، ابتدا نیاز است تا فرآیندهایی را که یک پرخوران در طول زمان، تجربه می‌کند به صورت جداگانه شبیه‌سازی شود. این فرآیندها در این پژوهش شامل زمان کارکرد بدون وقفه، مدت زمان مورد نیاز برای تعمیرات و مدت زمان انجام فرآیند تامین و نگهداری پیش‌گیرانه (PM) است. پس از شبیه‌سازی این فرآیندها به منظور بررسی رفتار چرخه عمر پرخوران‌ها، از تحلیل نمونه‌گیری مونت کارلو^۲ استفاده می‌شود [۶]. در این تحلیل براساس نتایج شبیه‌سازی فرآیندها نمونه‌هایی از چرخه عمر پرخوران‌ها شبیه‌سازی می‌شود. در انتها نیز با میانگین‌گیری از این نمونه‌ها رفتار کلی پرخوران‌ها شبیه‌سازی می‌گردد.

برای شبیه‌سازی زمان‌های خرابی و تحلیل قابلیت اطمینان پرخوران‌ها، ابتدا می‌بایست توزیع احتمالاتی مناسبی بر داده‌های عمر آن‌ها منطبق گردد. در این تحقیق، توزیع ویبل به واسطه سازگاری بالای آن با مجموعه داده‌های عمر انتخاب شده است. یکی از مزایای کلیدی توزیع وایبول، انعطاف‌پذیری آن در شبیه‌سازی نرخ خرابی^۳ است. این ویژگی به توزیع وایبول اجازه می‌دهد تا منحنی وان حمام (شکل ۱) که در ادامه معرفی می‌شود، را به خوبی توصیف نماید. علاوه بر این، توزیع وایبول برای توصیف عمر سامانه‌های مرکبی که خرابی آن‌ها توسط ضعیف‌ترین جزء کنترل می‌شود تحت عنوان مبنای تئوری مستحکمی دارد. این ویژگی‌ها، آن را به گزینه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی عمر پرخوران، به عنوان یک سامانه متشکل از اجزای متعدد، بدل می‌سازد. تابع چگالی احتمال برای توزیع ویبول به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۸]:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

همچنین، نرخ خرابی ویبول به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \eta, \beta > 0, t > 0 \quad (2)$$

¹ Preventive Maintenance

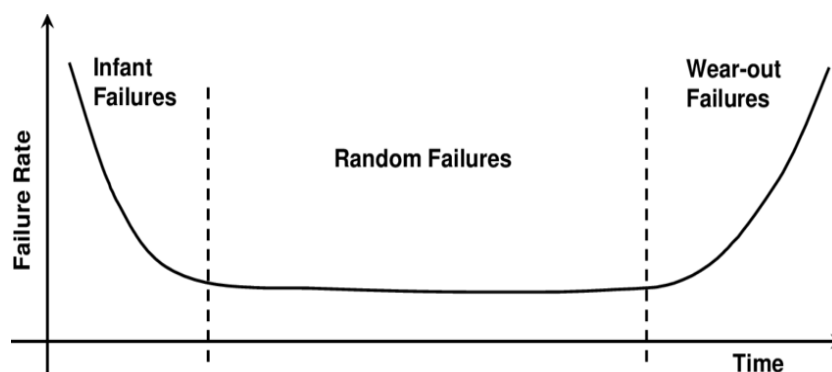
² Monte Carlo Sampling

³ Hazard Rate

متغیرهای η و β در توزیع ویبول، به ترتیب متغیرهای اندازه و شکل، نامیده می‌شوند. متغیر اندازه، گستردگی توزیع را روی محور زمان و متغیر شکل، شکل نمودار توزیع را تعیین می‌کنند. اگر متغیر شکل $0 < \beta < 1$ باشد، توزیع ویبول به صورت توزیعی با نرخ خرابی کاهشی در خواهد آمد که می‌توان آن را برای توصیف ناحیه‌ی خرابی زودرس از منحنی وان حمام استفاده کرد. برای $\beta = 1$ توزیع ویبول به شکل توزیع نمایی در می‌آید و اگر $\beta > 1$ باشد، توزیع ویبول را می‌توان برای الگو کردن ناحیه فرسودگی منحنی وان حمام به کار برد، چرا که نرخ خرابی افزایشی می‌شود. الگوی قابلیت اطمینان توزیع ویبول به صورت رابطه زیر است:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

به صورت رایج منحنی خرابی سامانه‌ها به صورت منحنی وان حمام مانند شکل ۱ به سه دوره شکست اولیه^۱، عمر مفید^۲، فرسودگی^۳ تقسیم می‌شوند. در دوره شکست اولیه، نرخ خرابی نسبتاً بالاست و به مرور زمان کاهش می‌یابد. این مرحله نشان‌دهنده مشکلات تولید یا نصب اولیه است که به مرور زمان با شناسایی و رفع اشکالات کاهش می‌یابد. در دوره عمر مفید، نرخ خرابی نسبتاً ثابت و پایین است. این دوره نشان‌دهنده زمانی است که سامانه یا مؤلفه به صورت پایدار و قابل اعتماد عمل می‌کند. همچنین در دوره فرسودگی، نرخ خرابی مجدداً افزایش می‌یابد. این مرحله نشان‌دهنده سایش و فرسودگی طبیعی سامانه یا مؤلفه است که منجر به افزایش خرابی‌ها می‌شود. با مقایسه این نمودار و نمودار نرخ خرابی پرخوران‌ها می‌توان بررسی نمود که این پرخوران‌ها در چه مرحله‌ای بیشتر آسیب‌پذیر هستند و دلایل خرابی آن‌ها بیشتر چیست.



