

Fatigue life prediction of a rubber engine mount for internal combustion engines

Ali Daraie Nezhad Fard*, Seyed Mohammad Jafari, Abbas Rahi

Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Fatigue Life Prediction
Rubber Engine Mount
Fatigue Damage Evaluation

ABSTRACT

This study aims to present a method for accurately estimating the fatigue life of rubber engine mounts used in internal combustion engines on the basis of fatigue damage evaluation parameters. First, to determine the mechanical properties and establish the constitutive equation of the rubber used in the engine mount, uniaxial tension, uniaxial compression, and planar tension tests were performed, and the Mooney–Rivlin model was employed to describe the hyperelastic behavior of the material. Subsequently, fatigue life tests were conducted on three-dimensional (3D) dumbbell specimens and engine mounts under specified laboratory conditions in order to obtain experimental fatigue life data. Next, the fatigue damage evaluation parameters—including the strain energy density, effective stress, Green–Lagrange principal strain, Euler–Almansi strain, and octahedral shear strain—were computed using the finite element method under loading conditions identical to those of the fatigue life tests for both the 3D dumbbell specimen and the engine mount. Fatigue life estimation models were then developed by fitting a power-law relationship between the calculated parameters and the experimental fatigue life of the 3D dumbbell specimen. Finally, by substituting the computed fatigue damage parameters of the engine mount into the corresponding models, the estimated fatigue lives of the engine mount were obtained and compared with the experimental results. Calculation of the correlation coefficient for each model revealed that the model based on the Green–Lagrange principal strain provides the highest accuracy in predicting the fatigue life of the engine mount.



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

* Corresponding author

E-mail address: ali.daraie.nejad@gmail.com (A. Daraie Nezhad Fard)

Received 2 December 2025; Accepted 16 August 2026
E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Daraie Nezhad Fard A, Jafari SM, Rahi A. Fatigue life prediction of a rubber engine mount for internal combustion engines. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):96-116. doi: [10.22034/ER.2026.2078883.1121](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2078883.1121)

تخمین طول عمر خستگی دسته‌موتورهای لاستیکی موتور درون‌سوز

علی دارایی نژاد فرد*، سید محمد جعفری، عباس رهی

دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

هدف این مقاله ارائه روشی برای تخمین عمر خستگی دسته‌موتورهای لاستیکی موتورهای درون‌سوز بر اساس مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی است. در گام نخست، به‌منظور تعیین خواص مکانیکی و تشکیل معادله ساختاری لاستیک مورد استفاده در دسته‌موتور، آزمون‌های کشش تک‌محوره، فشار تک‌محوره و کشش صفحه‌ای انجام شد و الگوی مونی-ریولین برای توصیف رفتار ابرکشسان ماده به‌کار گرفته شد. سپس، آزمون‌های عمر خستگی تحت شرایط آزمایشگاهی مشخص بر روی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور به‌منظور استخراج داده‌های تجربی عمر خستگی اجرا گردید. در ادامه، مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی شامل چگالی انرژی کرنشی، تنش مؤثر، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانسی-اولر و کرنش برشی هشت‌وجهی با استفاده از روش اجزا محدود و تحت شرایط بارگذاری مطابق با آزمون‌های عمر خستگی برای نمونه دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور محاسبه شدند. سپس با برازش منحنی توزیع توانی بین مؤلفه‌های محاسبه‌شده و عمر خستگی تجربی نمونه دمبلی سه‌بعدی، الگوهای تخمین عمر خستگی تشکیل شدند. در نهایت، با جای‌گذاری مقادیر محاسبه‌شده مؤلفه‌های آسیب خستگی دسته‌موتور در الگوهای متناظر، عمرهای خستگی تخمینی دسته‌موتور به‌دست آمدند و با نتایج تجربی مقایسه شدند. محاسبه ضریب همبستگی برای هر الگو نشان داد که الگوی مبتنی بر کرنش برشی هشت‌وجهی و کرنش اصلی گرین-لاگرانژ بهترین دقت را در پیش‌بینی عمر خستگی دسته‌موتور دارند.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

تخمین عمر خستگی
دسته‌موتور لاستیکی
ارزیابی آسیب خستگی



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

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: ali.daraie.nejad@gmail.com (علی دارایی نژاد فرد)

دریافت ۱۱ آذر ۱۴۰۴؛ پذیرش ۲۵ مرداد ۱۴۰۵

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

Cite this article: Daraie Nezhad Fard A, Jafari SM, Rahi A. Fatigue life prediction of a rubber engine mount for internal combustion engines. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):96-116. doi: 10.22034/ER.2026.2078883.1121

۱- مقدمه

دسته‌موتورهای لاستیکی نقشی اساسی در عملکرد وسایل نقلیه دارند و به‌منظور مهار و جداسازی ارتعاشات محوری و چرخشی پیش‌رانه و نیز کاهش ارتعاشات ناشی از شرایط جاده به‌کار می‌روند. توانایی این قطعات در تحمل کرنش‌های بزرگ بدون بروز تغییر شکل دائمی یا شکست، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب و مهار ارتعاشات در سامانه‌های انتقال نیرو تبدیل کرده است [۱].

این قطعات باید لرزش‌های با بسامد بالای پیش‌رانه را جذب کنند تا میزان سروصدا و ارتعاش در حین رانندگی کمینه شود [۲] و هم‌زمان از انتقال نوسانات با بسامد کم ناشی از ناهمواری‌های جاده جلوگیری نمایند تا اطمینان، دوام خودرو و آسایش سرنشینان افزایش یابد [۳]. با این حال، دسته‌موتورهای لاستیکی در طول زمان به دلیل جوانه‌زنی و رشد تدریجی ترک‌ها یا عیوب داخلی دچار خرابی می‌شوند که به آن شکست خستگی گفته می‌شود [۴].

این پژوهش روشی برای شناسایی ویژگی‌های خستگی دسته‌موتورهای لاستیکی و پیش‌بینی عمر خستگی آن‌ها ارائه می‌دهد، به‌گونه‌ای که اثرات بارگذاری چرخه‌ای از مراحل اولیه طراحی مدنظر قرار گیرد. اگرچه قطعات لاستیکی به‌طور گسترده در صنایع مختلف به‌کار می‌روند و دامنه کاربرد آن‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است، تحقیقات مرتبط با شکست خستگی این قطعات نسبت به قطعات فلزی بسیار محدود باقی مانده است [۵]. از آنجا که این قطعات تحت بارهای ایستایی بزرگ قرار دارند و بارهای چرخه‌ای نیز به مرور زمان بر آن‌ها اعمال می‌شود، توجه به ملاحظات خستگی و ارزیابی دقیق عمر خستگی دسته‌موتور در فرآیند طراحی، برای ارتقای ایمنی و افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برای ارزیابی عمر خستگی دسته‌موتور لاستیکی، الگوهایی برای پیش‌بینی عمر خستگی لاستیک‌ها بر اساس دو رویکرد اصلی جوانه‌زنی ترک و رشد ترک توسعه داده می‌شوند. این دو رویکرد معمولاً به‌طور جداگانه برای دو مرحله متفاوت از فرآیند خستگی به‌کار می‌روند.

