



ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان میل لنگ موتور دیزل به کمک آزمون های شتاب یافته

سعید عبدالملکی^{۱*}، عباس روحانی^۲، محمد حسین آق خانی^۳، مرضیه حسین پور^۴، حسین پورصباغ^۵، محمد کاظمی^۶

saeed.abdolmaleki@modares.ac.ir

arohani@um.ac.ir

aghkhani@um.ac.ir

marziyehoseinpoor@yahoo.com

poursabagh@um.ac.ir

m_kazemi@ip-co.com

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس،

^۲ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۴ دانش آموخته دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

^۵ دانش آموخته دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

^۶ دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

امروزه به دلیل رقابت تولیدکنندگان در کیفیت محصولات، معیارهای ارزیابی کیفیت در مراحل مختلف تولید از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشند. یکی از این معیارها، قابلیت اطمینان بوده که در بیشتر موارد از ارزیابی های آماری داده‌های خدمات پس از فروش ناشی از بازگشت قابل توجهی از محصولات و یا به کمک آزمون های شتاب یافته در زمان تولید نمونه محاسبه می‌شود. در این پژوهش با اجرای آزمون های شتاب یافته متنوع، در پنج شرایط متفاوت و متناسب با تنشهای وارده بر روی موتور دیزل، قطعه میل لنگ پس از هر آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص مورد نظر در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در این مطالعه زمان بین خرابی است که پس از جمع آوری و طبقه بندی داده ها به کمک آزمون های شتاب یافته، تایید ماهیت توزیع مستقل و یکسان داده ها به کمک سه آزمون میلیتاری-هندبوک، لاپلاس و اندرسون دارلینگ بررسی گردید. در نهایت نمودار توزیع قابلیت اطمینان میل لنگ در زمان های مختلف کارکرد به کمک توزیع آماری لوگ-لجستیک، با توجه به بهترین تطابق با نتایج تجربی، ترسیم شد. نتایج بدست آمده نشان داد که قابلیت اطمینان میل لنگ به ترتیب برای ۱۴۵۹۵۵ و ۱۸۶۱۵۹ کیلومتر کارکرد تجمعی برابر با ۹۹ و ۹۵ درصد خواهد شد و پس از ۳۵۵۵۹۲ کیلومتر به کمتر از ۱۰ درصد خواهد رسید.

کلیدواژه‌ها: قابلیت اطمینان، آزمون شتاب یافته، موتور دیزل، میل لنگ، توزیع آماری

Evaluation of reliability of diesel engine crankshaft by accelerated test method

Saeed Abdolmaleki^{1*}, Abbas Rohani², Mohammad Hossein Agkhani³, Marziye hoseinpoor⁴, Hosein Poursabbagh⁵, Mohammad kazemi⁶

^{1*} Ph.D. candidate, Tarbiat Modares university

² Associate professor, Ferdowsi university of Mashhad

³ Professor, Ferdowsi university of Mashhad

⁴ Ph.D. graduate, Ferdowsi university of Mashhad

⁵ Ph.D. candidate, Ferdowsi university of Mashhad

⁶ Ph.D. candidate, Tarbiat Modares university

saeed.abdolmaleki@modares.ac.ir

arohani@um.ac.ir

aghkhani@um.ac.ir

marziyehoseinpoor@yahoo.com

poursabagh@um.ac.ir

m_kazemi@ip-co.com

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 crankshaft 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 function. 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 crankshaft would be equal to (0.99@145955 hrs) and (0.95@ 186159 hrs) kilometers of cumulative operation, respectively, and after 355592 kilometers it would be less than 0.05.

