



Evaluation of reliability of diesel engine crankshaft by accelerated test method

Saeed Abdolmaleki^{1*}, Abbas Rohani², Mohammad Hossein Agkhani², Marziye Hoseinpoor², Hosein Poursabbagh², Mohammad kazemi¹

1- Department of Biosystems Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Biosystems Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Accelerated Factor

Failure Modeling

Log-Logistic Distribution

Right-Censored Data Analysis

ABSTRACT

This study investigates the durability and reliability of diesel engine crankshaft through accelerated life testing. Test specimens and conditions were carefully designed to simulate real operational loads, temperatures, and environmental factors. High-precision measurements of loading and component responses enabled statistically robust and reproducible analyses. In the statistical analysis, the probability distributions of applied loads and component strength were evaluated, and reliability indices and failure probabilities were calculated. Uncertainties associated with material properties and operational loads were also incorporated to provide more accurate lifetime predictions. The acceleration factor was determined using Arrhenius-based models and load-dependent scaling methods, allowing accelerated test data to be reliably extrapolated to real-world service conditions. The results demonstrated that failure patterns observed under accelerated testing closely matched the actual behavior of the systems, and calculated reliability indices and safety factors remained within acceptable ranges. This approach facilitates the identification of design weaknesses, optimal material selection, and overall enhancement of power system durability. Findings emphasize that integrating accelerated life testing with rigorous statistical analysis and precise acceleration factor calculations serves as an effective tool for reducing maintenance costs and improving design performance.



© 2025 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: saeed.abdolmaleki@modares.ac.ir (S. Abdolmaleki)

Received 19 September 2025; Accepted 8 November 2025

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

Cite this article: Abdolmaleki S, Rohani A, Aghkhani MH, Hoseinpoor M, Poursabbagh H, Kazemi M. Evaluation of reliability of diesel engine crankshaft by accelerated test method. 2025 Jun 22;72(2):56-71. doi: [10.22034/ER.2025.2071780.1102](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2071780.1102)

ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان میل لنگ موتور دیزل با آزمون‌های شتاب یافته

سعید عبدالملکی^{۱*}، عباس روحانی^۲، محمدحسین آق‌خانی^۲، مرضیه حسین‌پور^۲، حسین پورصباغ^۲، محمد کاظمی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

این مقاله دوام و قابلیت اطمینان میل‌لنگ موتور دیزل از طریق آزمون‌های شتاب‌یافته عمر را بررسی می‌کند. نمونه‌ها و شرایط آزمون به گونه‌ای طراحی شدند که بارهای مکانیکی، دما و شرایط محیطی شبیه‌سازی واقعی شرایط عملیاتی باشد. داده‌های بارگذاری و پاسخ قطعات به طور دقیق ثبت شد تا تحلیل‌های آماری معتبر و تکرارپذیر امکان‌پذیر شود. در بخش تحلیل آماری، توزیع‌های احتمالاتی بار و استحکام ارزیابی شدند و شاخص‌های قابلیت اطمینان و احتمال شکست محاسبه شدند. عدم قطعیت‌های مرتبط با خواص مواد و بارهای عملیاتی نیز در نظر گرفته شد تا پیش‌بینی دقیق‌تر طول عمر قطعات حاصل شود. ضریب شتاب‌یافتگی با بهره‌گیری از الگوی آرنهوس و روش‌های مقیاس‌بندی وابسته به بار محاسبه شد، به طوری که داده‌های آزمون‌های شتاب‌یافته بتوانند طول عمر واقعی را پیش‌بینی کنند. نتایج نشان داد که الگوهای شکست قطعات در آزمون‌های شتاب‌یافته با رفتار واقعی سامانه همخوانی دارد و شاخص‌های قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی در محدوده مطلوب قرار می‌گیرند. این روش، امکان شناسایی نقاط ضعف طراحی، انتخاب مواد بهینه و بهبود دوام سامانه‌های مولد قدرت را فراهم می‌کند. یافته‌ها تأکید می‌کنند که تلفیق آزمون‌های شتاب‌یافته با تحلیل آماری و محاسبه دقیق ضریب شتاب‌یافتگی، ابزار مؤثری برای کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش کارایی طراحی محسوب می‌شود.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

ضریب شتاب‌یافتگی
شبیه‌سازی خرابی
توزیع لوگ-جستیک
تحلیل داده‌های حذف شده



© 2025 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: saeed.abdolmaleki@modares.ac.ir (سعید عبدالملکی)

دریافت ۲۸ شهریور ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۷ آبان ۱۴۰۴
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Abdolmaleki S, Rohani A, Aghkhani MH, Hoseinpoor M, Poursabbagh H, Kazemi M. Evaluation of reliability of diesel engine crankshaft by accelerated test method. 2025 Jun 22;72(2):56-71. doi: 10.22034/ER.2025.2071780.1102

۱- مقدمه

صنایع امروزی با فشار فزاینده‌ای برای ارائه محصولات نوآورانه، با بهره‌وری و فناوری بالا و در بازه‌های زمانی کوتاه مواجه هستند؛ محصولاتی که باید از قابلیت اطمینان و کیفیت بالایی برخوردار باشند. قابلیت اطمینان به عنوان یکی از معیارهای اصلی تصمیم‌گیری و طراحی مهندسی شناخته می‌شود و الزامات سخت‌گیرانه‌تر برای دستیابی به آن، نیازمند آزمون‌های دقیق و گسترده بر روی مواد، تجهیزات و سامانه‌ها است. بر اساس تعریف ناسا، احتمال عملکرد موفقیت‌آمیز یک سامانه در یک بازه زمانی مشخص و تحت شرایط عملیاتی معین، به عنوان قابلیت اطمینان تعریف می‌شود [۱].

روش‌های متعددی برای محاسبه قابلیت اطمینان در طول چرخه عمر محصول استفاده می‌شوند. شایع‌ترین روش، تحلیل داده‌های خرابی محصول در بازار است که علی‌رغم دقت بالا، تنها زمانی قابل استفاده است که مدت زمان کافی از تولید و عرضه محصول گذشته باشد. الزامات بازار رقابتی و نیاز به پیش‌بینی عملکرد محصول در مرحله نمونه‌سازی، ضرورت استفاده از روش‌های پیش‌بینی سریع‌تر مانند آزمون‌های شتاب‌یافته را ایجاد کرده است [۲].

آزمون‌های شتاب‌یافته با اعمال سطوح بالاتر تنش، نرخ خرابی را به صورت مصنوعی افزایش می‌دهند و داده‌های عمر مربوط به شرایط کاری واقعی را در بازه زمانی کوتاه‌تری فراهم می‌کنند. این روش امکان ارزیابی قطعات پرهزینه را بدون نیاز به سپری شدن کامل عمر عملیاتی فراهم می‌سازد [۳].

تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های مختلف در صنایع مختلف اهمیت بالایی دارد. در صنعت خودرو، این تحلیل‌ها و آزمون‌های شتاب‌یافته برای قطعات مختلف طراحی و اجرا می‌شوند و شرکت‌هایی مانند کوماتسو، فیات و لیاند آزمون‌های اختصاصی متعددی انجام داده‌اند [۴].

مطالعات متعدد قابلیت اطمینان موتور، پره‌های بالگرد، چرخ‌دنده‌ها، تسمه‌ها و اجزای توربوشارژر را مورد بررسی قرار داده‌اند [۵-۱۳]، اما تمرکز کمی بر ارزیابی قابلیت اطمینان اجزای حیاتی سامانه مولد قدرت از جمله میل‌لنگ وجود داشته است. میل‌لنگ به دلیل نقش کلیدی در انتقال قدرت از موتور به سامانه انتقال، نیازمند بررسی دقیق عمر مفید، قابلیت اطمینان و علائم خرابی است. همچنین مطالعات دیگری [۱۴-۱۸] برای بررسی قابلیت اطمینان سامانه‌ها و قطعات مختلف در موتور دیزل بویژه یاتاقان‌های اصلی، سامانه سوخت رسانی الکترونیکی، موتور قطار دیزل، محور پرخوران موتور سواری، سامانه خنک‌کاری موتور دیزل، جعبه‌دنده و ... انجام شده که بیشتر موارد بر اساس تحلیل داده‌های خرابی یا تحلیل تنش‌های دینامیکی است. بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ارزیابی قابلیت اطمینان قطعات اصلی سامانه قوای محرکه خودرو شامل سمبه، حلقه، استوانه، دریچه‌ها، میل‌لنگ و ... با توجه به زمان و هزینه گران مورد نیاز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که هر کدام از این قطعات بسیار حیاتی بوده و خرابی هر کدام می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری را در پی داشته باشد. به عنوان مثال بررسی قابلیت اطمینان میل‌لنگ، به عنوان عضو اصلی انتقال قدرت از موتور به سامانه انتقال قدرت همواره مورد توجه بوده و داشتن دانش کافی نسبت به عمر مفید، قابلیت اطمینان و همچنین علائم خرابی آن، ضروری است.