در رویکرد رشد ترک، عمر خستگی به‌صورت تعداد چرخه‌هایی تعریف می‌شود که یک ترک از پیش‌موجود نیاز دارد تا زمان شکست رشد کند. در این حالت، نرخ رهایش انرژی کرنشی یا انرژی پارگی معمولاً به‌عنوان مؤلفه ارزیابی آسیب برای توصیف رشد ترک و ایجاد روابط تجربی با عمر خستگی استفاده می‌شود. عمر خستگی بر اساس کاهش سفتی مکانیکی، پیدایش ترک‌های ریز یا پارگی کامل تعریف می‌شود. این روش بر تحلیل کمیت‌های مکانیکی در نقاط مختلف ماده بر پایه مکانیک محیط پیوسته تکیه دارد و محل آغاز ترک نیز بخشی از فرآیند پیش‌بینی محسوب می‌شود. در این رویکرد، عمر ماده معمولاً به‌صورت یک رابطه توانی از کمیت‌های آسیب در نظر گرفته می‌شود.

رویکرد رشد ترک وابستگی شدیدی به هندسه و شکل ترک اولیه دارد، اطلاعاتی که معمولاً برای قطعات لاستیکی در عمل در دسترس نیست. در نتیجه، رویکرد جوانه‌زنی ترک برای مهندسان و طراحان مناسب‌تر است، زیرا تعیین مؤلفه ارزیابی آسیب خستگی بر اساس کمیت‌های تعریف‌شده در هر چرخه، مانند دامنه‌های تنش، کرنش یا انرژی و همچنین مقادیر میانگین و بیشینه انجام می‌شود [۶].

بنابراین، در این پژوهش برای برآورد عمر خستگی دسته‌موتورهای لاستیکی از رویکرد جوانه‌زنی ترک استفاده شده است. مؤلفه ارزیابی آسیب خستگی متعددی برای تخمین عمر خستگی قطعات لاستیکی بررسی شده‌اند. لی و همکاران [۷] در تحلیل‌های خود از کرنش اصلی بیشینه به‌عنوان مؤلفه ارزیابی آسیب استفاده کردند و نتایج پیش‌بینی‌شده تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های خستگی داشت. با این حال، رو [۸] نتیجه‌گیری کرد که کرنش اصلی بیشینه برای یکپارچه‌سازی داده‌های خستگی چندمحوره در لاستیک طبیعی مناسب نیست.

زین و همکاران [۹] نشان دادند که چگالی انرژی کرنشی قادر به پیش‌بینی رفتار لاستیک تحت بارگذاری کششی تک‌محوره و برش خالص است. با این حال، ایوب و همکاران [۱۰] گزارش کردند که این روش نتوانست داده‌های خستگی

چندمحوره مربوط به لاستیک استایرن-بوتادین را به صورت یکپارچه تحلیل کند.

شنگ‌گوان و همکاران [۱۱] و بلخیریا و همکاران [۱۲] بترتیب از کرنش لگاریتمی اصلی بیشینه، کرنش مهندسی، کرنش گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانی-اولر و کرنش برشی هشت‌وجهی استفاده کردند و این معیارها را برای پیش‌بینی عمر خستگی تک‌محوره لاستیک‌های طبیعی و بوتادین-استایرن پر شده با کربن به کار بردند. سپس دقت این پیش‌بینی‌ها از طریق آزمایش‌های خستگی کششی تک‌محوره اعتبارسنجی شد. هر دو پژوهش نشان دادند که متغیرهای خرابی یادشده تخمین‌های بسیار خوبی از عمر خستگی ارائه می‌دهند. با این حال، گروه نخست نتیجه گرفت که همبستگی میان کرنش گرین-لاگرانژ اصلی بیشینه و نتایج تجربی بهترین عملکرد را دارد، در حالی که گروه دوم الگوی مبتنی بر کرنش برشی هشت‌وجهی بیشینه را دقیق‌ترین دانست. تنش مؤثر نیز به عنوان یک متغیر نوین برای ارزیابی آسیب در قطعات لاستیکی، نخستین بار توسط لو [۱۳] معرفی شد و در مطالعه شانگوان و همکاران [۱۴] در مقایسه با روش چگالی انرژی کرنشی و کرنش گرین-لاگرانژ توانست همبستگی بهتری بین پیش‌بینی و نتایج تجربی نشان دهد.

زرین‌قلمی و همکاران [۱۵] با مقایسه دو رویکرد آغاز ترک و رشد ترک، به پیش‌بینی عمر خستگی یک دسته‌موتور لاستیکی خودرو پرداختند. آن‌ها با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی و معیار چگالی انرژی ترک در صفحه بحرانی، نشان دادند که روش آغاز ترک، عمر خستگی و محل آغاز ترک را با دقت مناسبی و در تطابق با نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند.

تویایاس و همکاران [۱۶] یک الگوی چند مؤلفه‌ای برای پیش‌بینی عمر خستگی لاستیک تحت بارگذاری چندمحوره ارائه کردند که ترکیبی از تنش، کرنش و انرژی کرنشی را به عنوان متغیر آسیب در نظر می‌گیرد. نتایج نشان داد که این الگو نسبت به معیارهای تک‌متغیری متداول، دقت بیشتری در پیش‌بینی عمر خستگی دارد.

لیو و همکاران [۱۷] با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی، الگویی برای پیش‌بینی عمر خستگی قطعات لاستیکی توسعه دادند. این الگو بر پایه داده‌های آزمایشگاهی آموزش داده شد و نتایج آن نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به الگوهای تجربی متداول، دقت بالاتری در پیش‌بینی عمر خستگی دارد.

لو [۱۸] معیار تنش کششی مؤثر را برای ارزیابی آغاز ترک در جداگرهای لاستیکی معرفی کرد. این معیار با ترکیب تحلیل اجزای محدود، توانست نواحی بحرانی خستگی را با دقت مناسب پیش‌بینی کند و تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان دهد.

هدف این مقاله، بررسی کارایی پنج مؤلفه ارزیابی آسیب خستگی در پیش‌بینی عمر خستگی نوعی دسته‌موتور لاستیکی مورد استفاده در سامانه پشیرانه و انتقال قدرت خودرو به منظور بهینه‌سازی آن است. این پژوهش با ارائه داده‌های تجربی عمر خستگی برای نمونه‌ها و قطعات و مقایسه الگوهای مختلف پیش‌بینی عمر، درک عمیق‌تری از مکانیک خستگی لاستیک فراهم می‌سازد.

در گام نخست، برای تعیین خواص مکانیکی و استخراج معادله ساختاری لاستیک به کاررفته در دسته‌موتور، آزمون‌های کشش تک‌محوره، فشار تک‌محوره و کشش صفحه‌ای انجام می‌شوند و الگوی مونی-ریولین بر داده‌های حاصل از این سه آزمون برازش می‌گردد تا رفتار ابرکشسان^۱ ماده توصیف شود. سپس، به منظور استخراج داده‌های تجربی عمر خستگی، آزمون‌های عمر خستگی بر روی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور تحت شرایط آزمایشگاهی تعیین شده، اجرا می‌شوند. در ادامه، مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی شامل چگالی انرژی کرنشی، تنش مؤثر، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانی-اولر و کرنش برشی هشت‌وجهی با بهره‌گیری از روش اجزا محدود و تحت شرایط آزمایشگاهی مطابق آزمون‌های عمر خستگی برای نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور محاسبه می‌گردند.

