



ارزیابی قابلیت اطمینان بازوی لنگ موتور دیزلی به روش آزمون شتاب یافته

حسین پورصباغ^۱، عباس روحانی^{۲*}، محمد حسین آق‌خانی^۳، سید مصطفی میرسلیم^۴، کوروش جناب^۵

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، poursabagh@um.ac.ir

^۲دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، arohani@um.ac.ir

^۳استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، aghkhani@um.ac.ir

^۴استادیار، دانشگاه امیرکبیر، mo_mirsalim@aut.ac.ir

^۵استادیار، دانشگاه مورهد، k.jenab@moreheadstate.edu

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۴۰۰

کلیدواژه‌ها:

قابلیت اطمینان

آزمون شتاب یافته

موتور دیزل

بازوی لنگ

چکیده

امروزه به دلیل رقابت تولیدکنندگان در کیفیت محصولات، معیارهای ارزیابی کیفیت در مراحل مختلف تولید از اهمیت به سزایی برخوردار اند. یکی از این معیارها، قابلیت اطمینان بوده که در بیشتر موارد از ارزیابی‌های آماری داده‌های خدمات پس از فروش ناشی از بازگشت قابل توجهی از محصولات و یا به کمک آزمون‌های شتاب یافته در زمان تولید نمونه محاسبه می‌شود. در این پژوهش با اجرای آزمون‌های شتاب یافته متنوع، در پنج شرایط متفاوت و متناسب با تنش‌های وارده بر روی موتور دیزل، قطعه بازوی لنگ پس از هر آزمون ارزیابی شد. شاخص مورد نظر در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در این مطالعه زمان بین خرابی است که پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها به کمک آزمون‌های شتاب یافته، تأیید ماهیت توزیع مستقل و یکسان داده‌ها به کمک سه آزمون میلیتاری-هندبوک، لاپلاس و اندرسون دارلینگ بررسی گردید. در نهایت نمودار توزیع قابلیت اطمینان بازوی لنگ در زمان‌های مختلف کارکرد به کمک توزیع آماری لوگ-لجستیک، با توجه به بهترین تطابق با نتایج تجربی، ترسیم شد. نتایج به دست آمده نشان داد که قابلیت اطمینان بازوی لنگ بترتیب برای ۱۷۷۴۷۱ و ۲۱۲۷۵۳ کیلومتر کارکرد جمعی برابر با ۹۹ و ۹۵ درصد خواهد شد و پس از ۴۴۸۲۴۰ کیلومتر به کمتر از ۵ درصد خواهد رسید.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

امروزه کارخانجات با فشار بسیار زیادی برای تولیدات جدیدتر با فناوری و بهره‌وری بیشتر در زمان کوتاه، که دارای قابلیت اطمینان و کیفیت بالایی باشند روبرو هستند. الزامات برای قابلیت اطمینان بهتر، نیاز به آزمون‌های اولیه برای مواد، تجهیزات و سامانه‌ها را افزایش داده است چراکه قابلیت اطمینان یکی از معیارهای اصلی در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مهندسی است. طبق تعریف سازمان هوا و فضای آمریکا قابلیت اطمینان احتمال کارکرد مطلوب یک دستگاه در دوره زمانی معین تحت شرایط کاری مشخص است [۱].

روش‌های مختلفی در مراحل مختلف عمر محصول، برای محاسبه و ارزیابی قابلیت اطمینان تاکنون به کار رفته است که مهمترین آن‌ها استفاده از داده‌های خرابی به دست آمده از نتایج عملکرد محصول در بازار است. این اطلاعات اگرچه فرآیند محاسبه قابلیت اطمینان را بسیار تسهیل نموده و دقت بالایی در نتایج دارد، اما استفاده از آنها تنها زمانی امکان پذیر است که مدت زمان قابل توجهی از تولید و عرضه قطعات به مشتری سپری شده باشد تا با استفاده از تعداد خرابی برگشتی، امکان محاسبه قابلیت اطمینان فراهم گردد. در حالی که در شرایط بازار رقابتی امروز و نیاز تولیدکننده به اطلاع از رفتار محصول خود در زمان تولید نمونه، باعث شده رویکرد جدیدی نسبت به محاسبه قابلیت اطمینان در نظر گرفته شود [۲].

از جمله روش‌هایی که امروزه به منظور کاهش زمان در محاسبه قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد آزمون‌های شتاب‌یافته اند. در این گونه آزمون‌ها با افزایش تنش‌ها سرعت خرابی افزایش پیدا می‌کند و در مدت زمان کوتاه‌تری داده‌های عمر شتاب‌یافته برای محاسبه قابلیت اطمینان در اختیار قرار می‌گیرد و حتی در خصوص دستگاه‌های گران، روند فرسایش قطعه ارزیابی می‌شود و نیازی به پایان یافتن عمر آن نیست [۳]. بر این اساس تجزیه و تحلیل شاخص قابلیت اطمینان به دو روش استفاده از داده‌های خرابی و همچنین آزمون‌های شتاب‌یافته در روند طراحی، ساخت و ارزیابی در صنایع مختلف امروز به شدت مورد توجه است. به طوری که یکی از مراحل اصلی فرآیند توسعه در صنعت خودرو نیز، ارزیابی قابلیت اطمینان و استفاده از آزمون‌های شتاب‌یافته بوده که با روش‌های متفاوت در مورد قطعات مختلف بررسی شده است.

رضایی [۴] به منظور صحت‌گذاری پایه تسمه‌سفت‌کن موتور از روش آزمون‌های عمر شتاب‌یافته استفاده کرد. در این پژوهش ساعت خرابی قطعه در حالت عادی و زمان عمر شتاب‌یافته به کمک معادلات قابلیت اطمینان محاسبه گردید.

یانگیها^۱ و همکاران [۵] قابلیت اطمینان یک موتور F3-30 برای وزارت دفاع ژاپن با استفاده از آزمون‌های شتاب‌یافته مأموریتی (AMTF) بر اساس استاندارد MIL-E-5007D ارزیابی کردند. شتاب‌یافتگی این آزمون، مبتنی بر حذف زمان‌های عملکردی بود که در آنها تنش‌های پیش‌بینی شده در FMEA^۳ مورد ارزیابی قرار نمی‌گرفتند. این آزمون‌ها روی دو موتور و در سه بخش ۲۴۰ ساعتی و در مسیر رسیدن به محاسبه قابلیت اطمینان برداشته شد ولی در نهایت به محاسبه TBO^۴ و قابلیت اطمینان قابل قبول موتور بسنده شد.

آیل^۵ و همکاران [۶] از گروه کرایسلر، خرابی در چرخ دنده‌های جعبه دنده یک خودروی سواری را در شرایط رانندگی واقعی و آزمون شتاب‌یافته مقایسه کردند. آنها بازه زمان و گشتاور آزمون شتاب‌یافته را با رانندگی واقعی مقایسه کرده و مقادیر بارگذاری در شرایط آزمون شتاب‌یافته را به دست آوردند.

احداد^۶ و همکاران [۷] با طراحی یک آزمون گرمایی شتاب‌یافته بر روی محفظه گردان پرخوران، قابلیت اطمینان را برای سه سال کارکرد به دست آوردند. در این پژوهش صحت‌گذاری پایه تسمه سفت‌کن و متعلقات جانبی یک موتور چهار استوانه طی دو آزمون عادی و شتاب‌یافته بررسی شد. برای این کار زمان خرابی نمونه‌ها و تنش‌های وارد بر آنها با شبیه‌سازی به روش اجزای محدود به دست آمد.

موهیر^۷ و همکاران [۸] با بررسی شرایط بارگذاری سامانه انتقال قدرت یک خودرو محرک عقب، چرخه آزمون این سامانه را استخراج کردند. به منظور بارگذاری سامانه انتقال قدرت، میز آزمون ساخته و نمودار تنش-عمر قطعات سامانه استخراج شد. قابلیت این میز آزمون اعمال گشتاورهای قوی (شتاب‌دهی عمر) بود که از شرایط واقعی رانندگی در جاده به دست می‌آمد اما رسیدن به آن در خودرو نیازمند صرف زمان و طولانی شدن آزمون می‌شد.