Keywords: reliability, accelerated test method, diesel engine, crankshaft



مقدمه

امروزه کارخانجات با فشار بسیار زیادی برای تولیدات جدیدتر با تکنولوژی و بهره‌وری بیشتر در زمان کوتاه، که دارای قابلیت اطمینان و کیفیت بالایی باشند روبرو هستند. الزامات برای قابلیت اطمینان بالاتر نیاز به آزمونهای اولیه برای مواد، تجهیزات و سیستمها را افزایش داده است چراکه قابلیت اطمینان یکی از معیارهای اصلی در تصمیمگیری و برنامه‌ریزیهای مهندسی میباشد. طبق تعریف سازمان هوا و فضای آمریکا قابلیت اطمینان احتمال کارکرد مطلوب یک دستگاه در دوره زمانی معین تحت شرایط کاری مشخص میباشد [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 بدست آمده از نتایج عملکرد محصول در بازار میباشد. این اطلاعات اگرچه فرایند 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 میزان خرابی برگشتی، امکان محاسبه قابلیت اطمینان فراهم گردد. در حالیکه در شرایط بازار رقابتی امروز و نیاز تولید کننده 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 می توان به آزمونهای شتاب یافته و شبیه سازی و تحلیل تنش اشاره نمود. در آزمونهای شتاب یافته با افزایش تنشها سرعت خرابی افزایش پیدا میکند و در مدت زمان کوتاhtری دادههای عمر شتاب یافته جهت محاسبه قابلیت اطمینان در اختیار قرار میگیرد و حتی در خصوص دستگاههای گران-قیمت، روند فرسایش قطعه مورد ارزیابی قرار میگیرد و نیازی به پایان یافتن عمر آن نیست [۳]. بر این اساس تجزیه و تحلیل پارامتر قابلیت اطمینان با استفاده از روش های متفاوت در روند طراحی، ساخت و ارزیابی در صنایع مختلف امروز به شدت مورد توجه است. به طوریکه یکی از مراحل اصلی فرایند توسعه در صنعت خودرو نیز، ارزیابی قابلیت اطمینان و استفاده از آزمونهای شتاب یافته و یا تحلیل تنش بوده که در مورد قطعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در راستای آزمون های شتاب یافته، شرکت های خودروسازی از جمله کوماتسو، فیات و لیلاند آزمون های متفاوتی را با توجه به نوع قطعه طراحی و پیاده سازی کرده اند [۴]. در ادامه به برخی مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان در صنعت خودرو و صنایع نظامی اشاره خواهد شد.

یانگیها و همکاران [۵] قابلیت اطمینان یک موتور F3-30 مربوط به وزارت دفاع ژاپن با استفاده از آزمونهای شتاب یافته بر اساس استاندارد MIL-E-5007D ارزیابی کردند. شتاب یافتگی این

آزمون، مبتنی بر حذف زمانهای عملکردی بود که در آنها تنشهای پیش-بینی شده در FMEA مورد ارزیابی قرار نمیگرفتند. زاهاریا و مارتین [۶-۷] در طی دو مطالعه قابلیت اطمینان پره بالگرد را در آزمون های شتاب یافته 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 بدست آوردند. نتایج آنها نشان می داد که عمر قطعه در شرایط عادی بیش از ۱۲ میلیون چرخه می شود در حالی که در آزمون شتاب یافته به کمتر از ۳ میلیون چرخه میرسد.

آیل و همکاران [۸] از گروه کرایسلر، خرابی در چرخ دنده های جعبه دنده یک خودروی سواری را در شرایط رانندگی واقعی و آزمون شتاب-یافته مقایسه کردند. رضایی [۹] به منظور صحه گذاری پایه تسمه سفت کن موتور از روش آزمونهای عمر شتاب یافته استفاده کرد. در این پژوهش ساعت خرابی قطعه در حالت عادی و زمان عمر شتاب-یافته به کمک روابط قابلیت اطمینان محاسبه گردید. احداد و همکاران [۱۰] با طراحی یک آزمون ترمودینامیکی شتاب یافته بر روی محفظه گردان پرخوران، قابلیت اطمینان را برای سه سال کارکرد بدست آوردند. در این پژوهش صحه گذاری پایه تسمه سفت کن و متعلقات جانبی یک موتور چهار استوانه طی دو آزمون عادی و شتاب-یافته بررسی شد.

کوزالکا و همکاران [۱۱] با استفاده از طراحی دوست تراکم و نشتی قابلیت اطمینان موتور کامیون را بر اساس سختی محفظه احتراق بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که در تست تراکم موتور در مسافت معادل ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر دارای قابلیت اطمینان ۹۰٪ بود و در ۴۵۰۰۰۰ کیلومتر به مقدار ۱۰٪ رسید. در حالیکه در تست نشتی این مقادیر قابلیت اطمینان به ترتیب در ۱۷۵۰۰۰ و ۴۵۵۰۰۰ کیلومتر بدست آمدند.

زنگ و همکاران [۱۲] قابلیت اطمینان میل لنگ در موتور دیزل را به کمک شبیه سازی با نرم افزار انیسس ارزیابی کردند. زاهو و همکاران [۱۳] به کمک مدل دوبعدی تنش و روش مونت کارلو رابطه بین احتمال شکست و تنش کششی متوسط میل لنگ را پیش بینی کردند. همچنین مطالعات دیگری [۱۴-۱۸] برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم ها و قطعات مختلف در موتور دیزل بویژه یاتاقان های اصلی، سیستم سوخت رسانی الکترونیکی، موتور لوکوموتیو دیزل، روتور توربوشارژر موتور سواری، سیستم خنک کاری موتور دیزل، گیربکس و.... انجام شده که بیشتر موارد بر اساس تحلیل داده های خرابی یا تحلیل تنش های دینامیکی است. بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که ارزیابی قابلیت اطمینان قطعات اصلی سامانه مولد قدرت خودرو شامل سمیه، حلقه، استوانه، دریچه ها، میل لنگ و با توجه به زمان و هزینه زیاد مورد نیاز کمتر مورد توجه قرار گرفته است در حالیکه هر کدام از این قطعات بسیار حیاتی بوده و خرابی هر کدام می