پس از آن، با برازش رابطه توزیع توانی بین مؤلفه‌های محاسبه‌شده و عمر خستگی تجربی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی،

¹ Hyperelastic

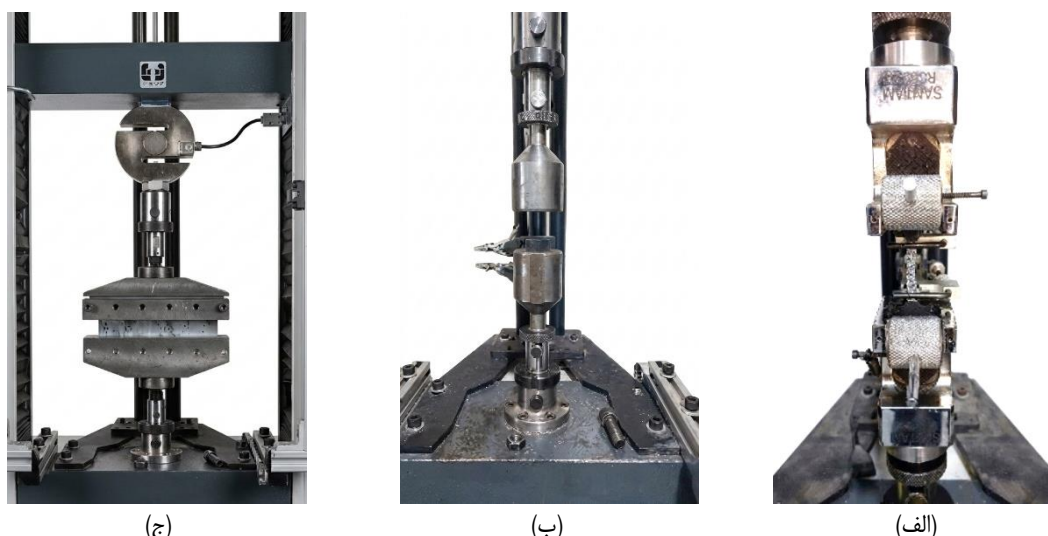
الگوهای تخمین عمر خستگی توسعه داده می‌شوند. در نهایت، با جای‌گذاری مقادیر محاسبه‌شده مؤلفه‌های آسیب خستگی دسته‌موتور در الگوهای متناظر، عمرهای خستگی تخمینی دسته‌موتور به‌دست آمده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند. ضریب همبستگی هر الگو نیز برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها محاسبه خواهد شد.

۲- آزمون‌های پژوهش

برای الگوسازی ساختاری رفتار ابرکشسان لاستیک طبیعی، استفاده از داده‌های حاصل از منحنی‌های تنش-کرنش در حالت‌های مختلف تغییر شکل ضروری است. همچنین برای تعیین ثابت‌های معادلات خستگی و برآورد عمر تجربی دسته‌موتور، انجام آزمون‌های عمر خستگی بر روی نمونه‌های دمبل سه‌بعدی و خود دسته‌موتور الزامی است. در تمامی آزمون‌های این پژوهش، برخی شرایط آزمایشگاهی به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند که یا بر اساس توصیه استانداردهای معتبر تعیین شده‌اند یا از منابع علمی و فنی استخراج گردیده‌اند. به‌منظور اطمینان از کیفیت نمونه‌ها، سطح و لبه‌های آن‌ها از نظر وجود هرگونه خراش یا عیب احتمالی بررسی و سپس در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد و محیطی تمیز و عاری از آلودگی، به مدت حداقل ۲۴ ساعت بدون تماس با یکدیگر نگهداری شدند تا خواص مکانیکی آن‌ها پیش از اجرای آزمون‌ها پایدار شود. برای حذف اثر مولینز و تثبیت خواص مکانیکی، نمونه‌های آزمون‌های کشش تک‌محوره، فشار تک‌محوره و کشش صفحه‌ای پس از نرم‌شدگی تحت سه چرخه بارگذاری و نمونه‌های آزمون خستگی تحت ده چرخه اولیه قرار گرفتند. تمامی آزمون‌ها در شرایط محیطی مهارشده و در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شدند.

۲-۱- آزمون‌های الگوسازی ساختاری ابرکشسان

برای تعیین دقیق ثابت‌های ماده در معادله ساختاری ابرکشسان مونی-ریولین، به داده‌های حاصل از منحنی تنش-کرنش در آزمون‌های کشش تک‌محوره، کشش دومحوره و کشش صفحه‌ای (برش خالص) نیاز است. با این حال، به دلیل عدم دسترسی به دستگاه آزمون کشش دومحوره، اجرای این آزمایش امکان‌پذیر نبود. راهنمای کاربری نرم‌افزار آباکوس [۱۹] آزمون فشار تک‌محوره را به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمون کشش دومحوره در مواد ابرکشسان تراکم‌ناپذیر معرفی کرده است. از جایی که لاستیک طبیعی تقریباً تراکم‌ناپذیر است، در این پژوهش آزمون فشار تک‌محوره به‌جای آزمون کشش دومحوره مورد استفاده قرار گرفت.



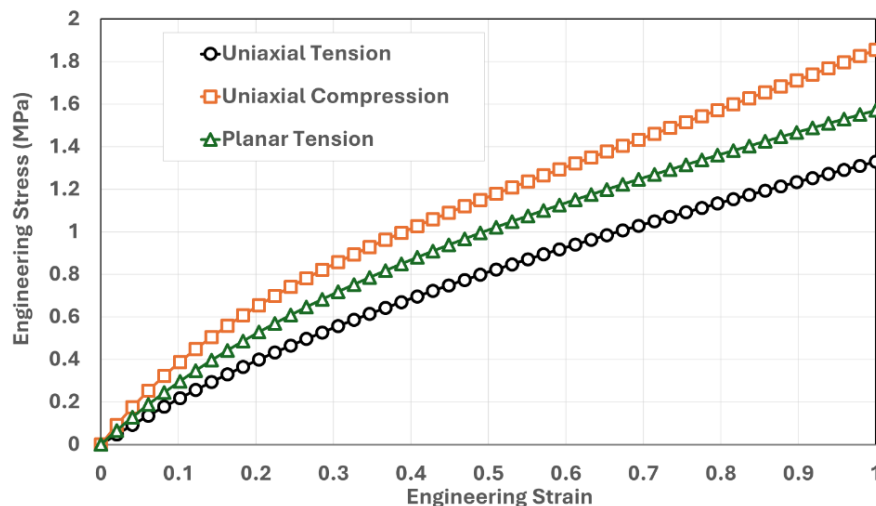
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱ آزمون‌های (الف) کشش تک‌محوره، (ب) فشار تک‌محوره و (ج) کشش صفحه‌ای

این سه آزمون برای نمونه‌های لاستیکی با استفاده از تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱ انجام شدند. کرنش مهندسی با استفاده از کرنش سنج تماسی، حسگر جابجایی خطی^۱ و همچنین دوربین تلفن همراه به عنوان دستگاه اندازه‌گیری کرنش بدون تماس از روی تصویر^۲، بترتیب برای آزمون‌های کشش تک‌محوره (مطابق استاندارد ASTM D412 [۲۰])، فشار تک‌محوره (مطابق استاندارد ASTM D575 [۲۱]) و کشش صفحه‌ای (مطابق استاندارد BS 903-5 [۲۲]) اندازه‌گیری گردید. تنش مهندسی نیز از روی نیروی ثبت شده توسط نیروسنج^۳ و سطح مقطع اولیه (پیش از تغییر شکل) محاسبه شد. داده‌های حاصل از رابطه تنش-کرنش برای ماده لاستیکی مورد مطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.