پارک^۸ و همکاران [۹] با هدف نشان دادن قابلیت اطمینان موتور در یک مقدار مقرون به صرفه از زمان و در یک راه اقتصادی از آزمون شتاب و اندازه‌گیری تعداد شکست و متوسط زمان منتهی به خرابی استفاده کردند.

زاهاریا^۹ و مارتین [۱۱-۱۰] در طی دو مطالعه قابلیت اطمینان پره بالگرد را در آزمون‌های شتاب‌یافته بررسی کردند. برای این منظور آنها پره را در سه سطح تنش ضعیف، متوسط و قوی در میز آزمون تحت بار قرار داده و تعداد چرخه تا خرابی را در هر سطح به دست آوردند. در این مطالعات یک قطعه از بالگرد را در شرایط عادی و شتاب‌یافته با سه نرخ ضریب شتاب تحت تنش قرار دادند. نتایج آنها

^۶ Ahdad

^۷ Mohire

^۸ Park

^۹ Zaharia

^۱ Yanagihara

^۲ Accelerated mission test

^۳ Failure Mode and Effects Analysis

^۴ Time Between Overhaul

^۵ Attibe

اطمینان بازوی لنگ در موتور دیزل به کمک آزمون‌های شتاب‌یافته و یا داده‌های خرابی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. طراحی آزمون‌های شتاب‌یافته با الهام از آزمون‌های استاندارد شرکت‌های بزرگ تولید و آزمون موتور در محل شرکت ایپکو بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر میزان قابلیت اطمینان بازوی لنگ در موتوری دیزلی به کمک آزمون‌های شتاب‌یافته بررسی خواهد شد. ویژگی‌های عملکردی موتور در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های موتور آزمایش

اطلاعات	ویژگی
چهار زمانهٔ پرخوران	نوع موتور
خطی	ترتیب استوانه
۱٫۵ لیتر	حجم موتور
۸۲٫۵ میلی‌متر	قطر استوانه
۷۶ میلی‌متر	پیمایش سنبه
۱۶٫۵	نسبت تراکم
۲۵۶ نیوتن‌متر در دور ۱۷۵۰ د.د.د.	گشتاور بیشینه
۹۰ کیلووات در دور ۴۰۰۰ د.د.د.	توان بیشینه
۱۶۵ بار	فشار احتراق بیشینه

بر مبنای جدول FMEA^۲ بررسی تنش‌های وارده به بازوی لنگ در شرایط عادی عملکرد و با توجه به آزمون‌های استاندارد شرکت‌های بزرگ در حوزه طراحی و آزمون موتور از جمله FEV، با هدف بررسی عملکرد بازوی لنگ تحت این تنش‌ها در شرایط شتاب‌یافته آزمون‌هایی طراحی و اجرا گردید که شرح آنها در ادامه آمده است [۲۶-۲۳].

۲-۱- آزمون‌های شتاب‌یافته

همانطور که گفته شد در یک آزمون شتاب‌یافته عمر، با فرض اینکه حالات و سازوکارهای خرابی محصول مانند شرایط عادی هستند، نمونه‌ها در سطوح تنشی قویتر آزمون می‌شوند. بنابراین عمر محصول در سطح تنشی عادی^۳ بر مبنای اطلاعات در سطوح شدید تنشی تخمین زده می‌شود. آزمون‌های شتاب‌یافته عمر به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۷]:

۱. حالت بارگذاری تنش شامل بارگذاری تنش‌های اصلی ثابت، پلکانی و پیشرونده
۲. توقف آزمون با معیارها شامل سانسور زمان^۴ (سانسور نوع اول) و سانسور شکست (سانسور نوع دوم)

نشان می‌داد که عمر قطعه در شرایط عادی بیش از ۱۲ میلیون چرخه می‌شود در حالی که در آزمون شتاب‌یافته به کمتر از ۳ میلیون چرخه میرسد.

رگاتیری^۱ و همکاران [۱۲] با بررسی جعبه دنده دستگاه‌های صنعتی در آزمون‌های واقعی و شتاب‌یافته، تعداد چرخه عمر در سطوح مختلف سرعت و گشتاور را به دست آوردند. سپس قابلیت اطمینان را بین آزمون‌های واقعی و شتاب‌یافته برای چرخه‌های عمر مختلف مقایسه کردند و تطابق خوبی بین آنها مشاهده نمودند.

ویسی و همکاران [۱۳] بر مبنای تحلیل آماری روی داده‌های خرابی به دست آمده از ۱۰۰ عدد تقویت‌کنندهٔ ترمز، قابلیت اطمینان این قطعه را در خودروهای سواری ارزیابی کردند. به طوری که قابلیت اطمینان نهایی معادل ۴۱ درصد برای عمر مورد انتظار محاسبه گردید. همچنین مطالعات دیگری [۲۰-۱۴] برای بررسی قابلیت اطمینان سامانه‌ها و قطعات مختلف در موتور دیزل بویژه یاتاقان‌های اصلی، سامانهٔ سوخت‌رسانی برقی، موتور قطار دیزل، محور پرخوران موتور سواری، سامانهٔ خنک‌کاری موتور دیزل، جعبه‌دنده و... انجام شده که بیشتر موارد بر اساس تحلیل داده‌های خرابی یا تحلیل تنش‌های دینامیکی است. به منظور بررسی قابلیت اطمینان در شرایط شتاب‌یافته نیز با توجه به شرایط عملکردی هر قطعه، شرکت‌های خودروسازی از جمله کوماتسو، فیات و لیلاند آزمون‌های متفاوتی را با توجه به نوع قطعه طراحی و پیاده‌سازی کرده‌اند [۲۱].

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ارزیابی قابلیت اطمینان قطعات اصلی سامانهٔ مولد قدرت خودرو شامل سنبه، حلقه، استوانه، دریچه‌ها، بازوی لنگ و... با توجه به زمان و هزینهٔ زیاد 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. لذا هدف اصلی این پژوهش بررسی قابلیت اطمینان بازوی میل‌لنگ، به عنوان یکی از این قطعات اصلی، انتخاب گردید. لازم به ذکر است که بازوی لنگ یکی از اجزای حیاتی موتورهای احتراق داخلی بوده که ارتباط بین میل‌لنگ و سنبه را برقرار می‌نماید. از آنجا که ضربات سنبه به بازوی لنگ و سپس به میل‌لنگ منتقل می‌شود لذا بازوی لنگ باید استحکام و قدرت کافی در برابر این ضربات را داشته باشد [۲۲]. لذا داشتن دانش کافی نسبت به عمر مفید، قابلیت اطمینان و همچنین علائم خرابی آن، ضروری است.

در پژوهش حاضر با اجرای آزمون‌های شتاب‌یافته فرسودگی، طراحی شده بر مبنای تنش‌های وارده بر روی موتور دیزل، قابلیت اطمینان بازوی لنگ به عنوان یکی از اجزای اصلی موتورهای رفت و برگشتی در ایجاد حرکت دورانی ارزیابی شد. لازم به ذکر است بررسی قابلیت