شکل ۱ نمودار وان حمام نرخ خرابی رایج [۹]

از این توزیع به دلیل قابلیت‌های مطرح‌شده، علاوه بر شبیه‌سازی عمر پرخوران، برای شبیه‌سازی مدت زمان تعمیر و مدت زمان انجام فرآیند نگهداری پیش‌گیرانه نیز استفاده می‌شود. به منظور بدست آوردن متغیرهای η و β سازگار با داده‌های واقعی در توزیع ویبول، تابع درست‌نمایی داده‌ها را با استفاده از روش‌های عددی حداکثر می‌گردد. این روش تضمین می‌کند تا مقادیر η و β به‌گونه‌ای برآورد شوند که توزیع ویبول بیشترین انطباق را با مشاهدات واقعی داشته باشد. پس از شبیه‌سازی انفرادی فرآیندهایی را که یک پرخوران در طول زمان تجربه می‌کند، برای شبیه‌سازی چرخه عمر عملکردی پرخوران‌ها از شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان یک روش محاسباتی قدرتمند که مبتنی بر اصول نمونه‌برداری تصادفی است، استفاده می‌شود. این روش بویژه برای تحلیل مسائل پیچیده و شبیه‌سازی سامانه‌های احتمالی که راه‌حل‌های تحلیلی مستقیم برای آن‌ها غیرممکن یا بسیار پیچیده است، مناسب است [۷]. به منظور شفاف‌سازی کامل ساختار محاسباتی

¹ Infant Mortality Period

² Useful Life Period

³ Wear-out Period

این پژوهش و چگونگی تلفیق توزیع‌های احتمالاتی خرابی و تعمیر با متغیرهای تصمیم‌گیری، شبیه‌سازی و نمونه‌گیری توسعه داده شده در قالب شبه برنامه^۱ در جدول ۱ نشان داده شده است. این شبه کد نشان‌دهنده منطق اصلی روش توسعه یافته برای استخراج چرخه‌های عمر عملیاتی لوکوموتیوها است.

جدول ۱ روند اجرایی شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدیریت چرخه عمر پرخوران

گام	عملیات / منطق اجرایی
۱	تنظیم $N \leftarrow 500$ (تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی)
۲	تنظیم $T_{max} \leftarrow$ افق زمانی شبیه‌سازی (مثلاً ۳ سال)
۳	تعریف متغیرهای تصمیم: $MPRT$ (زمان انتظار تعمیر) و PM (بازه زمانی نگهداری پیشگیرانه)
۴	مقداردهی اولیه شاخص‌ها: $Total_Downtime \leftarrow 0$ و $Total_Standby \leftarrow 0$
۵	$f_{TTF} \sim Weibull(\beta_{TTF}, \eta_{TTF})$ (زمان کارکرد تا خرابی)
۶	$f_{TTR} \sim Weibull(\beta_{TTR}, \eta_{TTR})$ (زمان مورد نیاز برای تعمیر)
۷	$f_{PM} \sim Weibull(\beta_{PM}, \eta_{PM})$ (زمان مورد نیاز برای فرآیند PM)
۸	برای $i = 1$ تا N انجام بده:
۹	تنظیم $T \leftarrow 0$ (زمان فعلی چرخه)
۱۰	تا زمانی که $T < T_{max}$ انجام بده:
۱۱	نمونه‌گیری TTF از توزیع f_{TTF}
۱۲	اگر $TTF < PM$ آنگاه: (وقوع خرابی پیش از موعد سرویس)
۱۳	نمونه‌گیری TTR از توزیع f_{TTR}
۱۴	اگر $TTR \leq MPRT$ آنگاه: (پایان تعمیر در بازه زمان مجاز انتظار)
۱۵	$T \leftarrow T + TTF + TTR$
۱۶	$Downtime \leftarrow Downtime + TTR$
۱۷	در غیر این صورت: (تجاوز از زمان انتظار مجاز و تعویض با توربوشاژر جایگزین)
۱۸	$Standby_Count \leftarrow Standby_Count + 1$
۱۹	$T \leftarrow T + TTF$ (ورود توربوشاژر جایگزین از انبار به مدار)
۲۰	نکته: واحد خراب پس از گذشت زمان TTR به موجودی آماده‌به‌کار انبار بازمی‌گردد.
۲۱	در غیر این صورت: (رسیدن به موعد نگهداری پیشگیرانه بدون خرابی)
۲۲	نمونه‌گیری T_{PM} از توزیع f_{PM}
۲۳	$T \leftarrow T + PM + T_{PM}$
۲۴	$Downtime \leftarrow Downtime + T_{PM}$
۲۵	پایان حلقه شرطی
۲۶	پایان حلقه اصلی
۲۷	محاسبه میانگین نسبت توربوشاژرهای آماده‌به‌کار و زمان عدم کارکرد سالیانه (توقف).
۲۸	بازگرداندن خروجی‌ها جهت تحلیل سناریوها و بهینه‌سازی سیاست‌های نگهداری.

۲-۲-۲ دادگان^۲ و اطلاعات نوع موتورها

اطلاعات برداشت شده از پرخوران‌ها شامل ۵۱۶ مورد از سال ۱۳۹۵ تا اسفند سال ۱۴۰۲ است. این اطلاعات برای ۲۱ لوکوموتیو دیزلی DF8BI است. این لوکوموتیو، به عنوان قدرتمندترین لوکوموتیو باری دیزلی در ایران، نیروی کشش آرمانی برای افزایش سرعت حمل‌ونقل سنگین باری تک موتوره در خطوط اصلی به شمار می‌رود. این لوکوموتیو مجهز به موتور

¹ Pseudocode

² Dataset

دیزلی V280ZJA16، مبدل جریان متناوب اصلی سنکرون JF204D و موتور کششی ZD109C است. توان خدماتی حداکثر آن ۳۶۸۰ کیلووات و حداکثر سرعت آن در توان ثابت بیش از ۹۰ کیلومتر بر ساعت است. این موتور دارای ۱۶ استوانه V و دو پرخوران است که در دو سمت موتور قرار دارد (شکل ۲ و جدول ۲).