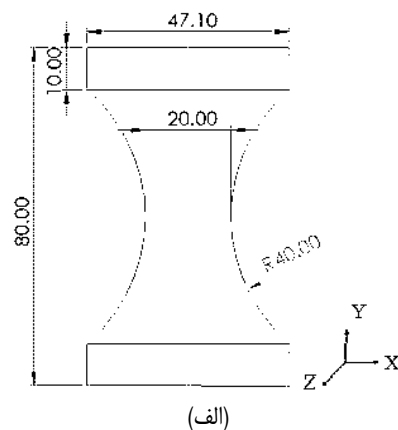
شکل ۲ رابطه تنش-کرنش مهندسی استخراج شده از آزمون‌های کشش تک‌محوری، کشش صفحه‌ای و فشاری تک‌محوری

۲-۲- آزمون‌های عمر خستگی

به منظور ارزیابی عملکرد خستگی دسته‌موتور لاستیکی، از نمونه دمبلی سه‌بعدی (شکل ۳) به عنوان الگوی تحلیلی استفاده شد. دسته‌موتور (شکل ۴-الف) از دو بلوک لاستیکی میان دو لوله فلزی تشکیل شده که سفتی آن با تغییر ابعاد و زاویه بلوک‌ها قابل تنظیم است.



(ب)



(الف)

شکل ۳ نمونه دمبلی سه‌بعدی آزمون عمر خستگی، (الف) ابعاد و (ب) هندسه

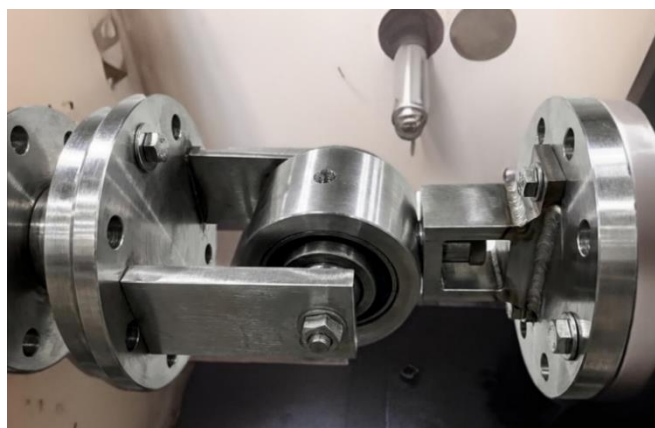
¹ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

² Digital Image Correlation (DIC)

³ Load Cell

در استاندارد KES DA505 شرکت کیا موتورز [۲۳] و استاندارد TB/T 2843 [۲۴] مربوط به مشخصات فنی عمومی قطعات الاستیک راه‌آهن چین، عمر خستگی نهایی زمانی تعریف شده است که سختی استاتیکی دسته‌موتور به میزان ۳۰٪ کاهش یابد؛ این کاهش هرچند به معنای شکست کامل نیست، اما نشانه افت قابل توجه در عملکرد جذب ارتعاش محسوب می‌شود. از آنجاکه این افت مستقیماً با کاهش بار اندازه‌گیری شده در آزمون مرتبط است، چرخه‌ای که در آن کاهش ۳۰ درصدی بار اندازه‌گیری شده مشاهده شود، به‌عنوان عمر نهایی خستگی در نظر گرفته می‌شود. مطابق با رویه‌های رایج در پژوهش‌های پیشین، استانداردهای آزمون خستگی معمولاً به‌صورت مستقیم به کار گرفته نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان چارچوبی برای طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق نیز استاندارد ASTM D4482 [۲۵] به‌عنوان مرجع برای آزمون عمر خستگی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور انتخاب گردید و با بهره‌گیری از سامانه تهویه، دما در محدوده محیطی مهار گردید.

آزمون‌ها با دستگاه عمر خستگی طراحی شده با همکاری شرکت کارن پارت در دو بخش انجام گرفتند: آزمون خستگی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و آزمون خستگی دسته‌موتور. بارگذاری در هر دو آزمون به‌صورت جابجایی سینوسی با بسامد ۵ هرتز در راستای محور Y انجام شد. تفاوت اصلی در نوع فیکسچر بود؛ برای دمبلی از صفحات فلزی و پیچ‌های انتهایی و برای دسته‌موتور از فیکسچر اختصاصی جهت مهار لوله‌ها (شکل ۴) استفاده شد. آزمایش تا افت ۳۰ درصدی نیروی ثبت شده ادامه یافت.



شکل ۴ آزمون عمر خستگی دسته‌موتور

طبق الزامات ASTM D4482 باید شش نمونه برای هر حالت آزمایش شود، اما به دلیل محدودیت زمان و هزینه، تنها سه نمونه دمبلی و یک نمونه دسته‌موتور آزمایش گردید. همچنین به دلیل محدودیت زمانی، آزمون تنها تا رسیدن به حد عمر خستگی 2.6×10^6 چرخه ادامه یافت و پس از آن متوقف شد.

نمونه دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور تحت بارگذاری کششی چرخه‌ای با بسامد ۵ هرتز و نسبت کرنش صفر، مطابق با شرایط مندرج در جداول ۱ و ۲ قرار گرفتند. در اثر کشش متناوب سینوسی، ترک‌هایی شروع به جوانه‌زنی کرده و با گذشت زمان رشد کردند. این فرآیند به کاهش ۳۰ درصدی سفتی مکانیکی و به تبع آن کاهش بار اندازه‌گیری شده منجر شد. تعداد چرخه‌های طی شده تا رسیدن به این نقطه ثبت شده و به‌عنوان عمر خستگی نمونه دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور در جدول ۱ و ۲ گزارش شدند. شکل ۵ نمایانگر ترک‌های قابل رویت در نمونه‌های آزمایشی در چرخه نهایی می‌باشند. شکل ۶-الف نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش مهندسی اعمال شده و میانگین تعداد چرخه‌های منجر به افت ۳۰ درصدی سفتی مکانیکی در سه نمونه دمبلی سه‌بعدی است و شکل ۶-ب نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش مهندسی اعمال شده و تعداد چرخه‌های منجر به افت ۳۰ درصدی سفتی مکانیکی در دسته‌موتور است.

جدول ۱ شرایط بارگذاری و عمر خستگی تجربی آزمون عمر خستگی نمونه دمبلی سه‌بعدی

Load Case	L_0 (mm)	L (mm)	ϵ_E (%)	N_1 (10^6 Cycles)	N_2 (10^6 Cycles)	N_3 (10^6 Cycles)	N_f (10^6 Cycles)
S1	80	84	5	>2.6	>2.6	>2.6	>2.6
S2	80	88	10	>2.6	>2.6	>2.6	>2.6
S3	80	92	15	2.029	2.326	2.034	2.13
S4	80	96	20	1.841	1.788	1.889	1.839
S5	80	100	25	1.393	1.397	1.427	1.406
S6	80	104	30	1.283	1.308	1.377	1.323
S7	80	108	35	1.045	1.086	1.16	1.097
S8	80	112	40	0.85	0.916	0.862	0.876
S9	80	116	45	0.703	0.713	0.882	0.766
S10	80	120	50	0.678	0.706	0.698	0.694
S11	80	124	55	0.535	0.541	0.651	0.576
S12	80	128	60	0.461	0.551	0.516	0.51
S13	80	132	65	0.497	0.477	0.507	0.494
S14	80	136	70	0.38	0.37	0.412	0.387
S15	80	140	75	0.308	0.381	0.368	0.352
S16	80	144	80	0.3	0.316	0.356	0.324
S17	80	148	85	0.306	0.296	0.313	0.305
S18	80	152	90	0.247	0.227	0.279	0.251
S19	80	156	95	0.249	0.229	0.245	0.241
S20	80	160	100	0.226	0.219	0.208	0.218