در این پژوهش، آزمون‌های شتاب‌یافته طراحی‌شده بر اساس تنش‌های وارده به موتور دیزل، قابلیت اطمینان میل‌لنگ موتور ملی را ارزیابی کرده است. لازم به ذکر است که تاکنون ارزیابی قابلیت اطمینان میل‌لنگ با استفاده از آزمون‌های شتاب‌یافته یا داده‌های خرابی عملیاتی انجام نشده و بیشتر مطالعات موجود بر شبیه‌سازی و تحلیل تنش تمرکز داشته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش اجرای پژوهش

موتور استفاده شده در این پژوهش با یک موتور دیزلی ۱۵۰۰ سی‌سی است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده

است. همچنین بر مبنای جدول حالت‌های شکست و تحلیل اثر خرابی^۱ بررسی تنش‌های وارده به میل لنگ در شرایط عادی عملکرد و با توجه به آزمون‌های استاندارد شرکت‌های بزرگ در حوزه طراحی و آزمون موتور از جمله FEV، در شرایط شتاب یافته آزمون‌هایی طراحی و اجرا گردید که شرح آن‌ها در ادامه آمده است [۱۹-۲۱].

جدول ۱ مشخصات موتور آزمایش

مشخصه	اطلاعات
نوع موتور	چهار زمانه پرخورانی شده
ترتیب استوانه	خطی
تعداد استوانه	۴
حجم موتور	۱/۵ لیتر
قطر استوانه	۸۲/۵ میلی‌متر
پیمایش سمبه	۷۶ میلی‌متر
نسبت تراکم	۱۶/۵
بیشینه گشتاور خروجی	۲۵۶ نیوتن متر (۱۷۵۰ دور بر دقیقه)
بیشینه توان خروجی	۹۰ کیلووات (۴۰۰۰ دور بر دقیقه)
بیشینه فشار محفظه احتراق	۱۶۵ بار

۲-۲- آزمون‌های شتاب یافته

در این پژوهش، از رویکرد مبتنی بر ضریب شتاب^۲ برای تحلیل شتاب‌یافتگی عمر اجزا استفاده شده است. این رویکرد به دلیل سادگی و شفافیت فیزیکی، امکان مقایسه مستقیم شرایط آزمون شتاب‌یافته با شرایط واقعی کارکرد را فراهم می‌کند. همچنین، ضریب شتاب قابلیت تعمیم به سازوکارهای مختلف خرابی مانند حرارتی، مکانیکی و خوردگی را داراست و می‌توان آن را به صورت تجربی از داده‌های آزمون عمر یا روابط فیزیکی معتبر استخراج نمود. یکی دیگر از مزایای این روش، امکان تبدیل نتایج آزمون‌های کوتاه‌مدت به شرایط کارکرد بلندمدت و پیش‌بینی عمر مفید اجزا بدون نیاز به آزمون‌های طولانی‌مدت است. به همین دلایل، رویکرد ضریب شتاب، در استانداردهای بین‌المللی و تحلیل‌های قابلیت اطمینان، به عنوان یک روش مرجع پذیرفته شده است.

آزمون‌های شتاب‌یافته امکان فشرده‌سازی زمانی عمر سرویس محصول را فراهم می‌کنند، یعنی می‌توان در زمان کوتاه‌تری نسبت به آزمون در شرایط سرویس واقعی، داده‌های خرابی کسب و برای طراحی تصمیم‌گیری کرد. این موضوع در صنعت خودرو که چرخه‌های توسعه کوتاه و فشار تجاری زیادی وجود دارد، حیاتی است [۲۲]. در یک آزمون شتاب‌یافته عمر، با فرض اینکه حالات و سازوکارهای خرابی محصول مانند شرایط نرمال هستند، نمونه‌ها در سطوح تنش بالاتر مورد آزمون قرار می‌گیرند. بنابراین عمر محصول در سطح تنشی رایج بر مبنای اطلاعات در سطوح بالای تنش تخمین زده می‌شود. آزمون‌های شتاب‌یافته عمر در حالت کلی چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۳]:

- ۱- بارگذاری تنش (تنش‌های اصلی ثابت، پلکانی و پیشرونده)
- ۲- توقف آزمون با معیارها شامل حذف زمان و حذف شکست
- ۳- بازرسی عملکرد برای واحد آزمون (بازرسی دوره‌ای و بازرسی مداوم)

¹ Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

² Acceleration Factor Approach

۴- تعداد تنش‌های شتاب‌یافته شامل تنش‌های منفرد، تنش‌های مضاعف و تنش‌های چندگانه با توجه به اینکه اطلاعات بدست آمده از این آزمون‌ها بر مبنای دور بر حسب زمان است، دور باید به مسافت طی شده معادل تبدیل شود. در ادامه آزمون‌های طراحی شده در این پژوهش به اختصار توضیح داده خواهند شد.

۲-۲-۱- آزمون ۲۰۰ ساعت (آزمون دوام)

در این آزمون ۷/۵ دقیقه اول، موتور در دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه تمام بار کار می‌کند که به میل‌لنگ بیشترین فشار وارد شده (بیشترین فشار داخل سیلندر) و میل‌لنگ در حال تراکم شدید قرار می‌گیرد و در ۷/۵ دقیقه بعدی در همین دور بدون بار کار می‌کند و دینامومتر موتور را به حرکت در می‌آورد که بیشترین نیروی لختی (به عبارتی حداکثر تنش‌های فشاری) به میل‌لنگ وارد می‌شود. در این حالت میل‌لنگ در شرایط کشش حداکثری قرار می‌گیرد و ضریب شتاب‌یافتگی ۲/۸ در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

۲-۲-۲- آزمون ۱۵۰ ساعت (آزمون دوام سرعت نامی)

در این آزمون موتور در دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه تمام بار کار می‌کند که بیشترین فشار ممکن (بیشترین فشار داخل سیلندر) به میل‌لنگ وارد می‌شود به عبارتی حداکثر تنش‌های فشاری و کششی به قطعه وارد می‌شود. در این آزمون، میل‌لنگ به دلیل قرار گرفتن طولانی مدت در فشار قوی، پیش بار پیچ و فشار احتراق مورد بررسی قرار گرفته و ضریب شتاب‌یافتگی برابر ۲/۸ است [۲۰].

۲-۲-۳- آزمون ۸۰۰ ساعت (آزمون دوام ۸۰۰ ساعت)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دور موتورها و بارهایی است که در عمل رخ می‌دهد. در دورها و بارهایی که بیشترین تنش‌ها به قطعات موتور وارد می‌آید زمان حداکثر شده و در شرایطی که تنش کمتری به موتور وارد می‌گردد زمان کوتاه تر شده است. در این آزمون ضریب شتاب‌یافتگی معادل ۲/۶۶ در نظر گرفته می‌شود و به دلیل کارکردن در همه دورها و بارها، جنس مواد بکار رفته در میل‌لنگ و کیفیت سطح آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۲۰].

۲-۲-۴- آزمون ۷۵۰ ساعت (آزمون دوام تغییر حرارتی)

در این آزمون ۷/۵ دقیقه موتور در دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه تمام بار کار می‌کند که بیشترین فشار به میل‌لنگ وارد می‌گردد و در ۷/۵ دقیقه بعدی در دور آرام بدون بار کار می‌کند که چون دور موتور به یک باره کم می‌شود و دماها داغ است، فشار روغن بسیار ضعیف می‌شود و تنش وارده به یاتاقان‌ها افزایش شدیدی می‌یابد. در این آزمون به دلیل کم شدن ناگهانی روغن، خستگی، جنس ماده میل‌لنگ و اندازه بزرگتر از اندازه واقعی پوسته یاتاقان و بوش چشمه کوچک مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و ضریب شتاب‌یافتگی ۴/۳۲ است [۲۰].