عمر محصول در سطح تنشی نرمال بر مبنای اطلاعات در سطوح بالای تنش تخمین زده می‌شود. آزمون های شتاب یافته عمر در حالت کلی چهار دسته تقسیم بندی میشوند [۲۲]:

- ۱- بارگذاری تنش (تنشهای اصلی ثابت، پلکانی و پیشرونده)
 - ۲- توقف آزمون با معیارها شامل سانسور زمان و سانسور شکست
 - ۳- بازرسی عملکرد برای واحد آزمون (بازرسی دوره‌های و بازرسی مداوم)
 - ۴- تعدد تنش های شتاب یافته شامل تنش های منفرد، تنش های مضاعف و تنش های چندگانه
- با توجه به اینکه اطلاعات بدست آمده از این آزمونها بر مبنای دور بر حسب زمان می باشد، دور باید به مسافت طی شده معادل تبدیل شد.
- در ادامه آزمون های طراحی شده در این آزمون به اختصار توضیح داده خواهند شد.

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 میل لنگ بیشترین فشار وارد شده (بیشترین فشار داخل سیلندر) و میل لنگ در حال تراکم شدید قرار می گیرد و در ۷/۵ دقیقه بعدی در همین دور بدون بار کار می کند و دینامومتر موتور را به حرکت در می آورد که بیشترین نیروی لختی (به عبارتی حداکثر تنش های فشاری) به میل لنگ وارد می شود. در این حالت میل لنگ در شرایط کشیدن حداکثری قرار می گیرد. در این آزمون ضریب شتاب یافتگی ۲/۸ در نظر گرفته شد [۲۰].

۲- آزمون ۱۵۰ ساعت (آزمون دوام سرعت نامی)

در این آزمون موتور در دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه تمام بار کار می کند که بیشترین فشار ممکن (بیشترین فشار داخل سیلندر) به میل لنگ وارد می شود به عبارتی حداکثر تنش های فشاری و کششی به قطعه وارد می شود. در این آزمون، میل لنگ به دلیل قرار گرفتن طولانی مدت در فشار بالا، پیش بار پیچ و فشار احتراق مورد بررسی قرار گرفته شد. در این آزمون نیز ضریب شتاب یافتگی برابر ۲/۸ میباشد [۲۰].

۳- آزمون ۸۰۰ ساعت (آزمون دوام ۸۰۰ ساعت)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دور موتورهای 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 کوتاه‌تر شده است. در این آزمون ضریب شتاب یافتگی معادل ۲/۶۶ در نظر گرفته شد [۲۰]. در این آزمون به دلیل کارکردن در همه دورها و بارها، جنس مواد بکار رفته در میل لنگ و کیفیت سطح آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تواند آسیب های جبران ناپذیری را در پی داشته باشد. به عنوان مثال بررسی قابلیت اطمینان میل لنگ، به عنوان عضو اصلی انتقال قدرت از موتور به سیستم انتقال قدرت همواره مورد توجه بوده و داشتن دانش کافی نسبت به عمر مفید، قابلیت اطمینان و همچنین علائم خرابی آن، ضروری است.

در پژوهش حاضر با اجرای آزمونهای شتاب یافته فرسودگی، طراحی شده بر مبنای تنشهای وارده بر روی موتور دیزل، قابلیت اطمینان میل لنگ در موتور دیزل ملی مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است بررسی قابلیت اطمینان میل لنگ در موتور دیزل به کمک آزمون های شتاب یافته و یا داده های خرابی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه این قطعه در قالب شبیه سازی و تحلیل تنش بوده است. طراحی آزمونهای شتاب یافته با الهام از آزمونهای استاندارد شرکتهای بزرگ تولید و تست موتور در محل شرکت ایپکو بوده است.

روش اجرای پژوهش

موتور استفاده شده در این پژوهش با نام تجاری EFD از محصولات اصلی شرکت ایران خودرو بوده و مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین بر مبنای جدول FMEA 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 [۲۱-۱۹].