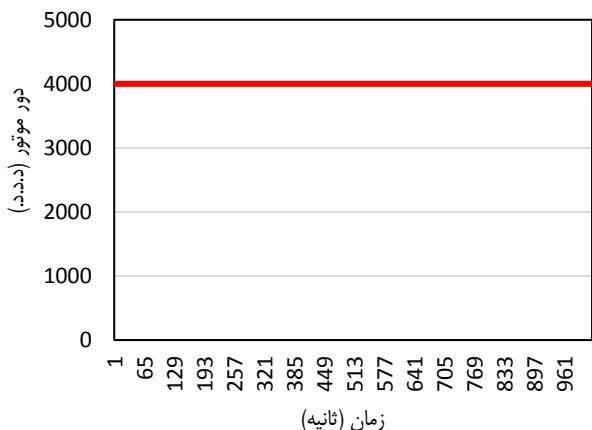
³ Normal

⁴ Time Censored Data

¹ Regattieri

² Failure Mode and Effect Analysis

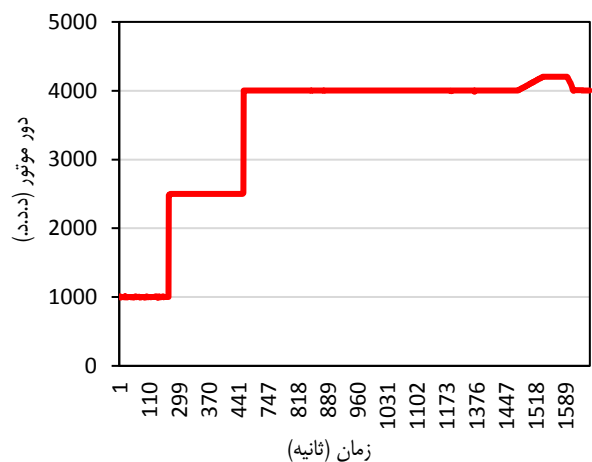
شدید، پیش‌بار پیچ و فشار احتراق بررسی شد. در این آزمون نیز ضریب شتاب‌یافتگی برابر ۲,۸ است [۲۴]. در شکل ۲ تغییرات دور در طول آزمون دوام سرعت نامی نشان داده شده است. همانطور که اشاره شد در تمام طول مدت آزمون دور موتور در ۴۰۰۰ د.د.د. معادل با بیشترین فشار ممکن در داخل استوانه ثابت است.



شکل ۲: تغییرات دور موتور در طول آزمون دوام سرعت نامی

۳- آزمون ۸۰۰ ساعت (آزمون دوام ۸۰۰ ساعت)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دور موتورها و بارهایی است که در عمل رخ می‌دهد. تغییرات دور در طول آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. 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 کوتاه‌تر شده است. در این آزمون ضریب شتاب‌یافتگی معادل ۲,۶۶ در نظر گرفته شد [۲۴]. در این آزمون به دلیل کارکردن در همه دورها و بارها، جنس مواد بکار رفته در بازوی لنگ و کیفیت سطح آن ارزیابی می‌شود.



شکل ۳: تغییرات دور موتور در طول آزمون دوام ۸۰۰ ساعت

۳. راهبرد^۱ بازرسی عملکرد برای واحد آزمون شامل بازرسی دوره‌ای و بازرسی مداوم

۴. تعدد تنش‌های شتاب‌یافته شامل تنش‌های منفرد، تنش‌های مضاعف و تنش‌های چندگانه

در ابتدا با توجه به اینکه اطلاعات به دست آمده از این آزمون‌ها بر مبنای دور بر حسب زمان است، با در نظر گرفتن فرضیات زیر، دور به معادل مسافت طی شده تبدیل شد.

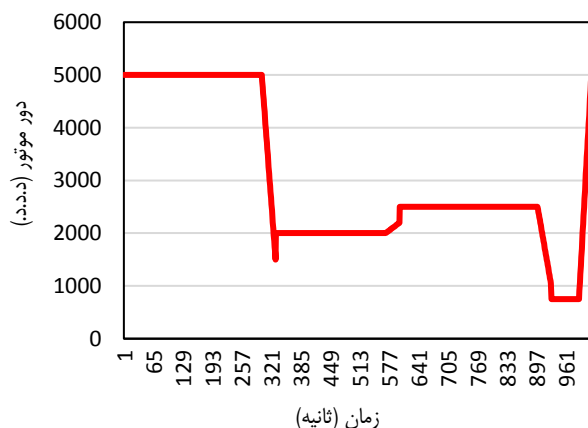
الف) شرایط تغییر و تبدیل دور باید حذف شود زیرا نشان‌دهنده زمان تعویض دنده است.

ب) شرایط کارکرد درجا باید حذف گردد زیرا حرکتی وجود ندارد.

ج) با در نظر گرفتن دنده ۳ به طور متوسط و با استفاده از نسبت دنده‌ها، مسافت معادل محاسبه شد.

۱- آزمون ۲۰۰ ساعت (آزمون دوام)

در این آزمون ۷,۵ دقیقه اول، موتور در دور ۵۰۰۰ د.د.د. تمام بار کار می‌کند که به بازوی لنگ بیشترین فشار وارد شده (بیشترین فشار داخل استوانه) و بازوی لنگ 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 بازوی لنگ وارد می‌شود. در این حالت بازوی لنگ در شرایط کشیدن حداکثری قرار می‌گیرد. در این آزمون ضریب شتاب‌یافتگی ۲,۸ در نظر گرفته شد [۲۴]. تغییرات دور موتور در طول آزمون شتاب‌یافته در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: تغییرات دور موتور در طول آزمون دوام ۲۰۰ ساعت

۲- آزمون ۱۵۰ ساعت (آزمون دوام سرعت نامی)

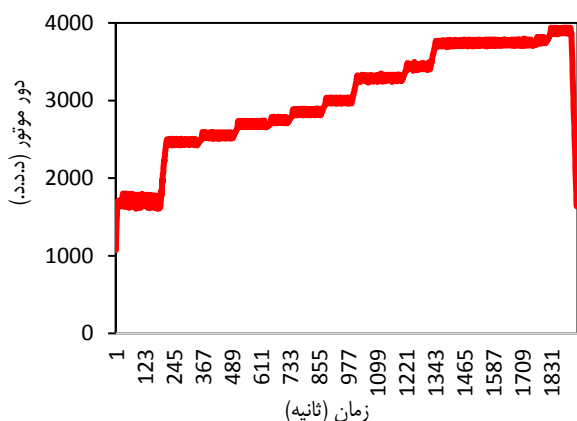
در این آزمون موتور در دور ۴۰۰۰ د.د.د. تمام بار کار می‌کند که بیشترین فشار ممکن (بیشترین فشار داخل استوانه) به بازوی لنگ وارد می‌شود به عبارتی حداکثر تنش‌های فشاری و کششی به قطعه وارد می‌شود. در این آزمون، بازوی لنگ به دلیل قرار گرفتن طولانی مدت در فشار

¹ Strategy

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در مدت زمان کوتاهی نوسانات شدیدی به موتور در دوره‌های تند در حالت تمام بار وارد می‌گردد. ضریب شتاب‌یافتگی این آزمون ۴,۸ است [۲۴].

۶- آزمون تشدید

این آزمون به گونه‌ای طراحی شده است که در دوره‌های منطبق بر بسامد طبیعی قطعات مورد نظر رخ می‌دهد و این قطعات را دچار تشدید می‌نماید. حالت‌های تشدید بازوی لنگ در دوره‌هایی بیشتر از دور کاری موتور رخ می‌دهد. تغییرات دور موتور در آزمون تشدید نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. این دورها در تحلیل‌های ارتعاشی شبیه‌سازی با نرم‌افزار انسیس مشخص شده‌اند. پدیده تشدید در قطعات مختلف و انتقال این ارتعاشات به قطعه بازوی لنگ به منظور بررسی تنش لختی جرم ایجاد می‌شود. در این آزمون ضریب شتاب‌یافتگی ۳,۸۲ است [۲۴].