۲-۲-۵- آزمون ۲۵۰ ساعت (آزمون دوام سرعت نند)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دورهای بالا و تمام بار است و تنها تفاوت آن نوسانات شدید دور موتور است. با توجه به نوسانات شدید دور موتور در فشارهای بالای احتراق خستگی و مواد میل‌لنگ مورد ارزیابی قرار گرفته و ضریب شتاب‌یافتگی ۴/۸ است [۲۰].

۲-۲-۶- آزمون شدید

این آزمون به گونه‌ای طراحی شده است که در دورهای منطبق بر فرکانس طبیعی قطعات مورد نظر رخ می‌دهد و این

قطعات را دچار تشدید می‌نماید. حالت‌های تشدید میل لنگ در دوره‌هایی بیشتر از دور کاری موتور رخ می‌دهد. این دورها در تحلیل‌های ارتعاشی شبیه‌سازی با نرم افزار انسیس مشخص شده‌اند. پدیده تشدید در قطعات مختلف و انتقال این ارتعاشات به قطعه میل لنگ به منظور بررسی تنش لختی جرم ایجاد می‌شود. ضریب شتاب‌یافتگی $3/82$ است [۲۰]. پس از پایان یافتن آزمون‌ها استوانه و بستار بازبینی شدند. شکل ۱ سطح این قطعات پس از اتمام آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۱ بررسی یاتاقان‌های میل لنگ بعد از آزمون دوام تشدید

همان‌گونه که در جدول ۲ نیز به اختصار اشاره شده است در شش آزمون دوام، دوام سرعت نامی، دوام ۸۰۰ ساعت، دوام تغییر حرارتی، دوام سرعت تند و تشدید با افزایش زمان شرایط تنش‌زا متناسب با ضریب شتاب‌یافتگی ایجاد گردیده که در آنها تنش‌های مختلفی از جمله فشار احتراق، خستگی، لختی جرم، بارگذاری پیچ، کیفیت جنس، کیفیت سطح و اندازه انطباق پوسته یاتاقان و بوش چشم کوچک بررسی می‌شوند [۱۲، ۱۳].

جدول ۲ مشخصات آزمون‌های شتاب‌یافته استفاده شده

نام آزمون	نوع تنش شتاب‌یافته	تنش‌های مورد ارزیابی در آزمون
۲۰۰ ساعت دوام	سرعت، بار مکانیکی و حرارتی	فشار احتراق، خستگی، لختی جرم، پیش بارگذاری پیچ
سرعت نامی ۱۵۰ ساعت	سرعت	فشار احتراق، پیش بارگذاری پیچ
دوام ۸۰۰ ساعت	زمان	کیفیت جنس، کیفیت سطح
تغییر حرارتی ۷۵۰ ساعت	زمان	خستگی، کیفیت جنس، اندازه انطباق پوسته یاتاقان و بوش چشم کوچک
سرعت تند ۲۵۰ ساعت	سرعت	خستگی، کیفیت جنس
آزمون تشدید	زمان	لختی جرم

۲-۳- الگوی آماری

رویکرد احتمالاتی برای شبیه‌سازی رابطه بین بارهای عملیاتی و استحکام قطعات به کار گرفته شد. توزیع‌های بار و استحکام با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب (مانند توزیع وایبل یا نرمال) تحلیل شدند. احتمال شکست، تابع قابلیت اطمینان و بازه‌های اطمینان مربوطه برآورد گردید. این روش امکان کمی‌سازی عدم قطعیت در خصوصیات مواد و تنش‌های عملیاتی را فراهم ساخت. به منظور ارزیابی رفتار خرابی اجزا و روند تغییر نرخ خرابی در طول زمان، از سه روش استاندارد شامل آیین‌نامه میل شماره ۲۱۷^۱، آزمون روند لاپلاس^۲ و آزمون برازش اندرسون-دارلینگ^۳ استفاده شده است. استاندارد هندبوک میل شماره ۲۱۷ که یکی از معتبرترین دستورالعمل‌های نظامی در حوزه پیش‌بینی قابلیت اطمینان

¹ Military Handbook (MIL-HDBK-217) Reliability Test

² Laplace Trend Test

³ Anderson-Darling Test

قطعات است که نرخ خرابی جزء را بر اساس داده‌های تجربی و ضرایب تصحیح محیطی، کیفی و کاری محاسبه می‌کند. در این روش نرخ خرابی هر جزء با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح محیطی، کیفی و کاری بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda_p = \lambda_b * \prod \pi_i \quad (1)$$

که در آن λ_b نرخ خرابی پایه استخراج شده از جداول استاندارد و λ_p نرخ خرابی پیش‌بینی شده جزء و π_i ضرایب تصحیح مربوط به شرایط محیطی، کیفیت ساخت، دمای کاری، تنش مکانیکی و نحوه کاربرد است. ضرایب تصحیح مختلف هستند. این الگو فرض می‌کند که خرابی‌ها در بازه عمر مفید دارای نرخ ثابتی بوده و تابع قابلیت اطمینان به صورت نمایی تعریف می‌شود. آزمون روند لاپلاس^۱ برای بررسی ثابت بودن یا تغییرپذیری نرخ خرابی در طول زمان استفاده می‌شود. هدف این آزمون، تشخیص روند خرابی‌ها (افزایشی یا کاهش‌ی بودن) در داده‌های زمانی است. شکل ۲ آزمون لاپلاس خاتمه یافته را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. آماره این آزمون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T} \right) - \frac{1}{2} n \right] / \sqrt{\frac{1}{12} n} \quad (2)$$

که در آن t_i زمان وقوع خرابی i ام کل زمان آزمون، n تعداد کل خرابی‌ها و T کل زمان آزمون است. در این معادله اگر

$U \approx 0 \rightarrow$ نرخ خرابی ثابت است (خرابی‌ها تصادفی‌اند).

$U < 0 \rightarrow$ نرخ خرابی کاهش‌ی است (بهبود سامانه در گذر زمان).

$U > 0 \rightarrow$ نرخ خرابی افزایش‌ی است (فرسایش یا تخریب تدریجی سامانه).

در نهایت آزمون اندرسون-دارلینگ^۲ یکی دیگر از آزمون‌های برازش توزیع آماری^۳ استفاده شده است که برای بررسی انطباق داده‌های خرابی با توزیع‌های آماری فرضی مانند نمایی، وایل یا نرمال به کار می‌رود. این آزمون بر اساس فاصله تجمعی بین توزیع تجربی داده‌ها و توزیع نظری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\{F(x_{n+1-i}) - \ln[1 + \ln F(x_i)]\} (1 - 2i) \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} - n = A^2 \quad (3)$$

که $F(x)$ تابع توزیع تجمعی نظری است و n تعداد داده‌هاست. در این روش، مقادیر بزرگ‌تر آماره A^2 نشان‌دهنده عدم انطباق بیشتر داده‌ها با توزیع فرضی است. این آزمون به‌ویژه برای داده‌های قابلیت اطمینان، نسبت به آزمون کولموگروف-اسمیرنوف حساسیت بالاتری در نواحی انتهایی توزیع دارد و بنابراین برای تحلیل داده‌های خرابی مناسب‌تر است. پس از محاسبه زمان بین خرابی، تأیید ماهیت توزیع مستقل و یکسان داده‌ها ضروری است. دو روش متداول برای تأیید این فرض آزمون روند و آزمون خودهمبستگی است. در این مطالعه آزمون‌های آیین‌نامه‌های نظامی، لاپلاس و اندرسون-دارلینگ در بررسی وجود روند استفاده شد [۲۵، ۲۶]. گام بعدی برای تأیید فرض توزیع مستقل و یکسان بررسی وجود همبستگی میان داده‌ها است. آزمون خودهمبستگی با استفاده از روش گرافیکی انجام شد. در شبیه‌سازی قابلیت اطمینان، شاخص زمان بین خرابی‌ها^۴ استفاده شد.

۲-۴- محاسبه ضریب شتاب یافتگی

در آزمون‌های عمر شتاب‌یافته، فرض بر این است که حالت‌ها و سازوکارهای خرابی محصول در شرایط شتاب‌یافته مشابه

¹ Laplace Trend Test

² Anderson-Darling

³ Goodness-of-Fit

⁴ Time Between Failures (TBF)

شرایط کاری نرمال باقی می‌مانند. در این روش، نمونه‌ها در سطوحی از تنش بالاتر از محدوده عملکرد معمول آزمایش می‌شوند تا فرآیند خرابی در زمان کوتاه‌تری رخ دهد. سپس با تحلیل داده‌های حاصل از این آزمون‌ها، عمر محصول در شرایط تنش نرمال برآورد می‌شود. برای تبدیل نتایج آزمون شتاب‌یافته به شرایط واقعی، ضریب شتاب‌یافتگی^۱ تعیین می‌شود. این ضریب نسبت میان نرخ یا میزان تجمع خسارت در شرایط شتاب‌یافته به مقدار متناظر آن در شرایط استفاده عادی است و به‌عنوان متغیر کلیدی در برون‌یابی عمر واقعی محصول به‌کار می‌رود.