جدول ۲ آزمون تجربی عمر خستگی نمونه دسته موتور

Load Case	ϵ_E (%)	N_f (10^6 Cycles)
EM1	4	>2.6
EM2	8	>2.6
EM3	12	2.272
EM4	16	1.404
EM5	20	1.276
EM6	24	1.068
EM7	28	0.534
EM8	32	0.257
EM9	36	0.241
EM10	40	0.141

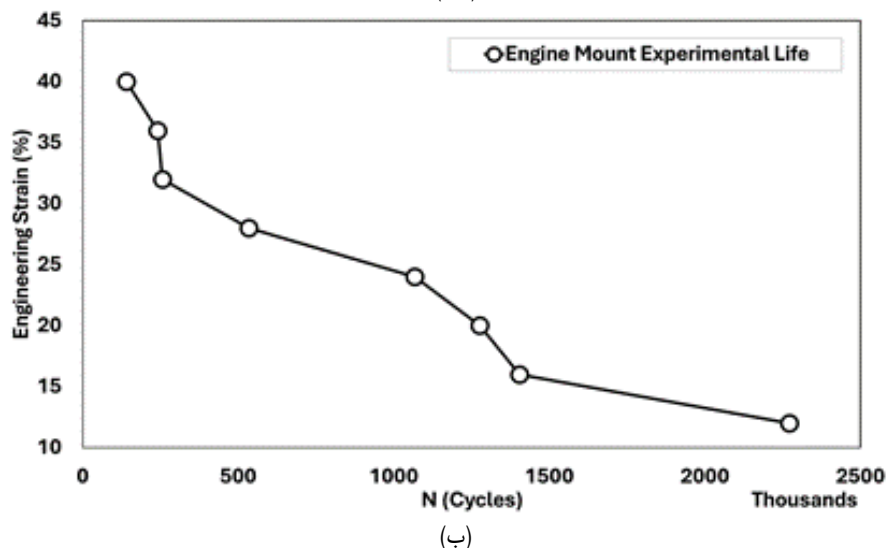
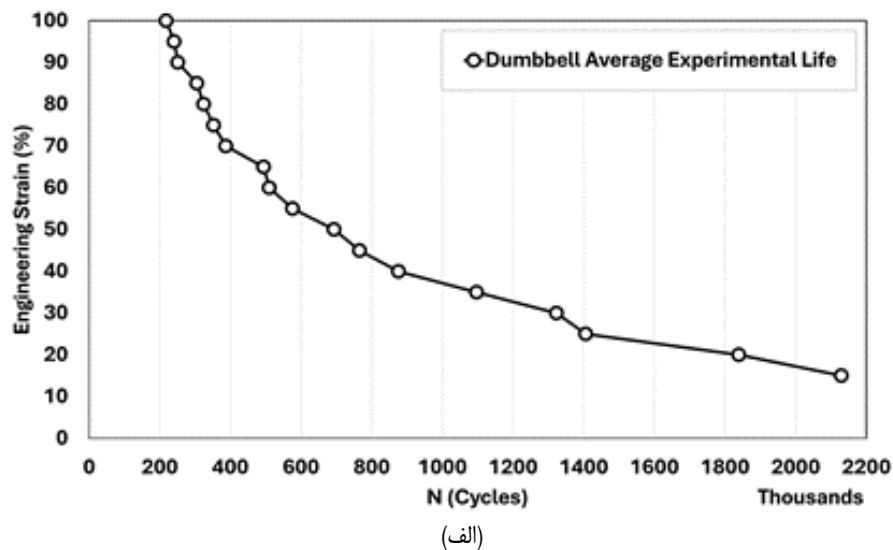


(ب)



(الف)

شکل ۵ ترک‌های قابل رویت در نمونه‌های آزمایشی (الف) دمبل سه‌بعدی و (ب) دسته‌موتور در چرخه نهایی آزمون عمر خستگی



شکل ۶ کرنش مهندسی اعمال شده به تعداد چرخه تا افت ۳۰ درصدی سفتی مکانیکی، (الف) نمونه دمبلی سه‌بعدی و (ب) دسته‌موتور

۳- الگوسازی ساختاری لاستیک

برای تحلیل اجزای لاستیکی به روش اجزای محدود، تعریف دقیق رابطه تنش-کرنش ماده ضروری است. در مواد ابرکشسان، این رابطه معمولاً با استفاده از تابع انرژی کرنشی بیان می‌شود که رفتار غیرخطی ماده را توصیف می‌کند. تعیین متغیرهای این تابع مستلزم استفاده از داده‌های آزمایشگاهی است تا معادله ساختاری ماده با دقت مناسبی شناسایی شود. از متداول‌ترین الگوهای ابرکشسان می‌توان به الگوهای مونی-ریولین، نیو-هوکین، یو، اوگدن، آروودا-بویس و مارلو اشاره کرد.

الگوی نیو-هوکین به دلیل ساختار ساده، عمدتاً برای کرنش‌های کوچک تا متوسط مناسب است، در حالی که الگوهای اوگدن و آروودا-بویس با وجود دقت بالاتر در توصیف کرنش‌های بزرگ، به تعداد بیشتری متغیر ماده و داده‌های آزمایشگاهی گسترده‌تری برای شناسایی ضرایب نیاز دارند. همچنین، الگوهای یو و مارلو نیز قابلیت توصیف رفتار غیرخطی لاستیک را دارند، اما معمولاً به داده‌های آزمایشگاهی کامل‌تر وابسته بوده یا برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل، الگوی مونی-ریولین تعادل مناسبی میان دقت، سادگی و هزینه محاسباتی برقرار می‌کند و قادر است رفتار لاستیک طبیعی را در محدوده وسیعی از کرنش‌ها با تعداد محدودی متغیر و دقت قابل قبول پیش‌بینی کند. از این‌رو، در پژوهش

حاضر از تابع انرژی کرنشی مونی-ریولین [۲۶] برای الگوسازی رفتار لاستیک طبیعی استفاده شده است. پتانسیل انرژی کرنشی این الگو بدین صورت بیان می‌شود:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (۱)$$

که W چگالی انرژی کرنشی است، I_1 و I_2 بترتیب اولین و دومین مؤلفه‌های ناورد تنش-کرنش کوشی-گرین هستند که از کشش‌های اصلی $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ بدست می‌آیند، J دترمینان مشتق تغییر شکل است که برای مواد تراکم‌ناپذیر صفر است و C_{01} و C_{10} ثابت‌های ماده می‌باشند که با برازش معادله (۱) بر داده‌های تجربی آزمون‌های کشش تک‌محوره، فشار تک‌محوره و کشش صفحه‌ای بدست آمدند ($C_{01} = 0.0228$ و $C_{10} = 0.3791$).

۴- الگوسازی عمر خستگی

برای تحلیل رفتار خستگی لاستیک، از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب به‌منظور توصیف تمامی شرایط بارگذاری در قالب یک متغیر یکپارچه استفاده می‌شود [۶]. این رویکرد امکان مقایسه و پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری‌های مشخص را فراهم می‌سازد. رابطه بین عمر خستگی و مؤلفه‌های ارزیابی آسیب را می‌توان به صورت توزیع توانی زیر بیان کرد [۱۴]:

$$N_f = K(P)^b \quad (۲)$$

که N_f نمایانگر عمر خستگی نمونه‌های لاستیکی است، P بیانگر مؤلفه ارزیابی آسیب است. K و b ثابت‌های ماده هستند که با برازش معادله (۲) بر داده‌های عمر خستگی تجربی و مؤلفه‌های ارزیابی آسیب محاسبه شده نمونه دمبلی با روش تمام لگاریتمی تعیین می‌گردند.