شکل ۶: تغییرات دور موتور در طول آزمون تشدید

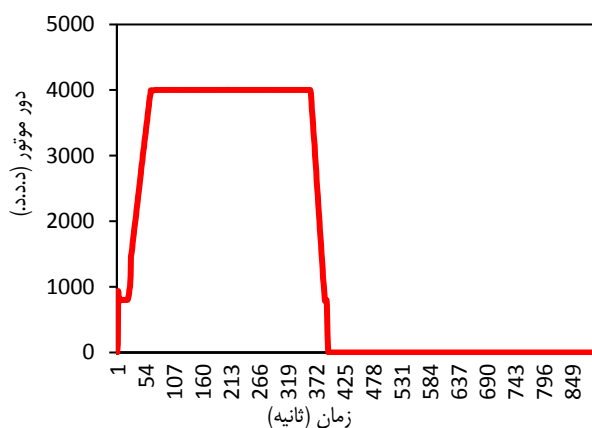
پس از پایان یافتن آزمون‌ها بازوی لنگ‌ها برای بررسی از موتورها خارج و ارزیابی شدند. شکل ۷ تصویر سطح بوش چند بازوی لنگ پس از پایان آزمون‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷: بررسی سطح بوش بازوی لنگ‌ها پس از اتمام آزمون‌ها

۴- آزمون ۷۵۰ ساعت (آزمون دوام تغییر گرمایی)

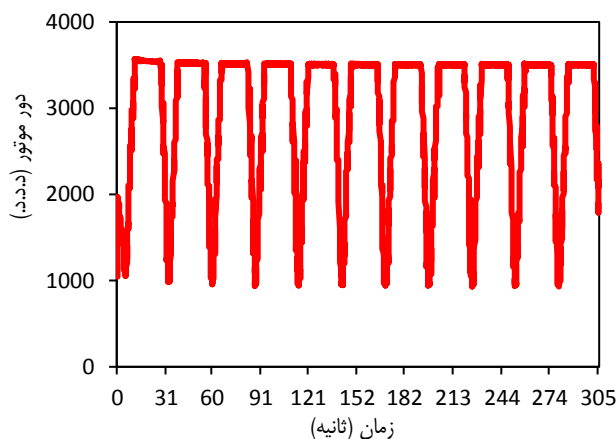
در این آزمون ۷,۵ دقیقه موتور در دور ۴۰۰۰ د.د.د. تمام بار کار می‌کند که بیشترین فشار به بازوی لنگ وارد می‌شود (بیشترین فشار داخل استوانه) و در ۷,۵ دقیقه بعدی در دور آرام بدون بار کار می‌کند که چون دور موتور به یک باره کُند شده و دماها داغ است، فشار روغن بسیار ضعیف شده و تنش وارد به یاتاقان‌ها افزایش شدیدی می‌یابد. تغییرات دور در طول این آزمون نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. در این آزمون به دلیل کم شدن ناگهانی روغن، خستگی، جنس ماده بازوی لنگ و اندازه بزرگتر از اندازه واقعی پوسته یاتاقان و بوش چشم کوچک ارزیابی می‌شوند. در این آزمون ضریب شتاب‌یافتگی ۴,۳۲ است [۲۴].



شکل ۴: تغییرات دور موتور در طول آزمون دوام تغییر حرارتی

۵- آزمون ۲۵۰ ساعت (آزمون دوام تند)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دوره‌های تند و تمام بار است و تنها تفاوت آن نوسانات شدید دور موتور است. در این آزمون با توجه به نوسانات شدید دور موتور در فشارهای شدید احتراق، خستگی و مواد بازوی لنگ ارزیابی می‌شوند.



شکل ۵: تغییرات دور موتور در طول آزمون دوام تند

۱ (عالی)، خط جزئی عدد ۲ (قابل قبول)، خط عمیق تر عدد ۳ (بحرانی)، سوراخ یا کاهش مقدار ماده عدد ۴ (غیرقابل قبول) و شکست کلی عدد ۵ (شکست) تعلق گرفت. تبدیل این اعداد با استفاده از مستندات و گزارش‌های شرکت‌های مطرح خودروسازی به ضریب تخمین عمر باقیمانده در مقیاس ۱ تا ۲ و ضرب آنها در عمر به دست آمده از محاسبه نتایج آزمون‌های شتاب‌یافته، امکان تخمین دقیق‌تری از قابلیت اطمینان را فراهم می‌آورد [۲۴].

همانگونه که در جدول ۲ نیز به اختصار اشاره شده است در شش آزمون دوام، دوام سرعت نامی، دوام ۸۰۰ ساعت، دوام تغییر گرمایی، دوام 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. به منظور تخمین عمر باقیمانده بازوی لنگ‌ها، شرایط بازوی لنگ بعد از آزمون به ۵ دسته تقسیم‌بندی گردید. در این تقسیم‌بندی به بازوی لنگ‌هایی که در بوش داخلی هیچگونه اثری از خط و خرابی نبود عدد

جدول ۲: ویژگی‌های آزمون‌های شتاب‌یافته استفاده شده

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

عدد جدول توزیع کای-۲ باشد، فرضیه صفر تأیید می‌شود و داده‌ها بدون روند هستند. در صورت رد فرض صفر، وجود روند در داده‌ها تأیید می‌شود. در آزمون لاپلاس ارزیابی روند شاخص‌های خرابی نیز با استفاده از معادله ۲، محاسبه می‌شود:

$$LA = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{t_i}{n-1} - \frac{t_n}{2} \right) / \left(t_n \sqrt{\frac{1}{12(n-1)}} \right) \quad (2)$$

برای تأیید فرض صفر در آزمون لاپلاس با سطح اطمینان ۹۵٪ در بازه (۱، ۹۶±) آماره LA محاسبه می‌شود. اگر این آماره در بازه فوق باشد، فرض صفر رد نمی‌شود و در نتیجه داده‌ها بدون روند هستند. اما اگر در این بازه نباشد، فرض صفر پذیرفته نمی‌شود و وجود روند در داده‌ها را نشان می‌دهد. پس از استفاده از آزمون میلیتاری-هندبوک و آزمون لاپلاس، از آزمون اندرسون-دارلینگ با معادله ۳ به منظور بررسی روند، استفاده شد.

$$AD = -\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (2i-1) \left[\ln \left(\frac{T_i - T_0}{T - T_0} \right) + \ln \left(1 - \frac{T_{n+1-i} - T_0}{T - T_0} \right) \right] \right\} - n \quad (3)$$

با محاسبه آماره AD، اگر معادله $AD > 2,492$ برقرار باشد فرض صفر در سطح اطمینان ۵٪ رد نمی‌شود و شاخص TBF بدون روند است. پس از بررسی وجود روند، گام بعدی برای تأیید فرض توزیع مستقل و یکسان بررسی وجود همبستگی میان داده‌ها است. آزمون

۲-۲- الگو آماری

جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها دو فرایند مهم در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان هستند. شاخص مورد نیاز برای این فرایند در پژوهش مورد نظر زمان بین خرابی است. داده‌ها و اطلاعات خرابی با انجام آزمون‌هایی که در قسمت قبل توضیح داده شد در بازه‌های زمانی مشخص به کمک آزمون‌های شتاب‌یافته به دست آمده و سپس به داده‌های مورد استفاده در این تحلیل برای محاسبه قابلیت اطمینان تبدیل شده 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 میلیتاری-هندبوک، لاپلاس و اندرسون دارلینگ (AD) در بررسی وجود روند استفاده شدند [۲۸-۲۹]. در آزمون میلیتاری-هندبوک روند متغیرها با استفاده از محاسبه شاخص آماری (U) از معادله ۱، محاسبه می‌شود:

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln \left(\frac{T_n}{T_i} \right) \quad (1)$$

که n تعداد وقوع خرابی، T_n زمان آخرین خرابی و T_i زمان خرابی است. در این آزمون فرض صفر (H_0) عدم وجود روند و فرض متقابل (H_1) وجود روند در داده‌ها تعریف می‌شود. اساس این فرض محاسبه آماره (U) به وسیله توزیع کای-۲ با درجه آزادی (n-۱) است.

از جدول توزیع کای-۲ برای تأیید فرض صفر پس از محاسبه آماره (U) برای داده‌ها استفاده می‌شود. اگر مقدار (U) به دست آمده بیشتر از

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (۶)$$

در نهایت با توجه به معادله‌های (۵-۶)، تابع قابلیت اطمینان در معادله (۷) بیان شده است [۳۰]:

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

۳- نتایج و بحث:

جزئیات شش آزمون توضیح داده شده در بخش قبل به همراه نتایج رتبه‌بندی سطح بازوی لنگ‌ها و تخمینی از عمر باقیمانده در جدول ۳ گزارش شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌گردد همه بازوی لنگ‌ها پس از اتمام آزمون‌ها بررسی شدند و کمترین اثری از سایش یا خش ناخنگیر روی سطح آنها مشاهده نشد.