تابع قابلیت اطمینان با استفاده از احتمال خرابی که برابر با تابع توزیع تجمعی^۲ است، محاسبه می‌شود. تابع توزیع تجمعی بیانگر احتمال زمان تصادفی خرابی T کمتر از زمان عملیاتی t است و برای قابلیت اطمینان با $F(t)$ نشان داده می‌شود. سطح زیر منحنی تابع چگالی احتمال^۳ برابر با یک و تابع قابلیت اطمینان مطابق معادله^۴ محاسبه می‌گردد [۲۵]. تابع چگالی احتمال نیز مشتق احتمال خرابی (تابع توزیع تجمعی نسبت به زمان) است که با $f(t)$ نشان داده شده و مطابق معادله^۵ محاسبه می‌شود.

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (۴)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (۵)$$

مجموع تابع قابلیت اطمینان یا احتمال بقای سامانه با تابع توزیع تجمعی که همان احتمال خرابی است مطابق معادله^۶ برابر با یک است.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (۶)$$

در نهایت با توجه به معادله‌های ۱ و ۲ تابع قابلیت اطمینان در معادله^۷ بیان شده است.

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)d(t) \quad (۷)$$

۳- نتایج و بحث

در جدول ۳ جزئیات شش آزمون مذکور، همراه با نتایج رتبه‌بندی سطوح میل‌لنگ و تخمین عمر باقیمانده، ارائه گردیده است. روش کار بدین صورت بود که ابتدا حالت‌های خرابی بحرانی قطعه میل‌لنگ استخراج و سپس این حالت‌ها بر مبنای داده‌های تجمعی رانندگی که نقاط بحرانی بیشترین خستگی پیچشی و خمشی را مشخص می‌کنند، تحلیل شدند.

برای تخمین عمر باقیمانده میل‌لنگ‌ها، شرایط آن‌ها پس از آزمون در پنج دسته مختلف طبقه‌بندی شد. معیار این طبقه‌بندی بر اساس وضعیت سطح یاتاقان‌های ثابت و متحرک به‌شرح زیر بود:

رده ۱ (عالی): عدم وجود هرگونه خط و خش.

رده ۲ (قابل قبول): وجود خط و خش جزئی، آئینه ای شدن سطوح یاتاقان‌ها

رده ۳ (بحرانی): وجود خط و خش عمیق و ناخن گیر

رده ۴ (غیرقابل قبول): سایش شدید یا کاهش محسوس ماده.

رده ۵ (شکست): شکست کامل.

در گام بعدی، با استفاده از مستندات شرکت‌های معتبر خودروسازی، این رده‌ها به یک ضریب تخمین عمر (در مقیاس ۱ تا ۲) تبدیل شدند. ضرب این ضریب در عمر حاصل از آزمون‌های شتاب‌یافته، منجر به تخمین دقیق‌تری از قابلیت اطمینان میل‌لنگ می‌شود. [۲۰].

¹ Acceleration Factor (AF)

² Cumulative Distribution Function (CDF)

³ Probability Density Function (PDF)

جدول ۳ نتایج رتبه‌بندی سطح میل لنگ و تخمینی از عمر باقیمانده

نام آزمون	زمان استاندارد آزمون (ساعت)	زمان واقعی (ساعت)	ضریب شتاب‌یافتگی	مسافت معادل (کیلومتر)	رتبه‌بندی سطح میل لنگ
دوام	۲۰۰	۳۳۰	۲/۳	۳۹۰۶۵	۲
دوام سرعت نامی	۱۵۰	۱۶۰	۳/۸۰	۷۶۰۱۸	۲
دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۹۰۰	۳/۲	۱۵۶۲۶۱	۲
دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۸۰۰	۳/۲	۱۵۶۲۶۱	۲
دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۳۵۰	۳/۲	۱۵۶۲۶۱	۲
دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۶۰۰	۳/۲	۱۵۶۲۶۱	۲
دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۸۰۰	۳/۲	۱۵۶۲۶۱	۲
دوام تغییر حرارتی	۷۵۰	۳۷۵	۲/۵	۱۹۴۹۰۹	۲
دوام تغییر حرارتی	۷۵۰	۸۵۰	۲/۵	۱۹۴۹۰۹	۲
دوام تغییر حرارتی	۷۵۰	۷۵۰	۲/۵	۱۹۴۹۰۹	۲
دوام سرعت تُند	۲۵۰	۳۱۵	۴/۲	۱۳۹۹۸۷	۲
دوام سرعت تُند	۲۵۰	۲۵۰	۴/۲	۱۳۹۹۸۷	۲
دوام سرعت تُند	۲۵۰	۳۵۰	۴/۲	۱۳۹۹۸۷	۲
دوام سرعت تُند	۲۵۰	۲۶۲	۴/۲	۱۳۹۹۸۷	۲
دوام سرعت تُند	۲۵۰	۲۷۵	۴/۲	۱۳۹۹۸۷	۲
آزمون تشدید	۵۰۰	۵۲۰	۴/۸۲	۲۸۱۱۴۳	۲

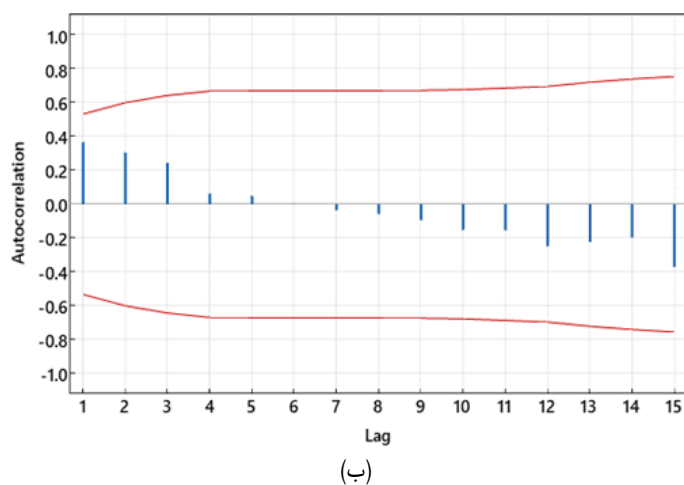
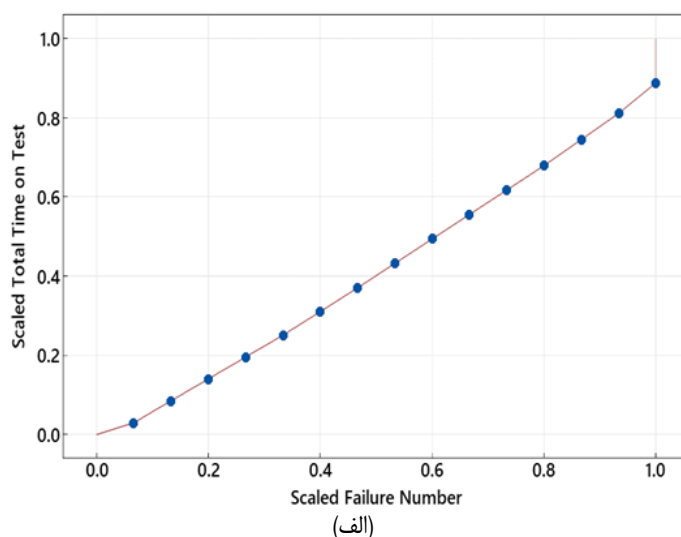
برای ارزیابی آزمون وجود روند در داده‌های آزمون شتاب‌یافته از آزمون و اندرسون-دارلینگ استفاده شد. نتیجه این آزمون‌ها در جدول ۴ بر حسب مسافت پیموده شده تا خرابی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در سطح احتمال معنی داری یک درصد فرض صفر (H_0) مبتنی بر عدم وجود روند تأیید می‌گردد، برای تمام موارد $p > 0.01$ است. این متغیر کوچک‌ترین مقداری از خطای نوع اول است که با فرض درست بودن فرض صفر، آماره آزمون در ناحیه بحرانی قرار می‌گیرد (فرض صفر رد می‌شود)، به عبارت دیگر مقدار حاصل از p -value با سطح معنی داری ۱ یا ۵ درصد مقایسه می‌شود و اگر مقدار p -value کوچکتر از ۵ درصد باشد فرض صفر رد می‌شود [۲۷-۳۰]. در شکل ۲ نیز، نمودار TTT معادل زمان کل آزمون، برای داده‌های وقوع خرابی با هدف ارزیابی وجود روند بین داده‌ها (فرض مانا و مستقل بودن داده‌ها) آورده شده است.