شکل ۲ تصویر موتور لوکوموتیو دیزلی DF8BI

جدول ۲ مشخصات موتور مورد مطالعه

متغیر کلیدی آکادمیک	واحد / آرایش	مقدار / مشخصات
تعداد و آرایش استوانه‌ها	–	16V - 50°
قطر استوانه	mm	280
پیمایش سمبه	mm	285
حجم جابه‌جایی هر استوانه	Liter	17.55
نسبت تراکم	–	12.8
سرعت نامی	r/min	1000
توان نامی	kW	3860 (تحت شرایط UIC)
بیشینه فشار احتراق	MPa	13.72
مصرف سوخت ویژه ترمزی	g/kW·h	205±3%

دادگان تحلیلی در این تحقیق برای دو نوع پرخوران مختلف A و D هستند که A با نشان ABB و شماره فنی VTC254 پرخوران پایه، با ۳۰،۰۰۰ دور در دقیقه و D پرخوران دالیان ZN310-LSA، بهبود یافته با دور نامی ۲۶،۰۰۰ دور در دقیقه است. در این دادگان، اطلاعات ۱۳۲ عدد پرخوران با شماره سریال منحصربه‌فرد وجود دارد که در این ۲۱ لوکوموتیو در طول بازه ۵ ساله ثبت شده‌اند. این پرخوران‌ها در بازه زمانی مشخصی خراب و قطعات داخلی آن‌ها به صورت مکرر تعویض شده و برخی از پرخوران‌ها در این دوره زمانی خراب شده و از رده خارج شده‌اند. در این دادگان همچنین تاریخ نصب و بازکردن و دلیل بازکردن شدن مشخص شده است که با استفاده از این دو می‌توان عمر یک پرخوران پیش از

خرابی و رفتن به تعمیرگاه را بدست آورد. لذا در ادامه هرگاه به عمر پرخوران اشاره می‌شود، منظور میزان یک دوره کارکرد یک پرخوران پیش از خرابی و تعمیر است و نه عمر کل یک پرخوران که می‌تواند شامل چندین بار تعمیر آن باشد. فراوانی این دلایل بازکردن شدن در جدول ۳ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که بیشترین دلیل بازکردن پرخوران‌ها، خراب شدن آن‌ها است و مابقی دلایل فراوانی کم‌تری دارند.

جدول ۳ فراوانی دلایل بازکردن پرخوران‌ها

تعداد	دلیل بازکردن
۳۴۷	خراب شدن
۱۱۵	جا به جای
۴۲	نگهداری پیش‌گیرانه
۱۲	اتمام عمر

به منظور بررسی قابلیت اطمینان پرخوران‌ها، این دادگان ابتدا پالایش می‌گردد و موردهایی که اطلاعات کاملی ندارند و یا اطلاعات آن‌ها نادرست است، به طور مثال زمانی که تاریخ بازکردن پیش از هم‌بندی است، حذف می‌گردد. سپس بر اساس زمان هم‌بندی و بازکردن شدن آن‌ها، مدت زمان کارکرد هر پرخوران قبل از خرابی مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که زمان‌های جابه‌جایی به زمان کارکرد پرخوران‌ها اضافه شده است. همچنین پرخوران‌ها، به منظور بررسی قابلیت اطمینان، آن‌ها را براساس نوع پرخوران، فصل خرابی، و شخص تعمیرکار جدا سازی شده است. علاوه بر این از آن‌جا که زمان تعمیر پرخوران‌ها پس از خراب شدن و نگهداری پیش‌گیرانه تاثیر زیادی در چرخه عمر پرخوران‌ها دارند. از این‌رو، توزیع‌های ویبولی به این داده‌های زمان‌ها برازش می‌شود. برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماری Weibull++ استفاده شده است. این نرم افزار این دادگان را به توزیع‌های مورد نظر برازش می‌کند و متغیرهای ویبول را بر اساس تابع درستی محاسبه می‌کند.

۳- نتایج و بحث

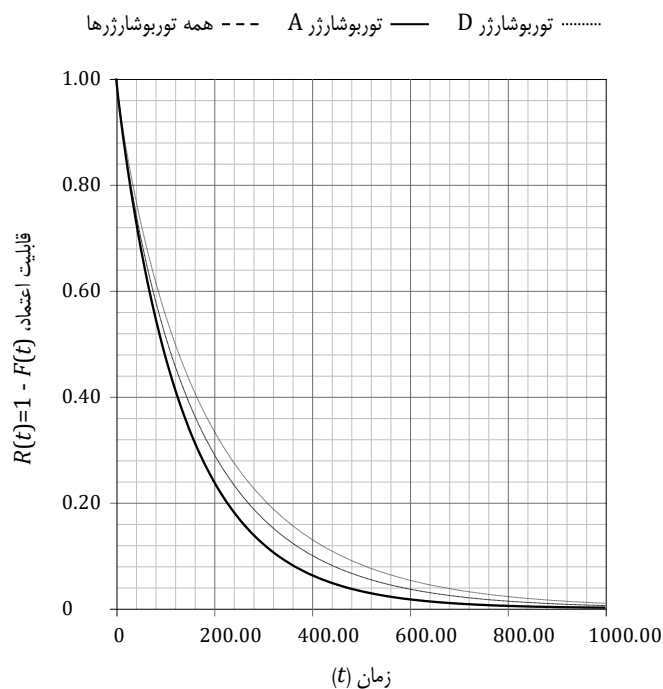
۳-۱- شبیه‌سازی عمر پرخوران‌ها و تحلیل قابلیت اطمینان آن‌ها

به منظور بدست آوردن قابلیت اطمینان یک منحنی ویبول دو متغیره، β و η ، به داده‌های عمر پرخوران‌ها برازش گردیده است. نتایج منحنی‌های ویبول برازش شده در جدول ۴ آورده شده است. همچنین در شکل ۳ قابلیت اطمینان این دو نوع به صورت مجزا و با یکدیگر نشان داده شده است. بر اساس این شکل نیز ملاحظه می‌گردد که قابلیت اطمینان توربو شارژهای D بیش از نوع دیگر و طبق انتظار قابلیت اطمینان تمامی توربو شارژها در بین این دو است. به طور مثال قابلیت اطمینان پرخوران‌های D در ۱۲۰ روز ۵۰٪ و قابلیت اطمینان پرخوران‌های A، ۴۱٪ و قابلیت اطمینان پرخوران‌ها بدون در نظر گرفتن نوع آن ۴۷٪ است.