بنابراین از نظر کیفیت سطح رتبه ۱ که معادل ضریب ۲ برای تخمین عمر است، به آنها تخصیص داده شد. همچنین نتایج آزمون‌هایی که به هر دلیلی غیر از خرابی قطعه مورد آزمون، پیش از زمان استاندارد به اتمام رسیده بود معادل آزمون‌های اتمام یافته در نظر گرفته شد.

خودهمبستگی می‌تواند با استفاده از روش تصویری انجام شد. در الگو-سازی قابلیت اطمینان، شاخص TBF استفاده شده است.

تابع قابلیت اطمینان با استفاده از احتمال خرابی که برابر با تابع توزیع تجمعی 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 برابر با یک است و تابع قابلیت اطمینان مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود [۳۰]:

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

تابع چگالی احتمال، مشتق احتمال خرابی یا همان تابع توزیع تجمعی نسبت به زمان است که با $f(t)$ نشان داده می‌شود و مطابق معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (۵)$$

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

جدول ۳: نتایج رتبه‌بندی سطح بازوی لنگ‌ها و تخمینی از عمر باقیمانده

نام آزمون	زمان واقعی آزمون (ساعت)	زمان آزمون (ساعت)	ضریب شتاب یافتگی	مسافت معادل (کیلومتر)	رتبه‌بندی سطح بازوی لنگ‌ها				مسافت تخمینی از عمر باقیمانده (کیلومتر)
					۱	۲	۳	۴	
آزمون دوام	۲۰۰	۳۳۰	۲,۸۰	۱۵۲۰۳۶,۲	۱*	۱	۱	۱	۳۰۴۰۷۲,۴
آزمون دوام سرعت نامی	۱۵۰	۱۶۰	۲,۸۰	۷۶۰۱۸,۱	۱	۱	۱	۱	۱۵۲۰۳۶,۲
آزمون دوام ۸۰۰ ساعت	۸۰۰	۹۰۰			۱	۱	۱	۱	۳۱۲۵۲۲,۸
		۸۰۰			۱	۱	۱	۱	
		۳۵۰	۲,۶۶	۱۵۶۲۶۱,۴	۱	۱	۱	۱	
		۶۰۰			۱	۱	۱	۱	
آزمون دوام تغییر حرارتی	۷۵۰	۳۷۵			۱	۱	۱	۱	۳۸۹۸۱۸,۸
		۸۵۰	۴,۳۲	۱۹۴۹۰۹,۴	۱	۱	۱	۱	
		۷۵۰			۱	۱	۱	۱	
آزمون دوام تند	۲۵۰	۳۱۵			۱	۱	۱	۱	۲۷۹۹۷۴,۷
		۲۵۰			۱	۱	۱	۱	
		۳۵۰	۴,۸۰	۱۳۹۹۸۷,۳	۱	۱	۱	۱	
		۲۶۲			۱	۱	۱	۱	
۲۷۵			۱	۱	۱	۱			
آزمون تشدید	۵۰۰	۵۲۰	۳,۸۲	۲۸۱۱۴۳,۰	۱	۱	۱	۱	۵۶۲۲۸۶,۰

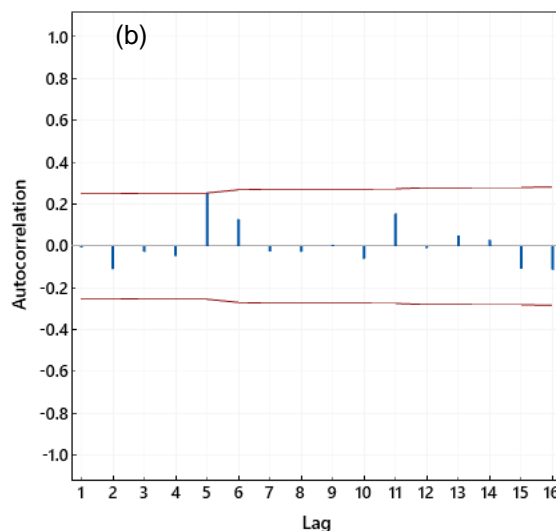
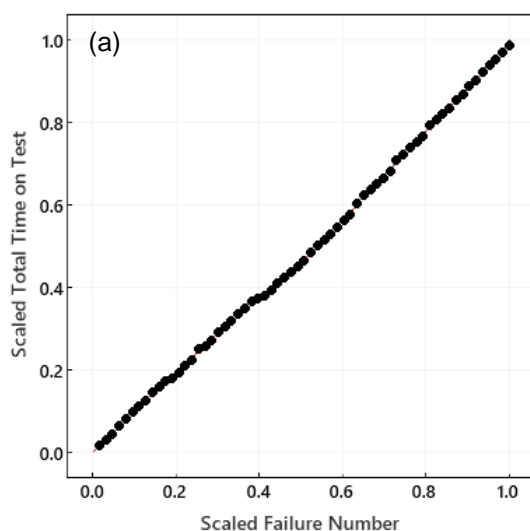
• عدد ۱ مربوط به شرایط کاملاً سالم سطح مقطع بازوی لنگ پس از پایان یافتن آزمون است.

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٪ باشد فرض صفر رد می‌شود [۳۴-۳۱].
چن^۱ و همکاران [۳۵] نیز آزمون عمر شتاب‌یافته را به منظور بررسی طول عمر استوانه‌های بادی^۲ به عنوان یکی از قطعات بسیار کاربردی انجام دادند. در این مطالعه برای بررسی وجود روند بین داده‌های سطح تنش از آزمون اندرسون دارلینگ و با فرض $p - value > 0.05$ استفاده شد.

برای ارزیابی آزمون وجود روند در داده‌های مشاهده شده از آزمون شتاب‌یافته از سه آزمون میلاریتی، لاپلاس و اندرسون دیرلینگ استفاده شد. نتیجه این آزمون‌ها در جدول ۴ بر حسب مسافت پیموده شده تا خرابی را نشان می‌دهد. 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 $p - value > 0.01$ است. این متغیر کوچکترین مقداری از خطای نوع اول (میزان آزمون) است که با فرض درست بودن فرض صفر، آماره آزمون در ناحیه بحرانی قرار می‌گیرد

جدول ۴: نتیجه مقادیر آماره‌های سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون دیرلینگ و کی دو (ارزیابی وجود روند یا تمایل در داده‌های خرابی TBF)

	Trend test		
	MIL-Hdbk-189	Laplace's	Anderson-Darling
Test Statistic	۱۲۵٫۸	-۰٫۳۸	۰٫۱۴
P-Value	۰٫۹۷۷	۰٫۷۰۳	۰٫۹۹۹
DF	۱۲۶		



شکل ۸: نتیجه نمودار TTT برای ارزیابی وجود روند بین داده‌های وقوع خرابی (a) و نمودار همبستگی زمان بین خرابی (b)

بر این اساس می‌توان از الگوهای ریاضی و آماری مرسوم در تخمین قابلیت اطمینان آن می‌توان استفاده کرد. نمودار ارزیابی خودهمبستگی بین وقوع خرابی بر حسب ساعت کارکرد موتور در شکل ۸ (b) نشان داده شده است. بر حسب مقادیر مختلف lag از ۱ تا ۱۶ در آزمون خودهمبستگی، بین زمان‌های مختلف متوالی وقوع خرابی، خودهمبستگی وجود ندارد. تعداد lag ها منظور تأخیر یا فاصله زمانی است که بر اساس تعداد مشاهدات در نظر گرفته شده است [۳۶-۳۷]. بنابراین بین وقوع خرابی‌ها خودهمبستگی مشاهده نشد. بنابراین فرض استقلال بین داده‌های خرابی تأیید می‌شود.