بررسی نتایج ارائه‌شده در شکل ۲-الف نشان می‌دهد که خرابی‌های محتمل میل لنگ، به‌طور کلی و در مطالعه حاضر، شامل ترک و تغییر شکل ناشی از تنش‌های کششی یا فشاری هستند. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، پراکندگی داده‌ها حول خط ۴۵ درجه قرار دارد؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های خرابی فاقد روند بوده و فرض استقلال و ایستایی (مانایی) داده‌های خرابی موتور مورد آزمایش تأیید می‌شود. بر این اساس، می‌توان از الگوهای آماری و ریاضی متداول برای برآورد قابلیت اطمینان استفاده کرد.

نمودار ارزیابی خودهمبستگی بین زمان وقوع خرابی‌ها بر حسب ساعت کارکرد موتور در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. بررسی مقادیر مختلف lag از ۱ تا ۱۶ در آزمون خودهمبستگی نشان می‌دهد که بین زمان‌های متوالی وقوع خرابی، همبستگی معناداری وجود ندارد. منظور از lag، تأخیر یا فاصله زمانی بین مشاهدات متوالی است که بر اساس تعداد داده‌های در دسترس تعیین می‌شود [۳۱، ۳۲]. بنابراین، فرض استقلال بین داده‌های خرابی مورد تأیید قرار می‌گیرد.

جدول ۴ نتیجه مقادیر آماره اندرسون-دارلینگ برای توزیع‌های آماری مختلف

فاصله اطمینان ۹۵ درصد نرمال				آماره اندرسون دارلینگ تصحیح شده		توزیع
کران بالا	کران پایین	انحراف معیار	میانگین			
۷۰۶۶۰۳	۴۲۳۰۳۵	۷۱۵۵۳	۵۴۶۷۳۴	۱/۲۱۷		ویبول
۷۲۷۶۸۵	۴۱۵۰۱۹	۷۸۷۲۵	۵۴۹۵۴۸	۱/۱۸۸		لگ نرمال
۸۸۹۶۰۸	۳۳۳۸۸۶	۱۳۶۲۵۰	۵۴۵۰۰۲	۲/۸۶۷		نمایی
۷۵۳۴۲۵	۴۳۵۰۸۷	۸۰۱۹۹	۵۷۲۵۴۳	۱/۰۶۰		لگ لجستیک
۷۰۶۵۸۳	۴۱۸۰۵۷	۷۲۷۶۷	۵۴۳۴۹۹	۱/۲۰۶		ویبول سه متغیری
۶۸۵۴۲۵	۴۰۴۵۵۹	۷۱۶۵۱	۵۴۴۹۹۲	۱/۱۲۹		نمایی سه متغیری
۷۹۷۳۲۱	۳۷۲۵۲۳	۱۰۵۷۹۸	۵۴۴۹۹۶	۱/۹۲۴		نمایی دو متغیری
۶۹۹۴۹۶	۴۰۲۶۴۱	۷۵۷۳۰	۵۵۱۰۶۹	۱/۰۵۱		لگ لجستیک دو متغیری
۷۱۹۳۵۳	۲۶۲۲۴۵	۱۱۶۶۱۱	۵۵۰۷۹۹	۲/۱۹۰		کمترین مقدار حدی
۶۸۶۱۳۴	۴۰۳۸۶۹	۷۲۰۰۸	۵۴۵۰۰۲	۱/۴۱۰		نرمال
۶۳۹۰۳۴	۳۹۷۰۶۸	۶۱۷۲۷	۵۴۸۰۵۱	۱/۲۶۵		لجستیک



شکل ۲ الف) نتیجه نمودار TTT برای ارزیابی وجود روند بین داده‌های وقوع خرابی (ب) نمودار همبستگی زمان بین خرابی

در جدول ۵، مقادیر آماره‌های حاصل از سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون-دارلینگ و کای دو برای ۱۷ توزیع آماری رایج ارائه شده و بر اساس نتایج به دست آمده، توزیع‌ها رتبه‌بندی شده‌اند.

جدول ۵ نتیجه مقادیر آماره‌های سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون-دارلینگ و کای دو

فاصله اطمینان ۹۵ درصد نرمال		انحراف معیار استاندارد	صدک	درصد	توزیع
کران بالا	کران پایین				
۱۵۸۴۰۷	۲۴۵۵۲/۸	۲۹۶۶۰/۹	۶۲۳۶۵/۸	۱	ویبول
۲۲۶۸۸۱	۸۲۵۶۰/۷	۳۵۲۹۴/۹	۱۳۶۸۶۳	۱	لگ نرمال
۸۹۴۰/۸۵	۳۳۵۵/۶۶	۱۳۶۹/۳۶	۵۴۷۷/۴۵	۱	نمایی
۲۳۷۵۵۲	۶۵۹۶۴/۹	۴۰۹۱۶/۴	۱۲۵۱۸۰	۱	لاگ لجستیک
۲۲۰۶۷۳	۱۲۷۸۸۵	۳۰۴۵۵/۳	۱۴۷۰۴۶	۱	ویبول سه متغیری
۲۵۶۴۹۹	-۳۳۴۵۹/۸	۷۳۹۷۰/۴	۱۱۱۵۱۹	۱	نمایی سه متغیری
۱۲۸۱۵۷	۱۲۳۹۸۸	۱۰۶۳/۳۰	۱۲۶۰۵۵	۱	نمایی دو متغیری
۳۱۵۸۵۸	-۱۵۸۴۰۰	۱۲۰۹۸۷	۷۸۷۲۸/۸	۱	لگ لجستیک دو متغیری
-۳۶۵۵۷۳	-۱۶۵۵۷۷۴	۳۲۹۱۳۹	-۱۰۱۰۶۷۴	۱	کمترین مقدار حدی
۱۴۶۶۳۴	-۳۹۶۷۵۰	۱۳۸۶۲۱	-۱۲۵۰۵۸	۱	نرمال
۱۵۱۳۲۰	-۴۵۳۸۴۱	۱۵۴۳۸۱	-۱۵۱۲۶۱	۱	لجستیک
۲۷۱۲۳۲	۷۲۷۵۸/۳	۴۷۱۵۵/۸	۱۴۰۴۷۹	۵	ویبول
۲۹۴۹۷۳	۱۳۱۸۱۸	۴۰۵۱۷/۷	۱۹۷۱۸۷	۵	لاگ نرمال
۴۵۶۳۰/۹	۱۷۱۲۶/۱	۶۹۸۸/۷۴	۲۷۹۵۴/۹	۵	نمایی
۳۲۴۱۴۷	۱۲۹۳۲۷	۴۷۹۹۳/۷	۲۰۴۷۴۶	۵	لگ لجستیک
۲۵۶۵۴۹	۱۳۶۱۵۶	۳۰۲۰۵/۴	۱۸۶۸۹۸	۵	ویبول سه متغیری
۲۹۵۱۶۷	۸۱۵۷۱/۴	۵۴۴۸۹/۶	۱۸۸۳۶۹	۵	نمایی سه متغیری
۱۵۴۵۴۹	۱۳۳۲۵۷	۵۴۲۶/۷۱	۱۴۳۵۰۹	۵	نمایی دو متغیری
۳۳۰۸۸۳	۴۳۵۹۹/۹	۷۳۲۸۱/۸	۱۸۱۲۴۱	۵	لگ لجستیک دو متغیری
۵۸۹۹۶	-۸۶۳۶۵۴	۲۳۵۳۷۴	-۴۰۲۳۲۹	۵	کمترین مقدار حدی
۲۸۷۷۱۳	-۱۴۵۲۴۶	۱۱۰۴۵۱	۷۱۲۳۵/۵	۵	نرمال
۳۰۳۴۶۸	-۱۲۵۱۲۳	۱۰۹۳۳۶	۸۹۱۷۲/۶	۵	لجستیک
۳۴۵۶۰۰	۱۱۶۹۸۸	۵۵۵۶۳/۸	۲۰۱۰۷۵	۱۰	ویبول
۳۴۱۴۳۲	۱۶۸۰۹۰	۴۳۳۰۸/۹	۲۳۹۵۶۵	۱۰	لاگ نرمال
۹۳۷۲۹/۵	۳۵۱۷۸/۴	۱۴۳۵۵/۴	۵۷۴۲۱/۷	۱۰	نمایی
۳۷۶۰۴۹	۱۷۴۰۳۷	۵۰۲۸۱/۹	۲۵۵۸۲۵	۱۰	لگ لجستیک
۳۱۴۴۳۲	۱۶۰۸۱۵	۳۸۴۶۴/۱	۲۲۴۸۶۸	۱۰	ویبول سه متغیری
۳۳۸۷۱۰	۱۳۹۲۰۲	۵۰۸۹۶	۲۳۸۹۵۶	۱۰	نمایی سه متغیری
۱۸۹۷۳۷	۱۴۵۹۱۶	۱۱۱۴۶/۹	۱۶۶۳۹۰	۱۰	نمایی دو متغیری
۳۶۹۹۸۹	۱۲۹۶۷۹	۶۱۳۰۴/۸	۲۴۹۸۳۴	۱۰	لگ لجستیک دو متغیری
۲۵۰۰۷۵	-۵۱۷۴۱۲	۱۹۵۷۹۱	-۱۳۳۶۶۹	۱۰	کمترین مقدار حدی