جدول ۱: مشخصات موتور آزمایش

مشخصه	اطلاعات
مدل	EFD
نوع موتور	چهار زمانه پرخورانی شده
ترتیب استوانه	خطی
تعداد استوانه / حجم موتور	۴ / ۱/۵ liter
قطر استوانه	۸۲/۵ mm
پیمایش سمبه	۷۶ mm
نسبت تراکم	۱۶/۵
بیشینه گشتاور خروجی	۲۵۶ Nm (۱۷۵۰ rpm)
بیشینه توان خروجی	۹۰ kW (۴۰۰۰ rpm)
بیشینه فشار محفظه احتراق	۱۶۵ bar

آزمون های شتاب یافته

همانطور که گفته شد در یک آزمون شتاب یافته عمر، با فرض اینکه حالات و مکانیزم های خرابی محصول مانند شرایط نرمال هستند، نمونهها در سطوح تنشی بالاتر مورد آزمون قرار می گیرند. بنابراین



کیفیت سطح و اندازه انطباق پوسته یاتاقان و بوش چشم کوچک
بررسی می‌شوند [۱۳-۱۲]..

جدول ۲: مشخصات آزمون‌های شتاب یافته استفاده شده

نام آزمون	تنش‌های مورد ارزیابی در آزمون	
	نوع تنش شتاب یافته	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 انطباق پوسته یاتاقان و بوش چشم کوچک
آزمون دوام سرعت بالا	سرعت	خستگی، کیفیت جنس
آزمون تشدید	زمان	لختی جرم

۲-۲- مدل آماری

جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها دو فرایند مهم در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان هستند. شاخص مورد نیاز برای این فرآیند 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 شتاب یافته بدست 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 مورد استفاده قرار گرفت [۲۴-۲۳]. گام بعدی جهت تأیید فرض توزیع مستقل و یکسان بررسی وجود همبستگی میان داده‌ها می‌باشد. آزمون خودهمبستگی با استفاده از روش گرافیکی انجام شد. در مدلسازی قابلیت اطمینان، شاخص TBF مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- محاسبه ضریب شتاب یافتگی

در یک آزمون عمر شتاب یافته، با این فرضیه که حالت های شکست و مکانیزم های شکست محصول، همانند تنش نرمال است، نمونه‌ها در سطوحی با تنش بیشتر از حد نرمال آزمون می‌شوند. سپس تخمین عمر محصول در سطح تنش نرمال، به وسیله استخراج اطلاعات نمونه‌ها در سطوح تنش بالا انجام می‌شود. یک ضریب شتاب یافتگی (AF) باید تعیین شود تا نتایج حاصل از آزمون‌های شتاب یافته به عمر محصول در یک محیط استفاده معمولی تبدیل شود.

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 میل لنگ وارد میگردد و در ۷/۵ دقیقه بعدی در دور آرام بدون بار کار میکند که چون دور موتور به یک باره کم شده و دماها بالاست فشار روغن بسیار کاهش یافته و تنش وارده به یاتاقان‌ها افزایش شدیدی می‌یابد. در این آزمون به دلیل کم شدن ناگهانی روغن، خستگی، جنس ماده میل لنگ و اندازه بزرگتر از اندازه واقعی پوسته یاتاقان و بوش چشمه کوچک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و ضریب شتاب یافتگی ۴/۳۲ می‌باشد [۲۰].

۵-آزمون ۲۵۰ ساعت (آزمون دوام سرعت بالا)

این آزمون خلاصه‌ای از تمامی دوره‌های 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 میل لنگ مورد ارزیابی قرار گرفته و ضریب شتاب یافتگی ۴/۸ می‌باشد [۲۰].

۶-آزمون تشدید

این آزمون به گونه‌ای طراحی شده است که در دوره‌های 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 مودال 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 شتاب یافتگی ۳/۸۲ می‌باشد [۲۰]. پس از پایان یافتن آزمون‌ها سیلندر و سرسیلندر مورد بازرینی قرار گرفتند. شکل ۷ سطح این قطعات پس از اتمام آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۷: بررسی یاتاقان های میل لنگ بعد از آزمون دوام رزونانسی

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 بالا و تشدید با افزایش زمان شرایط تنش‌ها متناسب با ضریب شتاب یافتگی ایجاد گردیده که در آنها تنش‌های مختلفی از جمله فشار احتراق، خستگی، لختی جرم، بارگذاری پیچ، کیفیت جنس،



رخ خواهد داد).

به عبارت دیگر ضریب شتاب یافتگی عبارتست از نسبت تخمینی
تجمع خسارات وارده به قطعه یا سیستم در آزمون شتاب یافته به
تجمع خسارات وارده در استفاده معمولی می‌زند.