در شکل ۸ (a)، نمودار TTT^3 معادل زمان کل آزمون، برای داده‌های وقوع خرابی با هدف ارزیابی وجود روند بین داده‌ها (فرض مانا و مستقل بودن داده‌ها) آورده شده است. خرابی‌های محتمل در مورد بازوی لنگ در حالت کلی و در مطالعه حاضر ترک، تغییر شکل ناشی از کشش یا فشار، از بین رفتن صافی سطح، شکست ناشی از بارگذاری پیچ، خارج شدن از انطباق پوسته یا تاقان و بوش چشم کوچک اند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، پراکندگی داده‌ها حول خط ۴۵ درجه است. لذا می‌توان ادعا کرد که داده‌های خرابی دارای روند نیستند و فرض مانا و مستقل بودن برای داده‌های خرابی موتور، تأیید می‌شود.

³ Total time on test

¹ Chen

² Pneumatic cylinders

که α ، β و γ بترتیب متغیرهای شکل^۱، مقیاس^۲ و مکان^۳ اند که در مطالعه حاضر بترتیب برابر ۱۱، ۰۹۵، ۳۹۶۹۱ و ۲۹۸۷۹- اند. لازم به ذکر است تابع توزیع احتمال تجمعی و تابع نرخ شکست لوگ-لجستیک بترتیب از معادلات ۹ و ۱۰ قابل محاسبه اند.

$$F(t) = \left[1 + \left(\frac{\beta}{t - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (10)$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha - 1} \left[1 + \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right) \right]^{\alpha - 2}}{1 - \left[1 + \left(\frac{\beta}{t - \gamma} \right) \right]^{-1}} \quad (11)$$

در جدول ۵، نتیجه آماره‌های سه روش کولموگروف-اسمیرنو، اندرسون دیرلینگ و کی دو برای ۱۱ توزیع آماری مرسوم آورده شده است و بر حسب مقادیر آنها رتبه‌بندی شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج سه روش تا حدودی متفاوت از یکدیگر هستند زیرا رتبه‌بندی متفاوتی به دست آمد. اما توزیع آماری لوگ-لجستیک سه‌متغیری انتخاب شد. زیرا از نظر هر سه آزمون در رتبه اول قرار دارد. رتبه‌بندی بر اساس مقدار آماره محاسبه شده برای هر تابع چگالی است. هر چه قدر مقدار آماره محاسبه شده کوچکتر باشد مقدار P-value بزرگتر و تأیید فرض صفر یعنی تبعیت از تابع چگالی مورد ارزیابی بیشتر می‌شود. لذا از تابع چگالی احتمال لوگ-لجستیک سه‌متغیری برای پیش‌بینی وقوع خرابی و قابلیت اطمینان بازوی میل‌لنگ موتور استفاده کرد. این تابع معادل بدین شرح است [۳۸]:

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha - 1} \left[1 + \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right) \right]^{-2} \quad (8)$$

جدول ۵: نتیجه مقادیر آماره‌های سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون دیرلینگ و کی دو

نوع توزیع	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	آماره	رتبه	آماره	رتبه	آماره	رتبه
Log-Logistic (3P)	۰,۲۵۰	۱	۳,۸۴۸	۱	۲,۱۱	۱
Lognormal (3P)	۰,۲۶۴	۲	۴,۵۸۹	۳	۲۵,۴۸۷	۹
Lognormal	۰,۲۷۷	۳	۴,۷۴۶	۵	۱۰,۵۱۲	۳
Weibull (3P)	۰,۲۸۱	۴	۵,۱۵۴	۸	۱۵,۷۵۷	۶
Log-Gamma	۰,۲۸۲	۵	۴,۸۳۹	۶	۱۰,۵۹۶	۴
Normal	۰,۲۹۴	۶	۵,۰۸۲	۷	۲۵,۳۹۰	۷
Log-Logistic	۰,۲۹۵	۷	۴,۶۲۶	۴	۱۱,۴۶۰	۵
Weibull	۰,۲۹۵	۸	۵,۵۳۸	۹	۲۵,۴۳۹	۸
Logistic	۰,۳۰۰	۹	۴,۵۳۶	۲	۲۵,۶۹۱	۱۰
Exponential (2P)	۰,۴۶۶	۱۰	۱۸,۷۴۱	۱۱	۷,۷۱۷	۲
Exponential	۰,۵۱۸	۱۱	۱۸,۶۳۱	۱۰	۸۳,۵۲۳	۱۱

سلک و آقارضی [۳۹] به منظور بررسی قابلیت اطمینان موتور TU5 از توزیع وایبول استفاده کردند. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که قابلیت اطمینان خودرو با در نظر گرفتن این تابع پس از طی ۱۰۰ هزار کیلومتر برابر ۹۴,۷۷٪ خواهد بود. همچنین در این کار تابع نرخ خرابی یا نرخ مخاطره برای موتور مورد نظر ارزیابی شد. لازم بذکر است روش ارزیابی قابلیت اطمینان در این مطالعه بر اساس داده‌های خرابی جمع‌آوری شده از مرکز خدمات پس از فروش برای تولیدات شهریور ۱۳۸۲ تا خرداد ۱۳۸۳ بود.

در شکل ۹، نتیجه مقایسه قابلیت اطمینان محاسبه شده توسط توزیع لوگ-لجستیک سه‌متغیری با مقادیر تجربی حاصل از آزمایش شتاب‌یافته قابل ملاحظه است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب تبیین (R^2) بین دو مجموعه داده قابلیت اطمینان نظری^۴ و تجربی برابر با ۰,۹۹ شده است. همچنین شیب و عرض از مبدا خط بین دو مجموعه داده قابلیت اطمینان نظری و تجربی بترتیب برابر با ۱,۰۷ و ۰,۰۴ است. لذا می‌توان به پیش‌بینی‌های توزیع لوگ-لجستیک سه‌متغیری اطمینان کرد و از آن در پیش‌بینی‌ها استفاده کرد.

³ Location

⁴ Theory

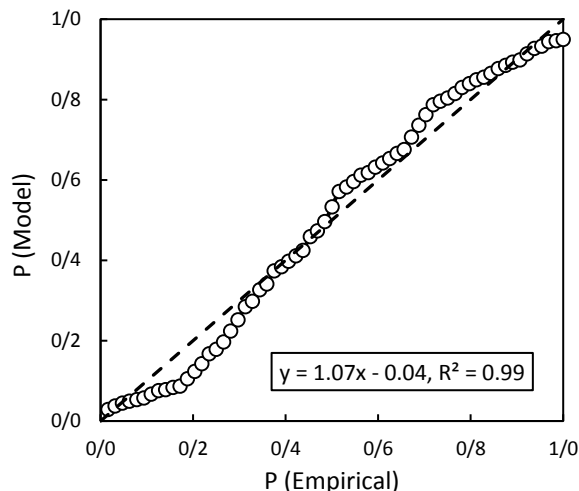
¹ Shape

² Scale

قدرت بترتیب پس از طی ۲۵۳۲۵۲ و ۵۵۵۳۷۱ کیلومتر برابر ۹۰٪ و ۱۰٪ خواهد بود. بررسی نمودار نرخ شکست تجمعی نیز نشان می‌دهد که پس از طی مسافت ۲۵۰ هزار کیلومتر این متغیر با شیب بسیار زیادی شروع به افزایش کرده و با افزایش مسافت این شیب نیز افزایش خواهد یافت. به طوری که در ۱۰۰ هزار کیلومتر آخر چرخه از ۴۵۰ تا ۵۵۰ هزار، نرخ خرابی ۲ واحد افزایش یافت. در حالی که در بازه ۲۵۰ تا ۳۵۰ هزار، این افزایش برابر ۱,۲۴ واحد بود.

کوسزالا^۲ و همکاران [۴۰] با ارزیابی قابلیت اطمینان و نرخ شکست محفظه احتراق موتوری دیزلی نشان دادند اگرچه نرخ شکست تا مسافت ۳۰۰ هزار کیلومتر به آرامی تا ۰,۰۵ افزایش یافته اما پس از آن با شیب تندی تا سطح ۰,۳۵ در مسافت معادل ۴۵۰ هزار کیلومتر قرار خواهد گرفت.