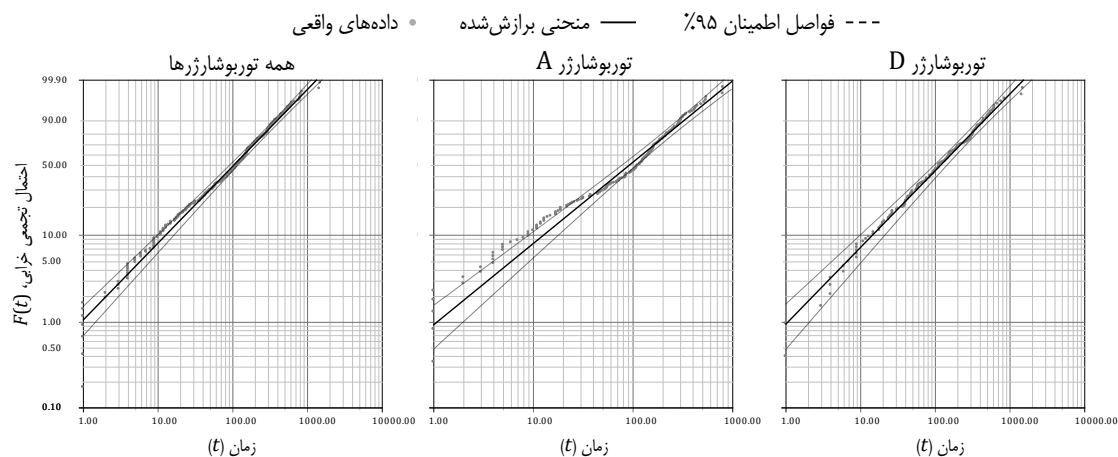
به منظور ارزیابی کیفی انتخاب توزیع ویبول برای توصیف رفتار داده‌های واقعی عمر پرخوران‌ها، از نمودار احتمال ویبول (شکل ۴) استفاده شد. در این نمودار، محورهای مقیاس‌گذاری شده‌اند که تابع توزیع تجمعی ویبول به صورت یک خط مستقیم ظاهر شود. مطابق شکل ۴، قرارگیری نزدیک و خطی داده‌های تجربی (نقاط) بر روی خط برازش شده و حضور اکثریت نقاط در داخل فواصل اطمینان ۹۵٪، نشان‌دهنده سازگاری آماری بالا و نیکویی برازش توزیع ویبول بر داده‌های عمر است. این تطابق بصری، پیش‌فرض استفاده از الگوی ویبول برای تحلیل‌های بعدی را به دقت تأیید می‌کند.

جدول ۴ مشخصات توزیع ویبول قابلیت اعتماد پرخوران‌های مختلف

ID Name	Count	β	η
A	202	0.952	137.415
D	174	0.899	181.218
All	376	0.900	158.603



شکل ۳ مقایسه قابلیت اطمینان پرخوران‌های نوع A و D (واحد زمان روز است)



شکل ۴ نمودار احتمال ویبول و نقاط واقعی عمر پرخوران‌ها به همراه فواصل اطمینان دوطرفه ۹۵٪

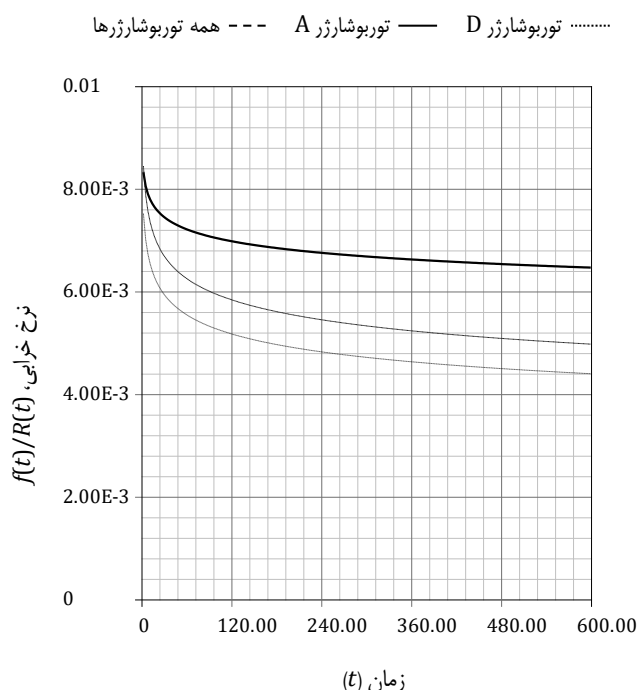
علاوه بر این به منظور ارزیابی کمی و تأیید صحت انتخاب توزیع ویبول، آزمون نیکویی برازش^۱ کلموگروف-اسمیرنوف بر روی داده‌های عمر پرخوران‌ها انجام شد. در این آزمون، یک مقدار عددی به نام آماره^۲ محاسبه می‌شود که میزان

¹ Goodness-of-Fit

² Statistic

اختلاف یا عدم تطابق بین توزیع داده‌های واقعی و توزیع نظری ویبول را نشان می‌دهد؛ هرچه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر برازش بهتر الگو بر داده‌ها است. نتیجه این آزمون برای توزیع ویبول، آماره‌ای برابر با ۰.۰۹۷ را نشان می‌دهد. علاوه بر این، همان‌طور که مطرح شد، انتخاب توزیع ویبول دارای تفسیر فیزیکی و مهندسی روشنی در حوزه تحلیل قابلیت اطمینان و سازوکارهای خرابی هستند که برای استخراج نتایج عملی ضروری است. دوم، نتیجه آزمون مؤید آن است که توزیع ویبول برازش آماری قابل قبول و معتبری را برای داده‌های مورد تحلیل فراهم می‌کند. لذا، با اولویت دادن به قابلیت تفسیر مهندسی در کنار برازش آماری مناسب، این توزیع به عنوان الگوی نهایی انتخاب گردید.

همچنین نرخ خرابی نیز برای این دو نوع پرخوران در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت نیز نرخ خرابی D کمتر از A است. نکته قابل توجه دیگر این نمودار رفتار نرخ خرابی هر دو نوع در زمان است، با توجه به نمودار نرخ خرابی رایج می‌توان گفت که خرابی‌ها در دوره شکست اولیه رخ داده‌اند. این رفتار می‌تواند به دلیل مشکلات تولید یا نصب اولیه پرخوران‌ها باشد. همچنین براساس متغیر β منحنی‌های ویبول که در زیر شکل مشخص شده، می‌توان گفت که نرخ خرابی کاهشی است و خرابی‌ها در مرحله شکست اولیه رخ می‌دهند.