Relative damage per hour in Cyclic Load
Test: $DR(c) = \sum \text{hi}(c)di$ (۱)

جدول ۳: نتایج رتبه بندی سطح میل لنگ و تخمینی از عمر
باقیمانده

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

Relative damage per hour in vehicle (duty
cycle): $DR(v) = \sum \text{hi}(v)di$ (۲)

AccelerationFactor= $DR(c)/DR(v)$ (۳)

تابع قابلیت اطمینان با استفاده از احتمال خرابی که تابع توزیع
تجمعی (CDF) است، محاسبه میشود. تابع توزیع تجمعی بیانگر
احتمال زمان تصادفی خرابی T کمتر از زمان عملیاتی t میباشد و
برای قابلیت اطمینان با $F(t)$ نشان داده میشود. سطح زیر منحنی
تابع چگالی احتمال (PDF) برابر با یک و تابع قابلیت اطمینان مطابق
رابطه (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 رابطه (۵) محاسبه میشود.

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

(۵)

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

مجموع تابع قابلیت اطمینان یا احتمال بقای سیستم با تابع توزیع
تجمعی که همان احتمال خرابی است مطابق رابطه (۵) برابر با یک
میباشد.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (۶)$$

در نهایت با توجه به رابطه (۴) و (۵) تابع قابلیت اطمینان در رابطه (۷)
بیان شده است.

(۷)

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

۳-نتایج و بحث:

جزئیات شش آزمون توضیح داده شده در بخش قبل به همراه نتایج
رتبه بندی سطح میل لنگها و تخمینی از عمر باقیمانده در جدول ۳
گزارش شده است.

به همین منظور برای قطعه میل لنگ ابتدا مدهای خرابی بحرانی
قطعه استخراج شده و سپس در داده های سیکل رانندگی این مدهای
خرابی (نقاطی که بیشترین خستگی پیچشی و خمشی در میل لنگ

لازم به ذکر است به منظور تخمین عمر باقیمانده میل لنگها، شرایط
میل لنگ بعد از آزمون به ۵ دسته تقسیمبندی گردید. در این تقسیم-
بندی به میل لنگهایی که در بوش داخلی هیچگونه اثری از خط و



Distribution	Mean	Standard 95% Normal CI		
		Error	Lower	Upper
Weibull	546734	71553	423035	706603
Lognormal	549548	78725	415019	727685
Exponential	545002	136250	333886	889608
Loglogistic	572543	80199	435087	753425
3-Parameter Weibull	543499	72767	418057	706583
3-Parameter Lognormal	544992	71651	404559	685425
2-Parameter Exponential	544996	105798	372523	797321
3-Parameter Loglogistic	551069	75730	402641	699497
Smallest Extreme Value	490799	116611	262245	719353
Normal	545002	72008	403869	686134
Logistic	518051	61727	397068	639034

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

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

در شکل ۸ (a)، 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. خرابی‌های محتمل در مورد میل لنگ در حالت کلی و در مطالعه حاضر ترک، تغییر شکل ناشی از کشش یا فشار، می‌باشند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، پراکندگی داده‌ها حول خط ۴۵ درجه می‌باشد. لذا می‌توان ادعا کرد که داده‌های خرابی دارای روند نیستند و فرض مانا و مستقل بودن برای داده‌های خرابی موتور مورد آزمایش مورد تأیید واقع می‌شود. بر این اساس می‌توان از مدل‌های 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 lag‌ها منظور تاخیر یا فاصله زمانی است که بر اساس تعداد مشاهدات در نظر گرفته شده است [۳۱-۳۰]. بنابراین بین وقوع خرابی‌ها خود همبستگی مشاهده نشد. بنابراین فرض استقلال بین داده‌های خرابی تأیید می‌شود.

در جدول ۵، نتیجه آماره‌های سه روش کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون دیرلینگ و کی دو برای ۱۷ توزیع آماری مرسوم آورده شده است و بر حسب مقادیر آنها رتبه بندی شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج سه روش تا حدودی متفاوت از یکدیگر هستند زیرا رتبه بندی متفاوتی بدست آمد. اما توزیع آماری لوگ-لجستیک

خرابی نبود عدد ۱ (عالی)، خط جزئی عدد ۲ (قابل قبول)، خط عمیقتر 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 گزارشات شرکت های مطرح خودروسازی به ضریب تخمین عمر باقیمانده در مقیاس ۱ تا ۲ و ضرب آنها در عمر بدست آمده از محاسبه نتایج آزمونهای شتاب یافته، امکان تخمین دقیقتری از قابلیت اطمینان را فراهم می‌آورد [۲۰].