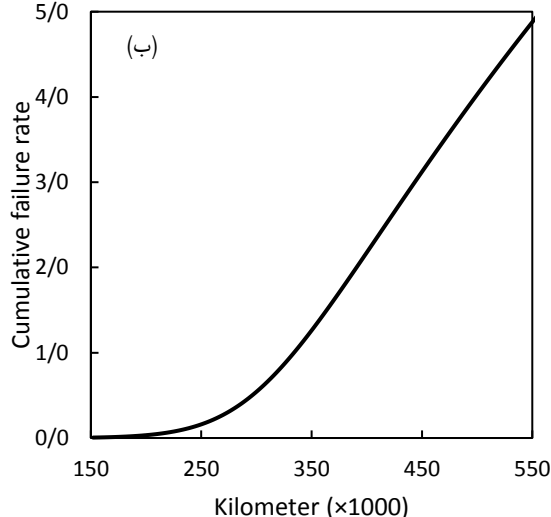
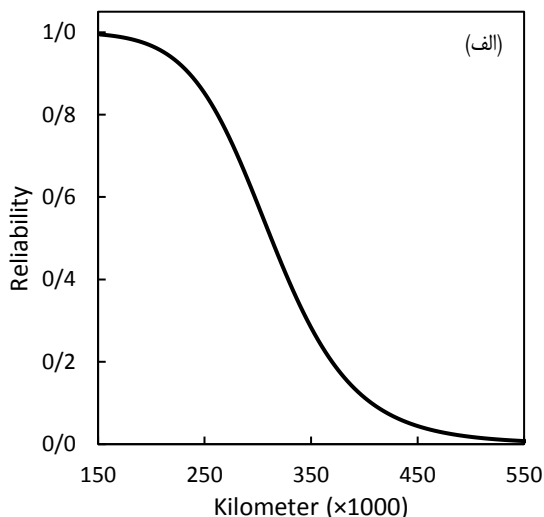
گریتسیوک^۳ و همکاران [۴۱] به روش آزمون شتاب‌یافته به منظور تخمین قابلیت اطمینان پوسته میل‌لنگ مقدار سایش یاتاقان‌های اصلی را بررسی نمودند. در این مطالعه افزایش مقدار پاشش سوخت به منظور افزایش تنش وارد بر میل‌لنگ مدنظر قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که در بازه ۱۳۲۵۰ تا ۱۷۷۸۰ افزایش کمی در سایش یاتاقان‌ها (با بررسی غلظت مواد ناخالصی روغن) مشاهده شد در حالی که از ۱۷۷۸۰ تا ۲۰۶۰۰ غلظت ناخالصی‌ها تا ۱۳,۷ و ۱۵,۸ افزایش یافت و به طور کلی مقدار سایش در شرایط شتاب‌یافته ۱۳ برابر سریعتر از شرایط عادی بوده که این شرایط منطبق با مسافت طی شده ۶۰ هزار کیلومتر است.



شکل ۹: مقایسه مقادیر قابلیت اطمینان تجربی و نظری به کمک توزیع لوگ-لجستیک سه‌متغیری

نتیجه تغییرات قابلیت اطمینان میل‌لنگ موتور و نرخ خرابی تجمعی بر حسب مسافت پیموده شده نیز در شکل ۱۰، نشان داده شده است. این نمودارها بر اساس تابع چگالی لوگ-لجستیک سه‌متغیری با توجه به داشتن بالاترین رتبه در جدول ۵ رسم شده است. مطابق با نتایج در شکل بترتیب قابلیت اطمینان ۹۵، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد در ۲۱۲۷۵۳، ۲۳۴۹۰۶، ۲۶۱۹۸۳ و ۲۸۰۸۵۴ مسافت کارکرد موتور حاصل می‌شود. همچنین در مسافت ۳۱۱۲۱۵، ۴۴۸۲۴۰ قابلیت اطمینان بترتیب به مقادیر ۵۰ و کمتر از ۵ درصد کاهش خواهد یافت.

کوستر و بنج^۱ [۲۴] نشان داد که قابلیت اطمینان موتور بنزینی (بررسی شده در مطالعه موردنظر) با در نظر گرفتن اجزا اصلی در سامانه تولید



شکل ۱۰. تغییرات قابلیت اطمینان بر اساس تابع چگالی لوگ-لجستیک سه‌متغیری (الف) و نرخ خرابی (ب) بازوی لنگ بر حسب کارکرد تجمعی موتور

³ Grytzyuk

¹ Kusters and Masson

² Koszalka

Tests and Reliability Improvement of F3-30 Engine. Proceedings of the ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery. Brussels, Belgium. June 11-14, 1990.

[6] P. Attibele, S. Makam, Y. L. Lee, A comparison of real world and accelerated powertrain endurance cycles for light duty vehicles, Chrysler Group LLC, 2013.

[7] F. Ahdad, C. Beltrami, L. Bernardini, Design of thermal mechanical fatigue accelerated life test criteria, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2008-68209, October 31-November 6, 2008.

[8] S. Mohire, P. Kathale, M. Chaskar, and V. Tendulkar, Development of Accelerated Life Test Schedule for Rig Testing of Live Axles Based on Road Load Data and Its Correlation with Field. Tata Motors Ltd, SAE International 2018-01-0099. 2018.

[9] S. J. Park. S. D. Park. K. S. Kim and J. H. Cho, Reliability evaluation for the pump assembly using an accelerated test. International journal of pressure vessels and piping, Vol. 83, No. 4, pp. 283-286, 2006

[10] S. M. Zaharia, I. Martinescu, Management of accelerated reliability testing, Technical Gazette Vol. 23, No. 5, pp. 1447-1455, 2016

[11] S. M. Zaharia, I. Martinescu, C. O. Morariu, Life time prediction using accelerated test data of the specimens from mechanical element. Maintenance and Reliability, Vol. 14, No. 2, pp. 99-106, 2012

[12] A. Regattieri, A. Casto, F. Piana, M. Faccio, E. Ferrari, Reliability prediction of a mechanical component through accelerated life testing, 24th International Conference on Production Research, ICPR 2017

[13] A. Vaysi, A. Rohani, M. Tabasizadeh, Reliability evaluation of vacume brake booster in automative, the 4th national and 2nd international conference on applied research in electrical, mechanical, mechatronic engineering, malek-ahtar university of technology, 2017.

[14] M. Sadatomi, and H. Ito, A Study of Reliability Evaluation of Main Bearings for Multicylinder Diesel Engines," SAE Int. J. Fuels Lubr, Vol. 9, No. 1, pp. 41-47, 2016

[15] A. Stoyanov. O. Stoyanov and E. Savev, Reliability evaluation and comparative analysis of engines for light-duty vehicles with electronic fuel control systems using pareto approach. Machines. Technologies. Materials., Vol. 8, No. 8, pp. 51-53. 2014

[16] D. Bose. G. Gliosli. K. Maiidal. S.P. Sau, and S. Kuuar. Measurement and Evaluation of Reliability, Availability and Maintainability of a Diesel Locomotive Engine. International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 3, No. 9, 1-18. 2013

[17] Y. Hamano. N. Sagawa and H. Miyata. Reliability evaluation of ceramic rotor for passenger-car turbochargers. J. Eng. Gas Turbines Power Vol. 108,