توزیع	درصد	صدک	انحراف معیار استاندارد	فاصله اطمینان ۹۵ درصد نرمال	کران بالا	کران پایین
نرمال	۱۰	۱۷۵۸۷۶	۹۷۱۷۵/۴	۱۴۵۸۴/۶	۳۶۶۳۳۶	-
لجستیک	۱۰	۱۹۸۰۱۰	۹۱۱۳۰/۲	۱۹۳۹۷/۶	۳۷۶۶۳۲	-
ویبول	۵۰	۵۱۳۹۹۵	۷۵۱۱۶/۱	۳۸۵۹۷۸	۶۸۴۴۷۰	-
لاگ نرمال	۵۰	۴۷۶۰۵۵	۶۳۷۷۲/۵	۳۶۶۱۲۵	۶۱۸۹۹۱	-
نمایی	۵۰	۳۷۷۷۶۷	۹۴۴۴۱/۶	۲۳۱۴۳۲	۶۱۶۶۳۹	-
لگ لجستیک	۵۰	۴۹۲۴۶۲	۶۳۳۷۷/۸	۳۸۲۶۷۲	۶۳۳۷۵۱	-
ویبول سه متغیری	۵۰	۴۸۳۷۸۳	۷۶۱۷۰/۹	۳۵۵۳۲۸	۶۵۸۶۷۴	-
نمایی سه متغیری	۵۰	۴۹۱۲۰۱	۶۸۹۳۳/۷	۳۵۶۰۹۴	۶۲۶۳۰۹	-
نمایی سه متغیری	۵۰	۴۱۵۱۳۸	۷۳۳۳۳/۴	۲۹۳۶۴۹	۵۸۶۸۸۸	-
لگ لجستیک دو متغیری	۵۰	۵۰۰۷۲۱	۶۲۹۸۹/۴	۳۷۷۲۶۴	۶۲۴۱۷۸	-
کمترین مقدار حدی	۵۰	۵۶۹۴۳۹	۱۰۹۳۷۹	۳۵۵۰۶۱	۷۸۳۸۱۸	-
نرمال	۵۰	۵۴۵۰۰۲	۷۲۰۰۷/۷	۴۰۳۸۶۹	۶۸۶۱۳۴	-
لجستیک	۵۰	۵۱۸۰۵۱	۶۱۷۲۷/۱	۳۹۷۰۶۸	۶۳۹۰۳۴	-

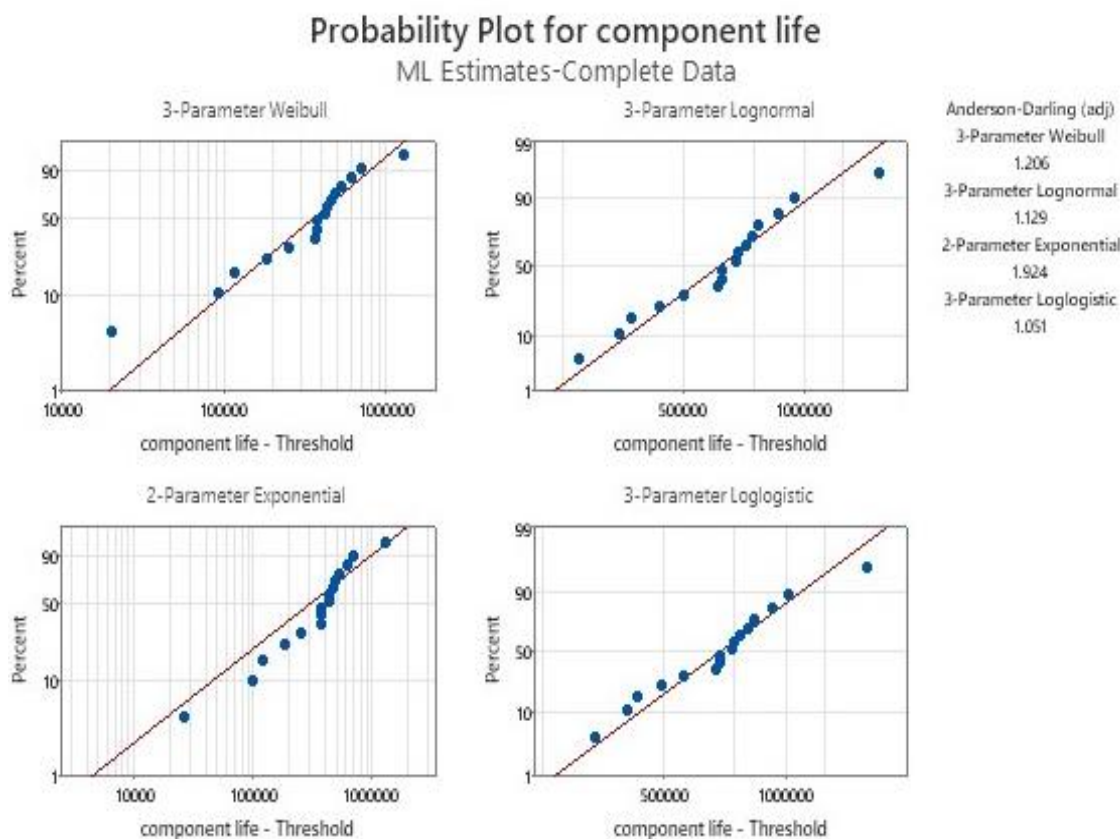
تحلیل داده‌های ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که روند تغییر مقادیر صدک با افزایش درصد از ۱٪ تا ۵۰٪ به صورت یکنواخت و منطقی است؛ به گونه‌ای که مقادیر میانه و کران‌های فاصله اطمینان با افزایش درصد افزایش می‌یابند. این رفتار نشان‌دهنده سازگاری کلی داده‌ها با انتظار فیزیکی عمر قطعات و روند طبیعی وقوع خرابی است. همچنین، بررسی انحراف معیارها و کران‌های فاصله اطمینان نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها در درصدهای بزرگتر (به ویژه ۵۰٪) بیشتر است، که با افزایش عدم قطعیت در توزیع‌ها و واقعیت‌های فیزیکی سامانه‌های مکانیکی هم‌خوانی دارد. از نظر مقایسه‌ای، الگوهای ویبول و لگ‌نرمال دارای مقادیر صدک نزدیک به یکدیگر و کران‌های محدودتر نسبت به سایر توزیع‌ها هستند؛ این امر نشان‌دهنده برازش مناسب‌تر آن‌ها نسبت به الگوهای تک‌متغیری و الگوهای با متغیرهای کمتر است. در مقابل، الگوهای نمایی و برخی توزیع‌های نمایی دو متغیری و سه متغیری در صدک‌های پایین‌تر مقادیر کمتری ارائه می‌دهند که بیانگر محدودیت این الگوها در بازنمایی کامل رفتار خرابی است. همچنین مشاهده مقادیر منفی در کران‌های پایین برخی الگوها مانند کمترین مقدار حدی و نرمال نشان‌دهنده عدم تناسب این توزیع‌ها با داده‌های عمر واقعی است، زیرا زمان خرابی نمی‌تواند منفی باشد.