برای ارزیابی آزمون وجود روند در داده های آزمون شتاب یافته از آزمون و اندرسون دیرلینگ 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 $p\text{-value} > 0.01$ است. این پارامتر 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 $p\text{-value}$ با سطح معنی داری ۱ یا ۵ درصد مقایسه می‌شود و اگر مقدار $p\text{-value}$ کوچکتر از ۵٪ باشد فرض صفر رد می‌شود [۲۹-۲۶].

Goodness-of-Fit

Distribution	Anderson-Darling	
	(adj)	
Weibull	1.217	
Lognormal	1.188	
Exponential	2.867	
Loglogistic	1.060	
3-Parameter Weibull	1.206	
3-Parameter Lognormal	1.129	
2-Parameter Exponential	1.924	
3-Parameter Loglogistic	1.051	
Smallest Extreme Value	2.190	
Normal	1.410	
Logistic	1.265	

جدول ۴: نتیجه مقادیر اندرسون دیرلینگ برای توزیع های آماری مختلف

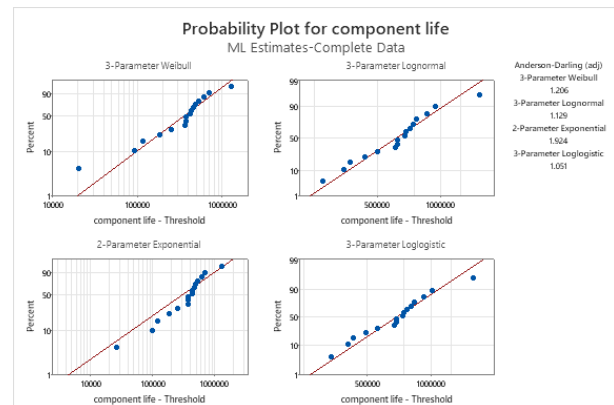


Distributi on	Perce nt	Percenti le	Error	Low er	Uppe r
Weibull	1	62365.8	29660.9	24553.8	15840.7
Lognormal	1	136863	35294.9	82560.7	22688.1
Exponential	1	5477.45	1369.36	3355.6	8940.8
Loglogistic	1	125180	40916.4	65964.9	23755.2
3-Parameter Weibull	1	147046	30455.3	127885	22067.3
3-Parameter Lognormal	1	111519	73970.4	-33459.8	25649.9
2-Parameter Exponential	1	126055	1063.30	123988	12815.7
3-Parameter Loglogistic	1	78728.8	120987	-158400	31585.8
Smallest Extreme Value	1	-1010674	329139	-165577	36557.4
Normal	1	-125058	138621	-396750	14663.4
Logistic	1	-151261	154381	-453841	15132.0
Weibull	5	140479	47155.8	72758.3	27123.2
Lognormal	5	197187	40517.7	131818	29497.3
Exponential	5	27954.9	6988.74	17126.1	45630.9
Loglogistic	5	204746	47993.7	129327	32414.7
3-Parameter Weibull	5	186898	30205.4	136156	25654.9
3-Parameter Lognormal	5	188369	54489.6	81571.4	29516.7
2-Parameter Exponential	5	143509	5426.71	133257	15454.9
3-Parameter Loglogistic	5	187241	73287.8	43599.9	33088.3
Smallest Extreme Value	5	-402329	235374	-863654	58996.0
Normal	5	71233.5	110451	-145246	28771.3
Logistic	5	89172.6	109336	-125123	30346.8
Weibull	10	201075	55563.8	116988	34560.0
Lognormal	10	239565	43308.9	168090	34143.2
Exponential	10	57421.7	14355.4	35178.4	93729.5
Loglogistic	10	255825	50281.9	174037	37604.9
3-Parameter Weibull	10	224868	38464.1	160815	31443.2
3-Parameter Lognormal	10	238956	50896.0	139202	33871.0
2-Parameter Exponential	10	166390	11146.9	145916	18973.7

سه پارامتری انتخاب شد. زیرا از نظر هر سه آزمون در رتبه اول قرار دارد. رتبه بندی 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 تایید فرض صفر یعنی تبعیت از تابع چگالی مورد ارزیابی بیشتر می شود. لذا از تابع چگالی احتمال لوگ-لجستیک سه پارامتری برای پیش‌بینی وقوع خرابی و قابلیت اطمینان میل لنگ موتور استفاده کرد.

در شکل ۹، نتیجه مقایسه قابلیت اطمینان محاسبه شده توسط توزیع لوگ-لجستیک سه پارامتری با مقادیر تجربی حاصل از آزمایش شتاب

یافته را قابل ملاحظه است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب تبیین (R^2) بین دو مجموعه داده قابلیت اطمینان تئوری و تجربی برابر با ۰/۹۹ شده است. بعلاوه به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط بین دو مجموعه داده قابلیت اطمینان تئوری و تجربی برابر با ۱/۰۷ و ۰/۰۴ می‌باشد. لذا می‌توان به پیش‌بینی‌های توزیع لوگ-لجستیک سه پارامتری اطمینان کرد و از آن در پیش‌بینی‌ها استفاده کرد.