۵- مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی

در تحلیل خستگی لاستیک‌ها، هنگام به‌کارگیری کمیت‌های آسیب برای توصیف عمر خستگی، معمولاً تعیین کمیت آسیب خستگی چندمحوره بر پایه متغیرهای تعریف‌شده در هر چرخه، مانند دامنه‌های تنش، کرنش یا انرژی، و همچنین مقادیر میانگین و بیشینه صورت می‌گیرد [۶]. در این پژوهش، پنج کمیت از جنس کرنش، تنش و انرژی به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی آسیب خستگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این کمیت‌ها عبارت‌اند از: چگالی انرژی کرنشی، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانسی-اویلر، کرنش برشی هشت‌وجهی، و تنش مؤثر.

۵-۱- چگالی انرژی کرنشی

چگالی انرژی کرنشی کرنشی نشان‌دهنده میزان انرژی مکانیکی ذخیره‌شده در واحد حجم یک جسم تغییرشکل‌پذیر به‌دلیل تغییر شکل الاستیک آن است و می‌توان آن را به صورت منحصر به فرد بر حسب کشش‌های اصلی بیان کرد. چگالی انرژی کرنشی مستقیماً از خروجی تحلیل قابل استخراج است.

۵-۲- کرنش اصلی گرین-لاگرانژ

یکی دیگر از متغیرهای رایج در تحلیل خستگی قطعات لاستیکی، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ است. بیشینه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ با استفاده از نسبت کشش که از بیشینه کرنش اصلی مهندسی ϵ_E بدست می‌آید ($\lambda = \epsilon_E + 1$)، محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$\epsilon_{GL} = \frac{\lambda^2 - 1}{2} \quad (۳)$$

۵-۳- کرنش آلمانسی-اولر

کرنش آلمانسی-اولر یک معیار کرنش محدود است که در مکانیک پیوسته برای توصیف تغییر شکل استفاده می‌شود. این یکی از تانسورهای کرنش رایج است، اما بر خلاف کرنش گرین-لاگرانژ (که نسبت به حالت مرجع تعریف می‌شود)، کرنش آلمانسی-اولر نسبت به حالت کنونی (تغییر شکل یافته) تعریف می‌شود. کرنش آلمانسی-اولر از نسبت کشش نیز بیان می‌شود [۱۲]:

$$\varepsilon_{AE} = \frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda^2} \quad (4)$$

۵-۴- کرنش برشی هشت‌وجهی

کرنش برشی هشت‌وجهی یک معیار عددی از تغییر شکل انحرافی یک ماده است که از کرنش‌های اصلی محاسبه می‌شود. در واقع، این کرنش کمیت میزان برش یا تغییر شکل یک عنصر ماده را بدون توجه به انبساط یا انقباض حجمی تعیین می‌کند و آن را به یک شاخص عددی مناسب برای تغییر شکل تحت بارگذاری پیچیده تبدیل می‌کند [۱۲]. کرنش برشی هشت‌وجهی از نسبت کشش نیز بیان می‌شود:

$$\varepsilon_{OS} = \frac{\sqrt{2}}{6} \left| \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right| \quad (5)$$

۵-۵- تنش مؤثر

این مفهوم بر پایه این فرض استوار است که آسیب خستگی ناشی از تنش‌های دینامیکی تنها زمانی در ماده ایجاد می‌شود که هر سه مؤلفه تنش‌های اصلی کوشی (اول، دوم و سوم) مقادیر مثبت داشته باشند. برای توصیف این پدیده، تنش مؤثر از طریق یک رابطه جایگزین به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\sigma_{EF} = \sqrt{A_1 \sigma_1^2 + A_2 \sigma_2^2 + A_3 \sigma_3^2} \quad (6)$$

که σ_{EF} نمایانگر تنش مؤثر است، σ_i (برای $i=1,2,3$) بترتیب بیانگر تنش‌های اصلی کوشی اول، دوم و سوم هستند و شرط $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ برقرار باشد، همچنین، ضرایب وزنی A_i (برای $i=1,2,3$) بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$A_i = \begin{cases} 0, & \sigma_i \leq 0 \\ 1, & \sigma_i > 0 \end{cases} \quad i = 1,2,3 \quad (7)$$

۶- محاسبه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی

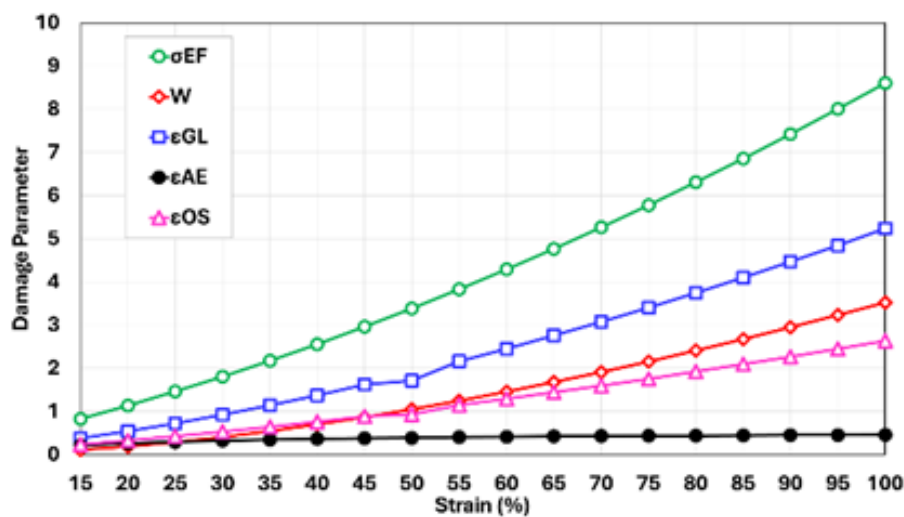
مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی با استفاده از روش اجزا محدود و معادله ساختاری (۱) در نرم‌افزار آباکوس و به زبان برنامه‌نویسی پایتون برای پس‌پردازش، در تمامی مراحل بارگذاری ذکرشده در جدول ۱ برای نمونه دمبلی سه‌بعدی و جدول ۲ برای دسته‌موتور به‌جز بارگذاری‌هایی که منجر به عمر خستگی بیش از 2.6×10^6 شدند، محاسبه گردیدند. نتایج حاصل از این محاسبات برای نمونه دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور بترتیب در شکل ۷-الف و ۷-ب آورده شده است.

۶-۱- محاسبه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی نمونه دمبلی سه‌بعدی

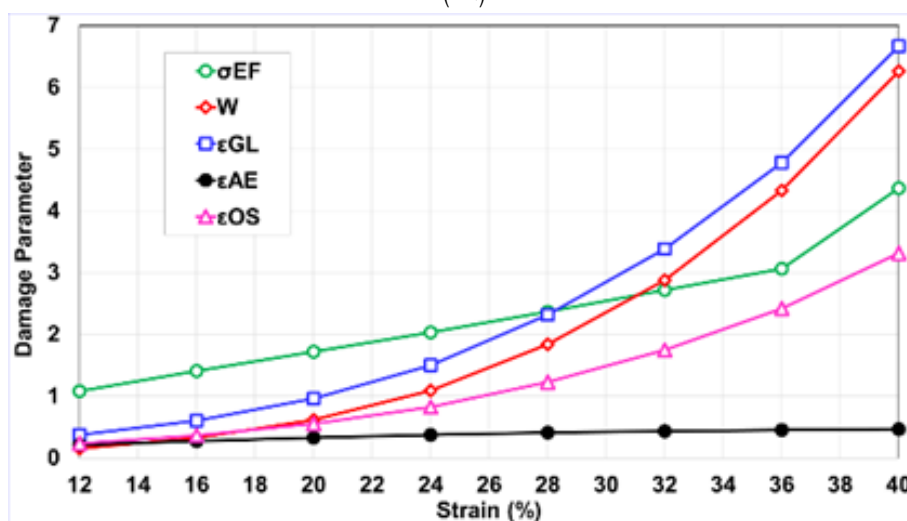
الگوی اجزا محدود نمونه دمبلی سه‌بعدی در شکل ۸ نشان داده شده است. این الگو با اجزاء سه‌بعدی C3D8H دانه‌بندی گردید که شامل ۱۰۶۲ جزء با اندازه دانه ۵ میلی‌متر است.