شکل ۵ نرخ خرابی پرخوران‌های D و A در روزهای مختلف

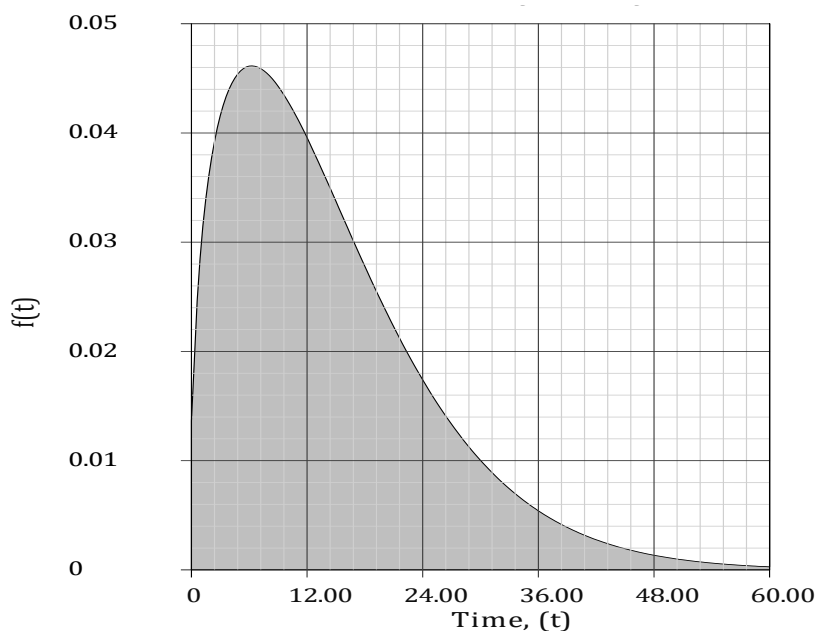
۳-۲- توزیع مدت زمان فرآیند تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه

به منظور استخراج توزیع زمان کارکرد و نگهداری پیش‌گیرانه مانند تابع قابلیت اطمینان عمرهای پرخوران‌ها که به یک نمودار ویبول منطبق شد، در این‌جا نیز به دلیل انطباق مناسب دادگان به این توزیع، از توزیع ویبول استفاده شده است. زمان تعمیر پرخوران‌های خراب مانند خرابی به عوامل زیادی مانند نوع خرابی، قطعه خراب‌شده، وجود یا عدم وجود قطعات خراب‌شده، تعمیرکار و ... بستگی دارد. از آن‌جاکه این اطلاعات به طور کامل در دسترس یا در صورت در دسترس بودن تعداد کافی از آن‌ها موجود نیست تا بتوان این مدت زمان را الگو کرد، لذا در این تحلیل تنها زمان تعمیر براساس تعمیرکار جدا شده است. این موضوع از آن جهت مهم است که در مواردی که قابلیت انتخاب میان تعمیرکاران وجود دارد، می‌توان تعمیرات را به تعمیرکار با زمان کمتر سپرد. بر اساس دادگان، زمان تعمیر از زمان خراب‌شدن یک پرخوران تا زمان هم‌بندی

دوباره آن در نظر گرفته شده است. این نکته حائز اهمیت است که داده‌های پرت در این زمان‌ها به دلیل احتمال وجود خطا ناشی از عدم نصب یک پرخوران پس از تعمیر یا طولانی شدن زمان تعمیر به دلیل نبود قطعه، حذف گردیده است. در این دادگان سه تعمیرکار BE، ES و NV موجود است که تعداد هریک از دادگان آن‌ها و متغیرهای توزیع ویبول برازش شده برای مدت زمان تعمیر در جدول ۵ آمده است. علاوه بر این، به منظور شبیه‌سازی مدت زمان‌های فرآیند نگهداری پیش‌گیرانه پرخوران‌ها، ابتدا این مدت زمان‌ها از دادگان استخراج می‌گردد و سپس با استفاده از برازش کردن منحنی ویبول الگوی احتمالاتی این مدت زمان‌ها ساخته می‌شود. این توزیع در شکل ۶ نشان داده شده است. با نمونه‌برداری از این توزیع می‌توان مدت زمان‌های این فرآیند را مشخص نمود.

جدول ۵ مشخصات توزیع ویبول مدت زمان تعمیر برای تعمیرکاران مختلف

ID Name	Count	β	η
BE	48	0.91	56.43
ES	24	0.80	28.78
NV	138	0.90	52.84
Total	210	0.90	52.17



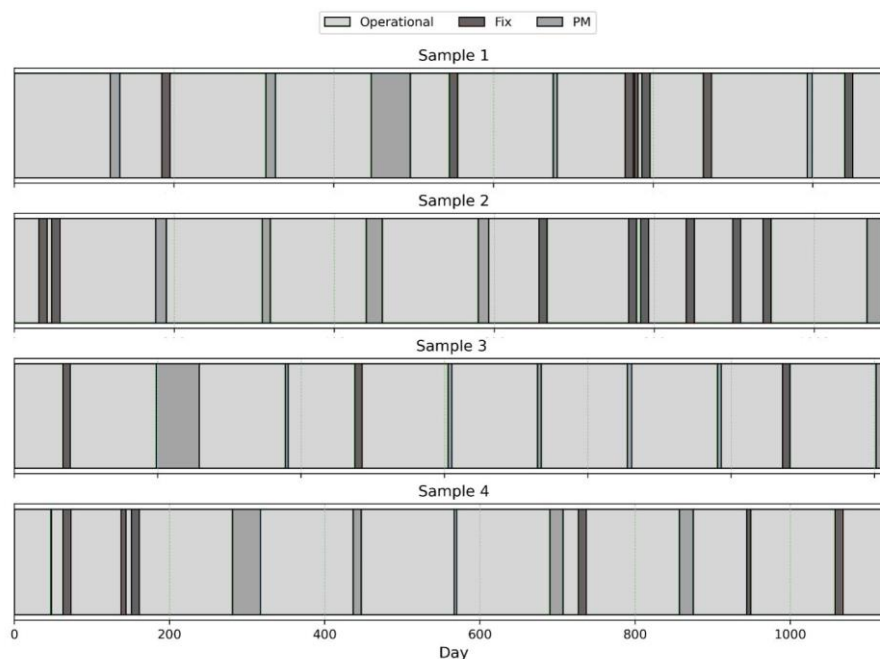
$$\beta=1.3807, \eta=15.9219, \rho=0.9905$$