شکل ۹: مقایسه مقادیر قابلیت اطمینان تجربی و تئوری به کمک توزیع لوگ-لجستیک سه پارامتری

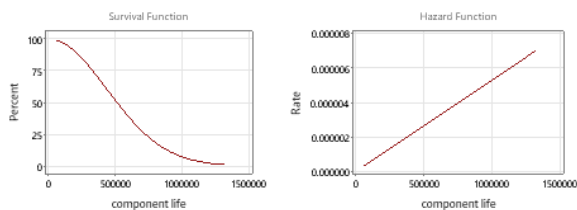
جدول ۵: نتیجه مقادیر آماره‌های سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون دیرلینگ و کی دو

Standar **95%**
d Normal CI



اما پس از آن با شیب تندی تا سطح ۰/۳۵ در مسافت معادل ۴۵۰۰۰۰ کیلومتر قرار خواهد گرفت.

در سایر مطالعات انجام شده قابلیت اطمینان سیستم خنک کننده سیستم سوخت رسانی به کمک تحلیل داده های خرابی بررسی گردیده 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 تاثیر یکدیگر بوده لذا می توان با بررسی قابلیت اطمینان اجزای به صورت مجزا یک شاخص کل برای سامانه مولد قدرت ارایه داد. بدین منظور پیشنهاد میگردد با بررسی قابلیت اطمینان چهار قطعه اصلی دیگر سامانه مولد قدرت (سرسیلند، میل بادامک، شاتون و پیستون) قابلیت اطمینان کلی برای موتور ارایه گردد.



شکل ۱۰. تغییرات (a) قابلیت اطمینان و (b) نرخ شکست تجمعی بر حسب کارکرد تجمعی موتور

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با اجرای آزمونهای شتاب یافته روی موتور دیزل، قطعه میل لنگ مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از پایان آزمون با بررسی این قطعه مشخص شد در همه آزمونهای اجرا شده خرابی مشاهده شده در میللنگها به میزان خراشهای کوچک و سطحی بوده است، از نظر سلامت دارای درجه بندی ۲ میباشد. 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 میللنگ 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 میل لنگ محاسبه شد. نتایج نشان میدهد قابلیت اطمینان میل لنگ بعد از کارکرد حدود ۱۸۶۱۵۹ کیلومتر به ۹۵ درصد میرسد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش به لطف حمایت‌های انجام شده از سوی شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) امکان پذیر شد.

3-Parameter Loglogistic	10	249834	61304.8	129679	36998
Smallest Extreme Value	10	-133669	195791	-	25007
Normal	10	175876	97175.4	-	36633
Logistic	10	198010	91130.2	19397.	37662
Weibull	50	513995	75116.1	385978	68447
Lognormal	50	476055	63772.5	366125	61899
Exponential	50	377767	94441.6	231432	61662
Loglogistic	50	492462	63377.8	382672	63375
3-Parameter Weibull	50	483783	76170.9	355328	65867
3-Parameter Lognormal	50	491201	68933.7	356094	62630
2-Parameter Exponential	50	415138	73333.4	293649	58688
3-Parameter Loglogistic	50	500721	62989.4	377264	62417
Smallest Extreme Value	50	569439	109379	355061	78381
Normal	50	545002	72007.7	403869	68613
Logistic	50	518051	61727.1	397068	63903

نتیجه تغییرات قابلیت اطمینان میل لنگ موتور و نرخ خرابی تجمعی بر حسب مسافت پیموده شده نیز در شکل ۱۰، نشان داده شده است. این نمودارها بر اساس نتایج جدول ۵ رسم شده است. مطابق با نتایج بدست آمده در شکل به ترتیب قابلیت اطمینان ۹۹، ۹۵، ۹۰، ۸۵ و ۸۰ درصد در ۱۴۵۹۵۵، ۱۸۶۱۵۹، ۲۰۶۲۶۱، ۲۱۹۱۸۴ و ۲۲۹۲۳۵ مسافت کارکرد موتور حاصل می‌شود. همچنین در مسافت ۲۷۳۰۳۰ و ۳۸۷۸۹۹ قابلیت اطمینان به ترتیب به مقادیر ۵۰ و کمتر از ۵ درصد کاهش خواهد یافت. کوستر و بنج [۲۰] نشان داد که قابلیت اطمینان موتور بنزینی (بررسی شده در مطالعه موردنظر) با در نظر گرفتن اجزا اصلی در سیستم تولید قدرت به ترتیب پس از طی ۲۵۳۲۵۲ و ۵۵۵۳۷۱ برابر ۹۰٪ و ۱۰٪ خواهد بود.