در این طرح، گره‌های سطح پایینی نمونه مقید شده‌اند و در سطح بالایی نمونه، جابجایی تناوبی سینوسی در راستای محور Y به تمامی گره‌ها اعمال گردید، در حالی که جابجایی در سایر جهات صفر در نظر گرفته شد.

اجزاء C3D8H به‌طور گسترده در تحلیل اجزا محدود لاستیک به‌کار می‌روند، زیرا نوشتن معادلات ترکیبی برای الگوسازی مواد ابرکشسان و تقریباً تراکم‌ناپذیر بسیار مناسب‌اند. در این رویکرد، یک درجه آزادی مستقل فشار معرفی می‌شود که از قفل‌شدگی حجمی جلوگیری می‌کند. عواملی که در قطعات لاستیکی تحت کرنش‌های بزرگ اهمیت بالایی دارند. در مقایسه با اجزاء مرتبه بالاتر، C3D8H تعادلی مناسب میان دقت، پایداری و کارایی محاسباتی برقرار می‌کنند. چگالی انرژی کرنشی (که در نتایج پس‌پردازش با عنوان SENER شناخته می‌شود) مستقیماً از خروجی تحلیل قابل استخراج است. بنابراین، برای محاسبه دیگر مؤلفه‌ها نیاز به انجام محاسبات تکمیلی بر پایه خروجی تحلیل وجود دارد. نسبت کشش در معادله‌های (۳)، (۴) و (۵) با بیشینه کرنش اصلی مهندسی محاسبه می‌شود که در پس‌پردازش تحت عنوان max. principal در زیرشاخه NE قابل مشاهده است، می‌توان بترتیب بیشینه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانی-اولر و کرنش برشی هشت‌وجهی را محاسبه کرد. همچنین، تنش مؤثر (معادله (۶)) را می‌توان با استفاده از تنش‌های اصلی کوشی اول، دوم و سوم، که بترتیب در پس‌پردازش با عناوین max. principal، mid. principal و min. principal در زیرشاخه S در دسترس هستند، محاسبه نمود.

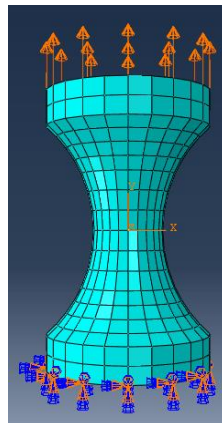


(الف)



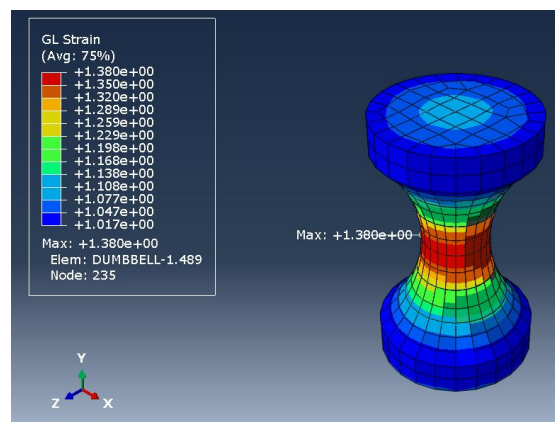
(ب)

شکل ۷ نتایج تحلیل اجزا محدود در محاسبه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب (الف) نمونه دمبلی سه‌بعدی و (ب) دسته‌موتور

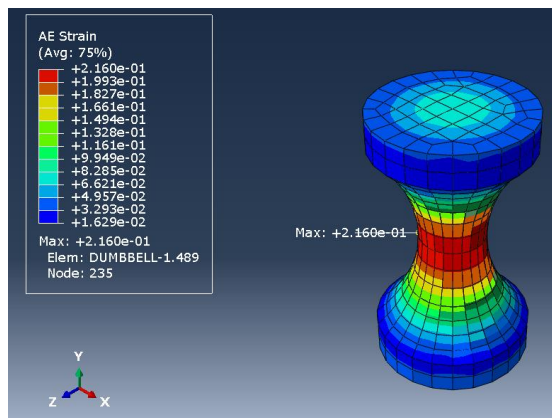


شکل ۸ دانه‌بندی و شرایط مرزی نمونه دمبلی سه‌بعدی

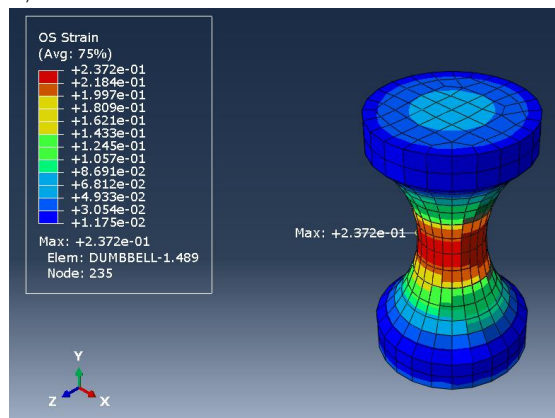
با بهره‌گیری از روش مذکور، کانتورهای مؤلفه‌های ارزیابی آسیب تحت تأثیر هر یک از بارهای خارجی ارائه شده در جدول ۱ استخراج شده‌اند. به‌عنوان نمونه، با در نظر گرفتن بارگذاری S3، کانتورهای مربوط به مؤلفه‌های ارزیابی آسیب برای نمونه دمبلی سه‌بعدی در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌شود، بیشینه مقادیر هر یک از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب در ناحیه میانی نمونه متمرکز شده است. این یافته تأیید می‌کند که ترک‌های خستگی معمولاً در مناطقی پدید می‌آیند که بیشترین مقدار متغیرهای آسیب مشاهده می‌شود. این نواحی به‌طور معمول به‌عنوان نقاط بحرانی شناخته می‌شوند.