شکل ۶ توزیع مدت زمان فرآیند نگهداری پیش‌گیرانه بر حسب روز

۳-۳- بررسی متغیرهای تصمیم‌گیری با شبیه‌سازی چرخه عمر و روش نمونه‌گیری

همان‌طور که منطق محاسباتی آن در جدول ۱ تشریح گردید، در این پژوهش در شبیه‌سازی چرخه عمر پرخوران‌ها از دو متغیر تصمیم‌گیری، زمان ارسال به نگهداری پیش‌گیرانه (PM) و حداکثر زمان انتظار برای تعمیر^۱ پرخوران خراب (MPRT) در نظر گرفته شده است. با نمونه‌گیری از توزیع‌های بدست آمده و براساس این متغیرهای تصمیم‌گیری، نمونه‌های مختلف از رفتار یک پرخوران در طول عمر خود ساخته می‌شود که تعدادی از این نمونه چرخه‌های عمر در شکل ۷ نشان داده شده است.

¹ Maximum Permitted Repair Time



شکل ۷ نمونه‌ای از sample های تولید شده با $MPRT=10$ و $PM=120$

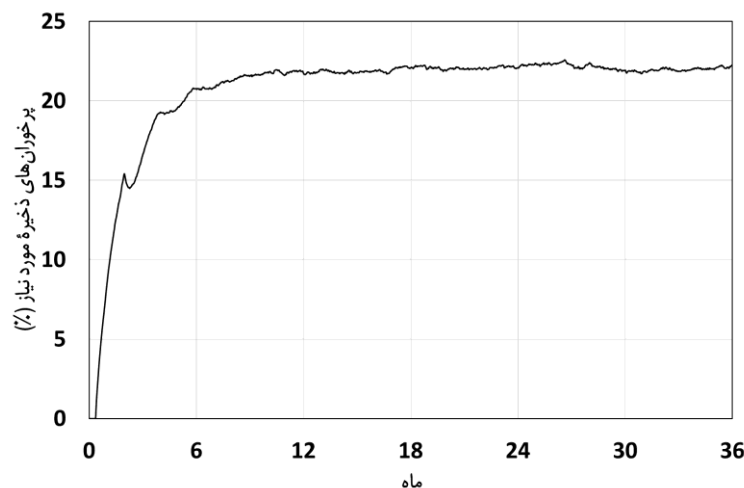
ابتدا با نمونه‌گیری از توزیع زمان کارکرد، عمر پرخوران^۱ (TTF) بدست می‌آید که در این شکل‌ها با نوارهای سبز رنگ نشان داده شده‌است. در این دوره زمانی پرخوران در حال کار است و هنوز خراب نشده‌است. در صورتی که این دوره زمانی از مدت زمان PM کم‌تر باشد یعنی خرابی رخ داده و طول مدت تعمیر آن با نوار قرمز رنگ نشان داده شده‌است. طول مدت تعمیر^۲ (TTR) با توجه به نمونه‌گیری از زمان تعمیر و با در نظرگیری زمان صبر تا جایگزینی پرخوران مشخص می‌شود. حال در صورتی که عمر پرخوران تا خراب شدن بیش از مقدار PM در نظر گرفته شده باشد، پرخوران برای نگهداری پیش‌گیرانه می‌رود که با نوار آبی رنگ نشان داده شده‌است. این زمان (T_{PM}) با نمونه‌گیری از توزیع نگهداری پیش‌گیرانه بدست آمده‌است. به طور مثال در شکل ۷ چهار نمونه از رفتار پرخوران در حدود سه سال عمر آن با در نظر گرفتن $MPRT = 10$ و $PM = 120$ شبیه‌سازی شده‌است.

زمان انتظار تا جایگزینی پرخوران به این معنا است که تصمیم‌گیر چه مدت صبر می‌کند تا یک پرخوران تعمیر شود و در صورتی که از این زمان فراتر رفت آن را با پرخوران سالم جایگزین می‌کند و در این زمان تعمیر، لوکوموتیو کارکردی نخواهد داشت. به طور نمونه در این شکل زمانی که یک پرخوران خراب می‌شود تا ۱۰ روز صبر کرده و در صورتی که تعمیر نشد یک پرخوران سالم از انبار جایگزین شده‌است. این نکته حائز اهمیت است که پس از جایگزینی، پرخوران خراب از دور خارج نمی‌شود، بلکه پس از تمام شدن زمان تعمیرش به پرخوران‌های آماده به کار در انبار اضافه می‌شود تا اگر پرخوران دیگری نیاز به جایگزینی داشت جایگزین شود.

با استفاده از این الگو می‌توان به بررسی میانگین تعداد پرخوران‌های مورد نیاز نسبت به تعداد پرخوران‌های در حال کار با توجه به متغیرها تصمیم‌گیری پرداخت. تعداد پرخوران‌ها مورد نیاز، تعداد پرخوران‌هایی است که باید آماده به کار باشند تا بهره‌برداری متوقف نشود و ظرفیت حمل و نقل کاهش نیابد. در ادامه نسبت این تعداد به تعداد کل پرخوران‌ها نسبت پرخوران آماده‌به‌کار نامیده می‌شود. برای نمونه در شکل ۸ درصد پرخوران‌های آماده به کار در طول سه سال نشان داده شده‌است. این نمودار با فرض $MPRT = 10$ و $PM = 50$ با استفاده از ۵۰۰ نمونه بدست آمده‌است.