در سایر مطالعات انجام شده قابلیت اطمینان سامانه خنک کننده و سامانه سوخت رسانی به کمک تحلیل داده‌های خرابی بررسی شده است اما در این مطالعات بررسی قابلیت اطمینان هر یک از اجزا مورد بحث نبوده است. اما با توجه به اینکه سامانه مولد قدرت از اجزا بسیار متفاوتی تشکیل گردیده که معمولاً باید استحکام و قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند و عملکرد این قطعات بسیار تحت تأثیر یکدیگر است. لذا می‌توان با بررسی قابلیت اطمینان اجزای به صورت مجزا یک شاخص کل برای سامانه مولد قدرت ارائه داد. بدین منظور پیشنهاد می‌گردد با بررسی قابلیت اطمینان چهار قطعه اصلی دیگر سامانه مولد قدرت (بستار، میل بادامک، میل لنگ و سنبه) قابلیت اطمینان کلی برای موتور ارائه گردد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با اجرای آزمون‌های شتاب یافته روی موتور دیزل، قطعه بازوی لنگ ارزیابی شد. پس از پایان آزمون با بررسی این قطعه مشخص شد در همه آزمون‌های اجرا شده هیچ گونه خرابی به آن وارد نشده و از نظر سلامت دارای درجه بندی ۱ است. بنابراین با تبدیل زمان آزمون‌ها به مسافت بر حسب کیلومتر و اعمال ضریب شتاب یافتگی آزمون‌ها و اعمال ضریب تخمین عمر با استفاده از تجربه شرکت‌های بزرگ طراحی و ساخت خودرو به ازای هر آزمون (با توجه به تنش اعمالی در آزمون)، عمر بازوی لنگ تخمین زده شد. سپس با استفاده از روش‌های آماری و با در نظر گرفتن اینکه داده‌ها از جنس سانسور از سمت راست بوده‌اند، قابلیت اطمینان بازوی لنگ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد قابلیت اطمینان بازوی لنگ بعد از کارکرد حدود ۲۱۲۷۵۳ کیلومتر به ۹۵ درصد می‌رسد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان، مراتب تشکر و قدردانی خود را از کارکنان شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) بویژه جناب آقایان محمد کاظمی و سعید عبدالملکی اعلام می‌دارند.

مراجع و منابع

- [1] NASA technical standard, "www.standards.nasa.gov/ safety-quality-reliability-maintainability". 2015.
- [2] S. Glasstone, and K. J. Laidler, and H. E. Eyring, The Theory of Rate Processes. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [3] M. B. Carey and R. H. Koenig, "Reliability assessment based on accelerated degradation: a case study," in IEEE Transactions on Reliability, Vol. 40, No. 5, pp. 499-506, 1991
- [4] M. Rezaei, Validation of engine belt tensioners mounting by Accelerated Life Testing. The Journal of Engine Research, No. 55, pp. 13-20, 2019
- [5] H. Yanagihara, A. Tateno, Accelerated Mission

- Quality Technology, Vol. 33, No. 4, pp. 480-492, 2001
- [32] U. Kumar, and B. Klefsjö, Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 35, No. 3, pp. 217-224, 1992
- [33] H. Soltanali, A. Rohani, M.H. Abbaspour-Fard, and J.T. Farinha, 2021. A comparative study of statistical and soft computing techniques for reliability prediction of automotive manufacturing. Applied Soft Computing, Vol. 98, pp. 1-12, 2021
- [34] H. Soltanali, A.H.S. Garmabaki, A. Thaduri, A. Parida, U. Kumar, and A. Rohani. 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, Vol. 233, No. 4, pp. 682-697, 2019
- [35] J. Chen. E. Zio. J. Li. Z. Zeng and C. Bu. Accelerated life test for reliability evaluation of pneumatic cylinders. IEEE Access, Vol. 6, pp. 75062-75075, 2018
- [36] M. Zieja, M. Woch, and J. Tomaszewska, Reliability of the aircraft in the Polish operational aviation. In Safety and Reliability-Safe Societies in a Changing World, pp. 2277-2283, 2018
- [37] G. Liberopoulos, and P. Tsarouhas, 2005. Reliability analysis of an automated pizza production line. Journal of Food Engineering, Vol. 69, No. 1, 79-96, 2005
- [38] S. Sahu, P. Sarkar, and R. Davis, Quantification of uncertainty in compressive strength of fly ash brick masonry. Journal of Building Engineering, Vol. 26, pp. 100843, 2019
- [39] V. Agharazi and B. Salak, measurement of quality index of reliability of TU5 engine, forth international conference of internal combustion engine, Tehran, 2006.
- [40] G. Koszalka. A. Niewczas. and Pieniak, D. Reliability assessment of a truck engine based on measurements of combustion chamber tightness. International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (pp. 995-999). IEEE, 2012.
- [41] O. Grytsyuk. and O. Vrublevskiyi. Method of Accelerated Testing of Crankshaft Shells of the Combustion Engine in the Operating Process. Tribology in Industry, Vol. 41, No. 4, pp. 256, 2019
- No. 3, pp 531-535, 1986
- [18] S. Dutta. D. Kumar and P. Kumar, P, Reliability analysis of defence vehicles gear box assembly under preventive maintenance. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 328-331, 2010
- [19] D. R. Dola, and S. Deshmukh. Reliability Analysis of Cooling System of Diesel Engine. Universal Journal of Mechanical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 57-62, 2015
- [20] S.A. Sanikhani and M. Rezaeian Akbarzadeh, Dynamic Stress Analysis of Bogie Frame and Bolster of General Motors Locomotive GT26CW and Related Reliability Evaluation, MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, 2017.
- [21] A. N. Gots and S. A. Amirseyidov. Analysis of accelerated methods testing piston engine for reliability. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.
- [22] Pulkrabek, W.W, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall. 1997.
- [23] www.weibull.com/basics/fmea
- [24] A, Küsters, and F, Maassen, Specific Durability Testing with FEV Master Program, SAE Technical Paper 2010-01-0922, 2010.
- [25] F. Harada, Outline of IEC62506, International Standard for Accelerated Reliability Testing and Key Points, the 23rd Spring Reliability Symposium of the Reliability Engineering Association of Japan", 2015
- [26] R. Balamurugan, R. Kirubagharan, R. and C. Ramesh, Implementation of lean tools and techniques in a connecting rod manufacturing industry. Materials Today: Proceedings, Vol. 33, pp. 3108-3113, 2020
- [27] W.H. Chen, L. Gao, J. Pan, Q.Ch. He, Design of Accelerated Life Test Plans—Overview and Prospect. Chin. J. Mech. Eng. Vol. 31, No. 1, pp. 1-15, 2018
- [28] C.E. Ebeling, An introduction to reliability and maintainability engineering, Tata McGraw-Hill Education; 2004.
- [29] R. Billinton and R.N. Allan, Reliability evaluation of engineering systems. New York: Plenum press; 1992.
- [30] B. Bertsche, Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability. Springer Science & Business Media. 2008.
- [31] G. Pulcini, 2001. A bounded intensity process for the reliability of repairable equipment. Journal of



Evaluation of reliability of diesel engine connecting rod by accelerated test method

H. Poursabagh¹, A. Rohani^{2*}, M. H. Agkhani³, S. M. Mirsalim⁴, K. Jenab⁵

¹ Ph.D. candidate, Ferdowsi university of Mashhad, poursabagh@um.ac.ir

² Associate professor, Ferdowsi university of Mashhad, arohani@um.ac.ir

³ Professor, Ferdowsi university of Mashhad, aghkhani@um.ac.ir

⁴ Assistant professor, Amir Kabir university of Technology, mo_mirsalim@aut.ac.ir

⁵ Assistant Professor, Morehead State University, k.jenab@moreheadstate.edu

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 May 2021

Accepted: 5 February 2022

Keywords:

reliability

accelerated test method

diesel engine

connecting rod

ABSTRACT

Nowadays, due to the competitive market, quality evaluation criteria at different stages of production are very important. One of these criteria is reliability, which is calculated using statistical evaluations of after-sales service data in most cases or with the help of accelerated tests at the early stage of the product development life cycle. In this research study, various accelerated test scenarios in proportion to the stresses on the diesel engine have been conducted to evaluate the lifetime of the connecting rod parts. The considered criterion for the reliability analysis is the time between failures which is evaluated after collecting and classifying the data using accelerated tests and confirming independent and uniform distribution of data via MIL-Hdbk, Laplace's, and Anderson-Darling functions. Finally, the distribution diagram of reliability at different operating times was drawn using log-logistic statistical distribution, according to the best agreement with the experimental results. The results depicted that the reliability of the connecting rod would be equal to (0.99 @ 177417 hrs.) and (0.95 @ 212753 hrs.) kilometers of cumulative operation, respectively, and after 448240 kilometers it would be less than 0.05.