با توجه به سه آزمون آماری انجام شده و رتبه‌بندی توزیع‌ها بر اساس مقادیر آماره و P-value، مشخص شد که توزیع لوگ-لجستیک سه متغیری بهترین تطابق را با داده‌ها دارد؛ زیرا در تمامی آزمون‌ها رتبه نخست را کسب کرده است. انتخاب این توزیع بر اساس این اصل صورت گرفته که مقادیر کمتر آماره آزمون و مقادیر بالاتر P-value نشان‌دهنده پذیرش با اطمینان بیشتر فرض صفر مبنی بر پیروی داده‌ها از تابع چگالی مورد نظر است.

بنابراین، تحلیل ترکیبی نشان می‌دهد که نه تنها روند داده‌ها و پراکندگی آن‌ها منطقی و قابل قبول است، بلکه توزیع لوگ-لجستیک سه متغیری به عنوان الگوی مناسب برای پیش‌بینی وقوع خرابی و ارزیابی قابلیت اطمینان میل لنگ موتور انتخاب شده است. این تحلیل جامع، هم چارچوب آماری را رعایت کرده و هم جنبه‌های فیزیکی و منطقی داده‌ها را در نظر گرفته است.

در شکل ۳، نتایج مقایسه بین مقادیر قابلیت اطمینان محاسبه شده بر اساس توزیع لوگ-لجستیک سه متغیری و مقادیر تجربی به دست آمده از آزمون عمر شتاب‌یافته نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین

(R^2) بین داده‌های نظری و تجربی برابر با ۰/۹۹ است. همچنین، شیب و عرض از مبدأ خط برازش بین دو مجموعه داده به ترتیب برابر با ۱/۰۷ و ۰/۰۴ به دست آمده است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع لوگ-لجستیک سه‌متغیری از دقت و قابلیت اطمینان بالایی در پیش‌بینی رفتار خرابی میل‌لنگ برخوردار است و می‌تواند در شبیه‌سازی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.



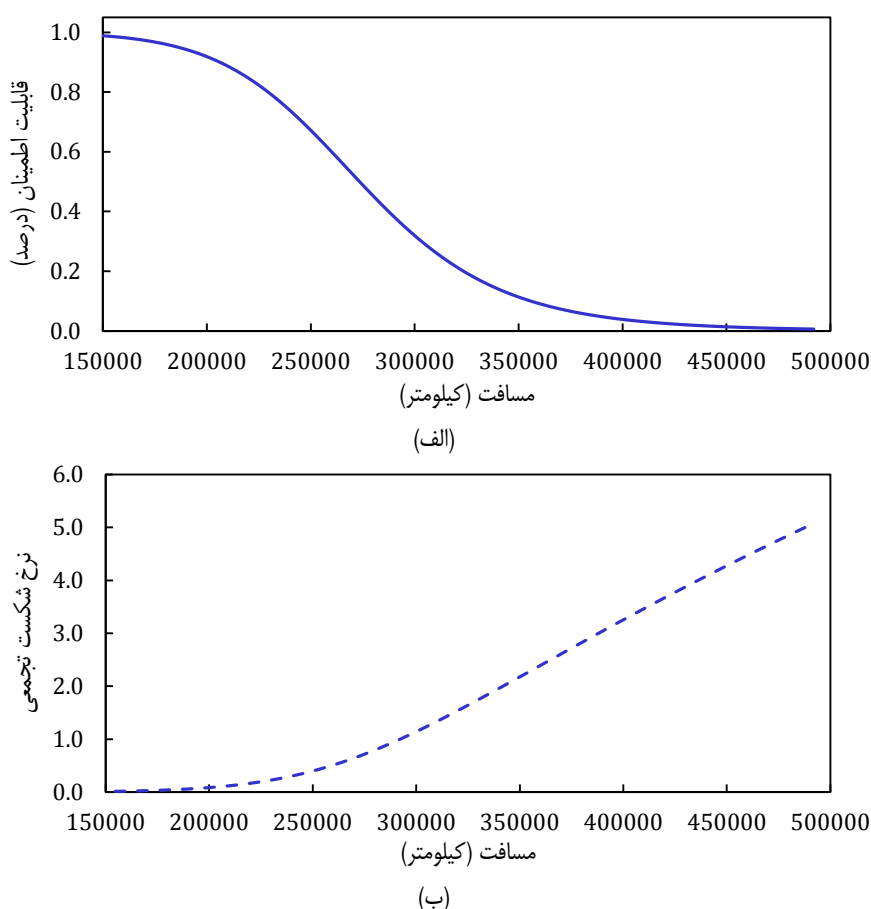
شکل ۳ مقایسه مقادیر قابلیت اطمینان تجربی و نظری به کمک توزیع لوگ-لجستیک سه‌متغیری

با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و ضریب‌های شتاب‌یافتگی، منحنی قابلیت اطمینان برای میل‌لنگ بر اساس توزیع لوگ-لجستیک ترسیم گردید. شکل ۳ توزیع آماری داده‌های خرابی را نشان می‌دهد که در آن محور افقی زمان کارکرد تجمعی و محور عمودی احتمال بقاء است.

بر اساس نتایج، متغیر مقیاس (α) و شکل (β) توزیع لوگ-لجستیک به ترتیب برابر با $105 \times 1,48$ و $2,33$ محاسبه گردید. شکل متغیر بزرگ‌تر از ۱ نشان می‌دهد که نرخ خرابی در طول زمان روند افزایشی دارد، که بیانگر غالب بودن سازوکارهای فرسودگی در خرابی میل‌لنگ است.

با استفاده از این تابع، مقادیر قابلیت اطمینان برای فواصل مختلف کارکرد محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که برای سطوح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد، عمر تجمعی به ترتیب $145,955$ ، $186,159$ و $355,592$ کیلومتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پس از $355,592$ کیلومتر، کمتر از ۱۰ درصد میل‌لنگ‌ها دچار خرابی خواهند شد.

شکل ۴ نمودار تابع نرخ خرابی $\lambda(t)$ را برحسب زمان کارکرد نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ خرابی در مراحل ابتدایی تقریباً ثابت است، اما در میانه عمر افزایش یافته و در انتهای دوره به حالت پایدار می‌رسد. این رفتار با الگوی معروف وان حمام برای تجهیزات مکانیکی مطابقت دارد.



شکل ۴ تغییرات (الف) قابلیت اطمینان و (ب) نرخ شکست تجمعی بر حسب کارکرد تجمعی موتور

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارزیابی قابلیت اطمینان میل لنگ موتور دیزل ملی، مجموعه‌ای از آزمون‌های شتاب‌یافته متناسب با تنش‌های واقعی طراحی و اجرا گردید. با تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمون‌ها به کمک توزیع لوگ-لجستیک و تأیید نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های نظامی، لاپلاس و اندرسون-دارلینگ، روابط قابلیت اطمینان استخراج شد. نتایج نشان داد که آزمون‌های شتاب‌یافته طراحی شده توانستند رفتار خرابی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند و ضریب شتاب‌یافتگی در محدوده ۲,۳ تا ۴,۸ برای میل لنگ معتبر ارزیابی شد.

تابع قابلیت اطمینان میل لنگ از نوع لوگ-لجستیک بوده و رفتار خرابی از نوع فرسایشی^۱ است. میل لنگ موتور دیزل مورد مطالعه در حدود ۱۸۶,۰۰۰ کیلومتر، دارای احتمال بقاء ۹۵ درصد است. نتایج آزمون با داده‌های میدانی شرکت‌های تولیدکننده موتور همخوانی مطلوبی دارد و روش پیشنهادی را برای سایر قطعات دوار قابل تعمیم می‌سازد.

با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود برای بهبود قابلیت اطمینان میل لنگ در دوره‌های طولانی‌تر، اصلاحات در فرآیند سطح‌پردازی و کنترل تنش‌های باقیمانده پس از تراشکاری لحاظ شود. همچنین استفاده از الگوهای چندتنشی^۲ در مراحل آتی می‌تواند دقت طرح را افزایش دهد.

¹ Wear-out Failure

² Multi-stress Accelerated Life Test

تشریح و قدردانی

این پژوهش به لطف حمایت‌های انجام شده از سوی شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) امکان‌پذیر شد.