¹ Time To Failure

² Time To Repair



شکل ۸ درصد پرخوران‌های آماده به کار در طول سه سال با در نظرگیری $MPRT=10$ و $PM=50$

در این شکل مشاهده می‌شود که در ابتدا تحلیل تعداد پرخوران‌های اضافی مورد نیاز با گذشت زمان افزایش یافته و پس از مدتی پایدار می‌شود. دلیل این موضوع آن است که در ابتدا تحلیل تمامی پرخوران‌ها با یکدیگر شروع به کار می‌کنند و پس از خرابی یا تعمیر یا جایگزین می‌شوند و مدتی طول می‌کشد تا پرخوران‌های جایگزین شده تعمیر شوند و آماده به کار باشند تا در صورت خرابی و طولانی شدن پروسه تعمیر جایگزین پرخوران خراب شوند. با جلو رفتن تحلیل میزان بازگشت پرخوران‌های خراب و خراب شدن پرخوران جدید به تعادل می‌رسد و منحنی پایدار می‌شود. از آنجا که این طرح رفتار دراز مدت مهم است، لذا برای بررسی متغیرهای تصمیم‌گیری مقدار پس از پایدار شدن شرایط مدنظر قرار می‌گیرد. به منظور بررسی تعداد پرخوران‌های آماده به کار براساس متغیر تصمیم‌گیری $MPRT$ و نوع پرخوران، تحلیل چرخه زمانی را با در نظرگیری دوره نگهداری پیش‌گیرانه برابر با ۹۰ روز و توزیع زمان تعمیر بدون در نظرگیری نوع تعمیرکار انجام می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش زمان انتظار درصد پرخوران‌های آماده به کار کاهش می‌یابد. همچنین، در صورت استفاده از پرخوران نوع D به درصد کم‌تری پرخوران آماده به کار نیاز است، به طور نمونه با در نظرگیری $MPRT = 10$ درصد پرخوران آماده به کار، در حالت کلی ۲۶.۳٪، استفاده از پرخوران A برابر ۲۹٪ و در پرخوران D برابر ۲۳.۵٪ است.

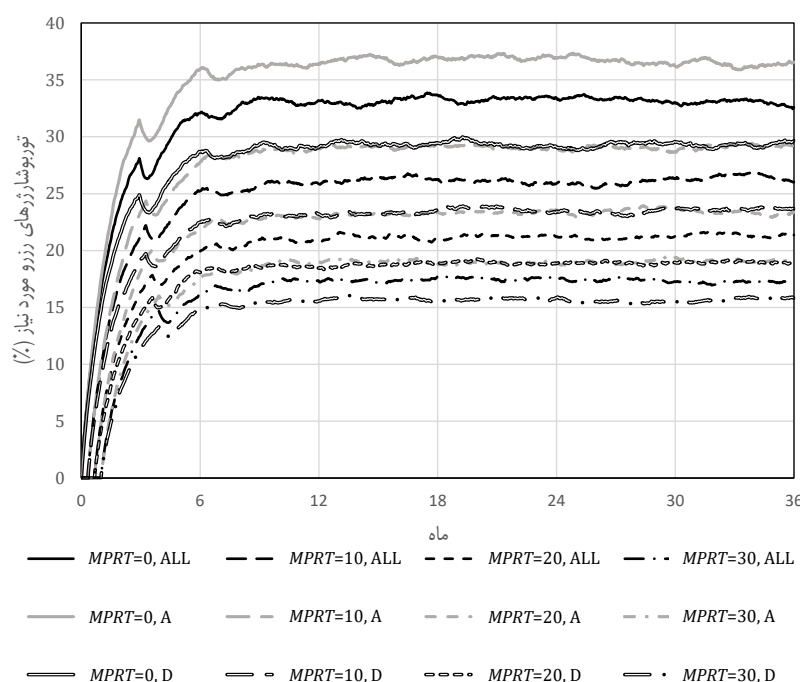
علاوه بر نسبت پرخوران‌های آماده به کار، بررسی میزان عدم کارکرد پرخوران‌ها در سال نیز حائز اهمیت است. عدم کارکرد به دلیل زمان تعمیر (حداکثر برابر $MPRT$ برای یکبار خرابی) و مدت زمانی که نیاز است تا فرایند نگهداری پیش‌گیرانه بر روی پرخوران انجام شود، است. نتایج این میزان عدم کارکردها برای حالت مطرح شده در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گردد که میزان عدم کارکرد در یک سال برای یک پرخوران با تغییر نوع پرخوران، تغییر زیادی نمی‌کند. این درحالی‌است که با افزایش زمان انتظار تعمیر این مقدار افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی اثر تعمیرکارها بر روی چرخه عمر پرخوران‌ها، تحلیل چرخه عمر برای تعمیرکارهای مختلف با در نظرگیری $PM=90$ ، نوع پرخوران به صورت کلی و $MPRT$ های مختلف صورت پذیرفت. درصد پرخوران آماده به کار در این تحلیل در جدول ۶ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب تعمیرکار بر روی میزان پرخوران آماده به کار اثر گذار است و می‌توان با کاهش زمان تعمیرات تعداد پرخوران‌های آماده به کار مورد نیاز را کاهش داد.

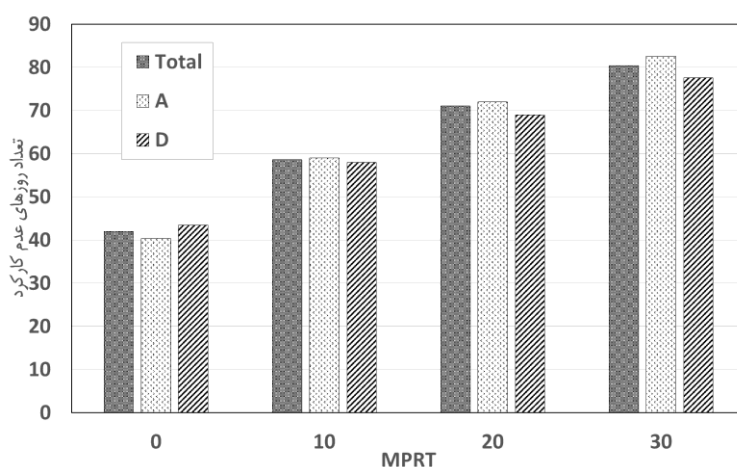
از دیدگاه کاربردی و مدیریتی، یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی در این بخش، یک ابزار تصمیم‌گیری دوطرفه^۱ را پیش روی برنامه‌ریزان این ناوگان ریلی قرار می‌دهد. از یک سو، کاهش شاخص $MPRT$ (برای مثال تنظیم آن روی ۱۰ روز به