بررسی نمودار نرخ شکست تجمعی نیز نشان می دهد که پس از طی مسافت ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر این پارامتر با شیب بسیار زیادی شروع به افزایش کرده و با افزایش مسافت این شیب نیز افزایش خواهد یافت به طوریکه در محدوده ۲۵۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ این شاخص تا ۵ واحد افزایش یافت. کوسزالا و همکاران [۳۲] با ارزیابی قابلیت اطمینان و نرخ شکست محفظه احتراق یک موتور دیزل نشان دادند اگرچه نرخ شکست تا مسافت ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر به آرامی تا ۰/۰۵ افزایش یافته



strength interference model. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 7(3), 391-397.

- [14] M. Sadatomi, and H. Ito, A Study of Reliability Evaluation of Main Bearings for Multicylinder Diesel Engines," SAE Int. J. Fuels Lubr. 9(1):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., 8(8), 51-53. 2014
- [16] 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, 3(3): 328-331, 2010.
- [17] D. R. Dola, and S. Deshmukh. Reliability Ananlysis of Cooling System of Diesel Engine. Universal Journal of Mechanical Engineering, 3(2): 57-62, 2015.
- [18] A. Vaysi, A. Rohani, M. Tabasizadeh, Reliability evaluation of vaccume brake booster in automotive, the 4th national and 2nd international conference on applied research in electrical, mechanical, mechatronic engineering, malek-ahtar university of technology, 2017.
- [19] www.weibull.com/basics/fmea
- [20] A. Küsters, and F. Maassen, Specific Durability Testing with FEV Master Program, SAE Technical Paper 2010-01-0922, 2010.
- [21] 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
- [22] W.H. Chen, L. Gao, J. Pan, Q.Ch. He, Design of Accelerated Life Test Plans—Overview and Prospect. Chin. J. Mech. Eng. 31(13): 2018.
- [23] C.E. Ebeling, An introduction to reliability and maintainability engineering, Tata McGraw-Hill Education;2004.
- [24] R. Billinton and R.N. Allan, Reliability evaluation of engineering systems. New York: Plenum press; 1992.
- [25] B. Bertsche, Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability. Springer Science & Business Media. 2008.
- [26] G. Pulcini, 2001. A bounded intensity process for the reliability of repairable equipment. Journal of Quality Technology, 33(4): 480-492, 2001.
- [27] U. Kumar, and B. Klefsjö, Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model. Reliability Engineering & System Safety, 35(3): 217-224, 1992.
- [28] H. Soltanali, A. Rohani, M.H. Abbaspour-Fard., and J.T. Farinha, 2021. A comparative study of statistical and soft computing techniques for

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, 40, (5): 499-506, 1991.
- [4] A. N. Gots, and Sh A. Amirseyidov. Analysis of accelerated methods testing piston engine for reliability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1086. No. 1. IOP Publishing, 2021.
- [5] H. Yanagihara, A. Tateno, Accelerated Mission 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] S. M. Zaharia, I. Martinescu, Management of accelerated reliability testing, Technical Gazette 23: 1447-1455, 2016.
- [7] S. M. Zaharia, I. Martinescu, C. O. Morariu, Life time prediction using accelerated test data of the sspecimens from mechanical element. Maintenance and Reliability, 14 (2): 99-106, 2012.
- [8] 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.
- [9] M. Rezaei, Validation of engine belt tensioners mounting by Accelerated Life Testing. The Journal of Engine Research. 55: 13-20, 2019
- [10] 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.
- [11] G. Koszalka, A. Niewczas, and D. Pieniak, 2012. Reliability assessment of a truck engine based on measurements of combustion chamber tightness. In 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (pp. 995-999). IEEE.
- [12] J. X. ZHENG, L. L. HU, and S. C. YUAN, 2011. Reliability analysis of the diesel engine crankshaft based on APDL. Modern Manufacturing Engineering, 05.
- [13] X. Zhou, and X. L. Yu, 2006. Reliability analysis of diesel engine crankshaft based on 2D stress



- reliability prediction of automotive manufacturing. *Applied Soft Computing*, 98: 1-12, 2021.
- [29] 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*, 233(4): 682-697, 2019
- [30] 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*, 2277-2283, 2018.
- [31] G. Liberopoulos, and P. Tsarouhas, 2005. Reliability analysis of an automated pizza production line. *Journal of Food Engineering*, 69(1): 79-96, 2005
- [32] 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.