References

- [1] National Aeronautics and Space Administration. NASA technical standards: safety, quality, reliability, and maintainability [standard on the Internet]. Washington: NASA; 2015. Available from: <https://www.standards.nasa.gov/safety-quality-reliability-maintainability>
- [2] Wang Y, Chen X, Zhang S, Fan Z, Hu J, Yang C. A review of modelling and data analysis methods for accelerated test. *Journal of Reliability Science and Engineering*. 2025 Feb 20. doi: [10.1088/3050-2454/adb84e](https://doi.org/10.1088/3050-2454/adb84e)
- [3] Pinto-Santos JA, Rodríguez-Borbón MI, Rodríguez-Medina MA. An Introduction to the Accelerated Reliability Testing Method: A Literature Review. *Society for Industrial and Systems Engineering*. 2021 Sep 23:144-50.
- [4] Gots AN, Amirseyidov SA. Analysis of accelerated methods testing piston engine for reliability. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Mar 1 (Vol. 1086, No. 1, p. 012006)*. IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/1086/1/012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1086/1/012006)
- [5] Yanagihara H, Tateno A. Accelerated Mission Tests and Reliability Improvement of F3-30 Engine. *American Society of Mechanical Engineers*; 1990 Jun 11. doi: [10.1115/90-GT-322](https://doi.org/10.1115/90-GT-322)
- [6] Zaharia SM, Martinescu I. Management of accelerated reliability testing. *Technical Gazette/Tehnički Vjesnik*. 2016 Sep 1;23(5), 1447-1455. doi: [10.17559/TV-20141119153642](https://doi.org/10.17559/TV-20141119153642)
- [7] ZAhARIA SM, Martinescu I, Morariu CO. Life time prediction using accelerated test data of the specimens from mechanical element prognozowanie czasu pracy elementu mechanicznego z wykorzystaniem danych z badań przyspieszonych. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2012;14(2):99-106.
- [8] Attibele P, Makam S, Lee Y. A Comparison of Real World and Accelerated Pow ertrain Endurance Cycles for Light-Duty Vehicles. *Innovative Automotive Transmissions, Hybrid and Electric Drives*. 2013 May:13-6.
- [9] Rezaei M. Validation of engine belt tensioners mounting by Accelerated Life Testing. *The Journal of Engine Research*. 2019; 55: 13-20.
- [10] Ahdad F, Beltrami C, Bernardini L. Design of thermal mechanical fatigue accelerated life test criteria. *InASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2008 Jan 1; 48777, 187-194*. doi: [10.1115/IMECE2008-68209](https://doi.org/10.1115/IMECE2008-68209)
- [11] Koszalka G, Niewczas A, Pieniak D. Reliability assessment of a truck engine based on measurements of combustion chamber tightness. *In2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering 2012 Jun 15 (pp. 995-999)*. IEEE. doi: [10.1109/ICQR2MSE.2012.6246392](https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2012.6246392)
- [12] Zheng JX, Li B, Yuan SC. Reliability analysis of the diesel engine crankshaft based on APDL language in ANSYS. *Advanced Materials Research*. 2012 Jan 20;374:1916-9. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.1916](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.1916)
- [13] Zhou X, Yu XL. Reliability analysis of diesel engine crankshaft based on 2D stress strength interference model. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2006 Mar;7(3):391-7. doi: [10.1631/jzus.2006.A0391](https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0391)
- [14] Sadatomi M, Ito H. A study of reliability evaluation of main bearings for multicylinder diesel engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2016 Apr 1;9(1):41-7. doi: [10.4271/2016-01-0494](https://doi.org/10.4271/2016-01-0494)
- [15] Kim J, Lee Y, Ha Y, Lee Y. Accelerated lifetime test considering with optimal surface roughness for gas foil bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025 Jul 15;235:112892. doi: [10.1016/j.ymssp.2025.112892](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112892)
- [16] He X, Yang S, Zhou R, Chen K, Liu Z, Yue Z. Research on gear life reliability analysis based on accelerated life test. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2024 Jun;55(6):839-50. doi: [10.1002/mawe.202300196](https://doi.org/10.1002/mawe.202300196)
- [17] Dolas DR, Deshmukh S. Reliability ananalysis of cooling system of diesel engine. *Universal journal of mechanical engineering*. 2015 Mar;3(2):57-62. doi: [10.13189/ujme.2015.030205](https://doi.org/10.13189/ujme.2015.030205)

- [18] Vaysi A, Rohani A, Tabasizadeh M. Reliability evaluation of vacume brake booster in automative. Inthe 4th national and 2nd international conference on applied research in electrical, mechanical, mechatronic engineering, malek-ahtar university of technology 2017.
- [19] Soltanali H, Ramezani S. Smart failure mode and effects analysis (FMEA) for safety–Critical systems in the context of Industry 4.0. InAdvances in reliability, failure and risk analysis 2023 Apr 9 (pp. 151-176). Singapore: Springer Nature Singapore. doi: [10.1007/978-981-19-9909-3_7](https://doi.org/10.1007/978-981-19-9909-3_7)
- [20] Küsters A, Maassen FJ. Specific Durability Testing with FEV Master Program. SAE Technical Paper; 2010 Apr 12, 2010-01-0922.
- [21] Harada F. Outline of IEC62506, International Standard for Accelerated Reliability Testing and Key Points. Inthe 23rd Spring Reliability Symposium of the Reliability Engineering Association of Japan 2015.
- [22] Klyatis, Lev. "The Basis of Automotive Engineering Accelerated Testing." (2024).
- [23] Chen WH, Gao L, Pan J, Qian P, He QC. Design of accelerated life test plans—overview and prospect. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2018 Dec;31(1):13. doi: [10.1186/s10033-018-0206-9](https://doi.org/10.1186/s10033-018-0206-9)
- [24] Ebeling CE. An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press; 2019 Apr 12.
- [25] Billinton R, Allan RN. Reliability evaluation of engineering systems. New York: Pitman; 1985.
- [26] Sarhan AM, Tolba AH. Stress-strength reliability under partially accelerated life testing using Weibull model. Scientific African. 2023 Jul 1;20:e01733. doi: [10.1016/j.sciaf.2023.e01733](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01733)
- [27] Miraei SM, Ramezani S, Soltanali H. Proposing a Framework for Reliability Estimation Using a Proportional Hazards Model Based on Diesel Engine Condition Monitoring Data. Journal of Quality Engineering and Management. 2024 May 21;14(1):1-7. doi: [10.48313/jqem.2024.214729](https://doi.org/10.48313/jqem.2024.214729)
- [28] Li Y, Gao H, Chen H, Liu C, Yang Z, Zio E. Accelerated degradation testing for lifetime analysis considering random effects and the influence of stress and measurement errors. Reliability Engineering & System Safety. 2024 Jul 1;247:110101. doi: [10.1016/j.res.2024.110101](https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110101)
- [29] Soltanali H, Rohani A, Abbaspour-Fard MH, Farinha JT. A comparative study of statistical and soft computing techniques for reliability prediction of automotive manufacturing. Applied Soft Computing. 2021 Jan 1;98:106738. doi: [10.1016/j.asoc.2020.106738](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106738)
- [30] Soltanali H, Garmabaki AH, Thaduri A, Parida A, Kumar U, Rohani A. Sustainable production process: An application of reliability, availability, and maintainability methodologies in automotive manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2019 Aug;233(4):682-97. doi: [10.1177/1748006X18818266](https://doi.org/10.1177/1748006X18818266)
- [31] Zieja M, Woch M, Tomaszewska J. Reliability of the aircraft in the Polish operational aviation. InSafety and Reliability–Safe Societies in a Changing World 2018 Jun 15 (pp. 2277-2283). CRC Press. doi: [10.1201/9781351174664-286](https://doi.org/10.1201/9781351174664-286)
- [32] Liberopoulos G, Tsarouhas P. Reliability analysis of an automated pizza production line. Journal of Food Engineering. 2005 Jul 1;69(1):79-96. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2004.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.07.014)
- [33] Koszalka G, Niewczas A, Pieniak D. Reliability assessment of a truck engine based on measurements of combustion chamber tightness. In2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering 2012 Jun 15 (pp. 995-999). IEEE.
- [34] Poursabbagh Roknabadi H, Rohani A, Aghkhani MH, Mirsalim SM, Jenab K. Evaluation of reliability of diesel engine connecting rod by accelerated test method. The Journal of Engine Research. 2022 Nov 27;64(64):41-53. [In Persian]