¹ Trade-off

جای ۳۰ روز) مدت زمان عدم کارکرد و توقف لوکوموتیو در تعمیرگاه را به شدت کاهش می‌دهد (مطابق شکل ۱۰)، اما از سوی دیگر، این راهبرد تعویض سریع، نیاز به دیو و موجودی پرخوران‌های آماده‌به‌کار در انبار را افزایش داده و منجر به خواب سرمایه می‌شود (شکل ۹). راهکار عملیاتی استخراج‌شده از این الگو برای حل این چالش، تلفیق سیاست زمانی با مدیریت منابع و زنجیره تأمین است. ارجاع کار به تعمیرکاران خبره (مانند تیم ES با میانگین زمان تعمیرات پایین‌تر)، اثر منفی افزایش موجودی انبار را کاملاً خنثی می‌کند؛ به گونه‌ای که در یک سیاست تعویض یکسان ($MPRT=10$)، نیاز به قطعات جایگزین از ۲۳۶٪ به ۱۲۸٪ (حدود ۵۰٪ کاهش) تقلیل می‌یابد (جدول ۶). علاوه بر عامل منابع انسانی، انتخاب هوشمندانه نوع تجهیز نیز نقشی کلیدی در کنترل این هزینه‌ها دارد، به طوری که به‌کارگیری پرخوران‌های نوع D (به دلیل نرخ خرابی کمتر و طول عمر فراتر) می‌تواند نیاز به ذخیره قطعات جایگزین در انبار را حدود ۵٪ دیگر کاهش داده و بازدهی سرمایه را بهبود بخشد.



شکل ۹ پرخوران‌های آماده به کار در طول سه سال با در نظرگیری MPRT‌های متفاوت و $PM=90$



شکل ۱۰ مدت روز عدم کارکرد یک پرخوران در سال بر اساس MPRT‌های مختلف و نوع پرخوران و $PM=90$

جدول ۶ درصد پرخوران آماده به کار در MPRT های متفاوت برای تعمیرکاران مختلف

	MPRT			
	0	10	20	30
BE	29.1	23.2	19.2	15.6
ES	17.4	12.8	9.4	7.4
NV	29.5	23.6	19.3	16.0

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی جامع قابلیت اطمینان پرخوران‌های نصب شده بر روی لوکوموتیوهای باری با استفاده از تحلیل توزیع وایبول و شبیه سازی چرخه عمر با شبیه سازی مونت کارلو پرداخت. داده های آماری شامل ۵۱۶ مورد از ۱۳۲ پرخوران در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ تحلیل شدند تا بینش های عمیقی در مورد رفتار خرابی و راهبردهای بهینه نگهداری به دست آید.

نتایج کلیدی نشان داد که پرخوران های D به طور میانگین عمر مفید و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به نوع A دارند، که این امر می تواند در تصمیمات آتی خرید و مدیریت ناوگان مورد توجه قرار گیرد. تحلیل نرخ خرابی با استفاده از متغیر شکل توزیع وایبول (β) مشخص کرد که نرخ خرابی در مرحله شکست اولیه متمرکز است، که حاکی از وجود مشکلات احتمالی در فرآیندهای تولید یا نصب اولیه است. این یافته، ضرورت بهبود کنترل کیفیت در مراحل اولیه عمر پرخوران را برجسته می سازد. همچنین، پیشنهاد می گردد فرآیندهای مهار کیفیت در مبدأ (سازنده) و همچنین دستورالعمل های نصب و راه اندازی اولیه به دقت بازنگری شوند.

شبیه سازی چرخه عمر با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی سیاست های نگهداری فراهم آورد. نتایج این الگو نشان داد که افزایش حداکثر زمان انتظار برای جایگزینی (MPRT) این نیاز را کاهش می دهد. بهینه سازی متغیرهای تصمیم گیری، نیاز به یک تحلیل هزینه-فایده جامع را برای تعیین سیاست های بهینه نگهداری برجسته می سازد که هدف آن افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه های عملیاتی کلی است. به طور کلی، این پژوهش با ارائه یک چارچوب تحلیلی قوی و بینش های داده محور، به مدیران نگهداری لوکوموتیو کمک می کند تا تصمیمات آگاهانه تری در مورد انتخاب تجهیزات، برنامه ریزی نگهداری و تخصیص منابع اتخاذ کنند. این امر در نهایت منجر به بهبود عملکرد، کاهش هزینه ها و افزایش ایمنی عملیات حمل و نقل ریلی خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت راه آهن کشش بابت تهیه داده های مجتمع و علل خرابی پرخوران ها برای انجام این تحقیق تشکر می کنند.

References

- [1] Gautam A, Agarwal AK. Comparative evaluation of turbochargers for high horsepower diesel-electric locomotives. SAE Technical Paper; 2013 Apr 8. doi: 10.4271/2013-01-0930
- [2] Challen B, Baranescu R. Diesel engine reference book. 2nd ed. Butterworth-Heinemann; 1999.
- [3] Szkoda M, Kaczor G. Reliability and availability assessment of diesel locomotive using fault tree analysis. Archives of transport. 2016 Dec 31;40(4):65-75.
- [4] Arfiansyah O, Wiratmaja IG. DEVELOPMENT OF LOCOMOTIVE CC 203 MAINTENANCE STRATEGY USING RISK-BASED RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM 3) METHOD. Jurnal Rekayasa Mesin. 2024 Dec 15;15(3):1709-27. doi: 10.21776/jrm.v15i3.1882

- [5] Dellis P, Retzios E, Geralis A, Gasparakis E, Pesiridis A. Turbocharger Lubrication-Lubricant Behavior and Factors That Cause Turbocharger Failure/Turboşarj Yağlama-Yağlama Davranışı ve Turboşarj Arızasına Neden Olan Faktörler. International Journal of Automotive Engineering and Technologies. 2013 Apr 2;2(1):40-54.
- [6] Kroese DP, Taimre T, Botev ZI. Handbook of monte carlo methods. John Wiley & Sons; 2013 Jun 6.
- [7] Cheikh K, Boudi EM, Rabi R, Mokhliss H. Development and optimization of maintenance using the Monte Carlo method. International Journal of Industrial Engineering & Production Research. 2024 Mar 13;35(3):1-9. doi: [10.21203/rs.3.rs-4050006/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4050006/v1)
- [8] Crowder MJ. Statistical analysis of reliability data. Routledge; 2017 Nov 13.
- [9] Smith DJ. Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers. Butterworth-Heinemann; 2021 Dec 4.