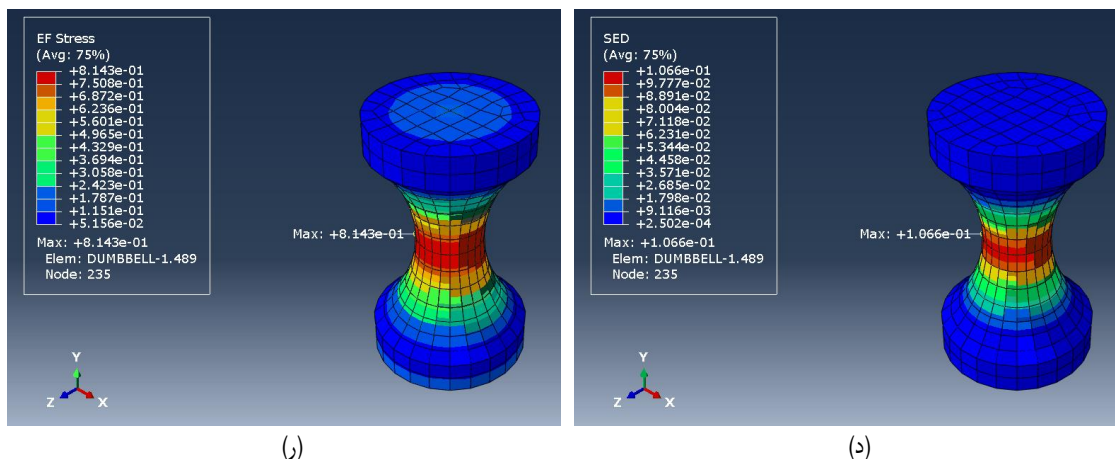
(الف)



(ج)



(ب)

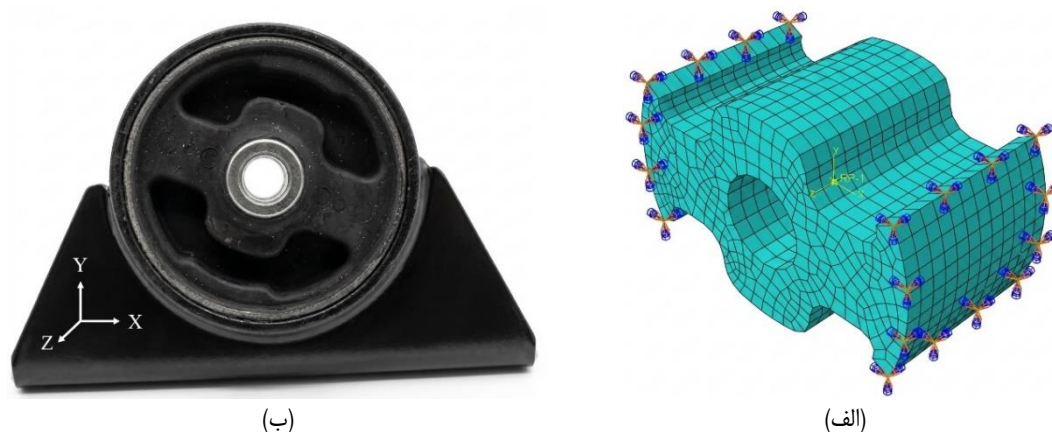


شکل ۹ مؤلفه‌های ارزیابی آسیب نمونه دمبلی سه‌بعدی تحت بارگذاری S3 از روش اجزا محدود. الف) بیشینه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، ب) کرنش برشی هشت‌وجهی، ج) کرنش آلمانی-اویلر، د) چگالی انرژی کرنشی، ر) تنش مؤثر

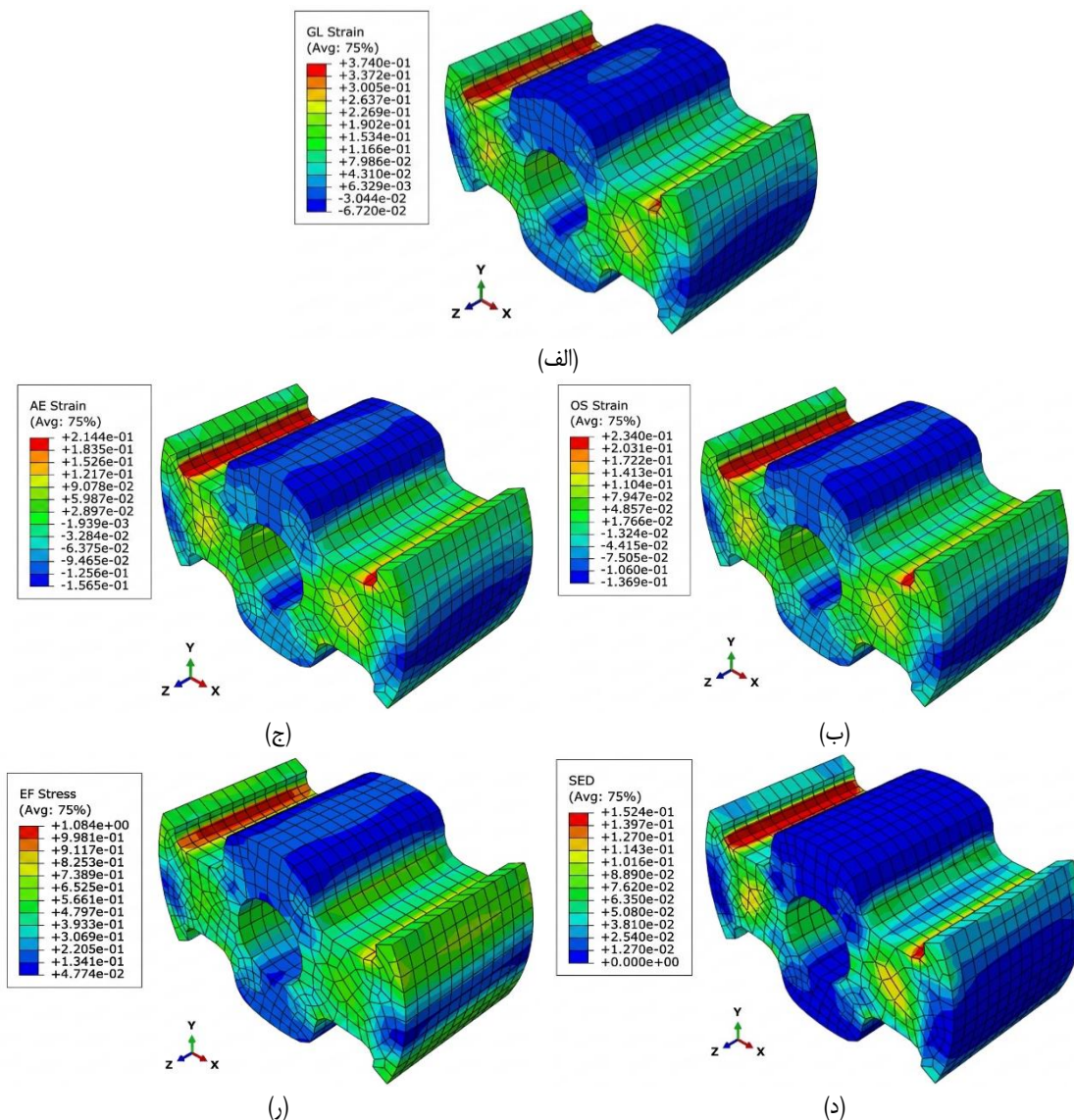
۶-۲- محاسبه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی دسته‌موتور

برای تعیین مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی در دسته‌موتور لاستیکی تحت بارهای چرخه‌ای، یک طرح اجزا محدود برای دسته‌موتور ایجاد شد. اجزای محدودکننده دسته‌موتور از جمله اجزای فلزی و پخ‌های تزئینی از الگو حذف شده‌اند که این کار باعث افزایش سرعت محاسبات و ساده‌تر شدن دانه‌بندی می‌شود، فرض بر این است که این اجزا در آزمایش‌های خستگی تحت بار دینامیکی قرار نمی‌گیرند و با فنرهای لاستیکی برهم‌کنش ندارند. الگو شامل ۳۱۵۶ جزء C3D8IH است. در جزء C3D8IH، حرف I نشان‌دهنده حالت عدم سازگاری است. این نوع جزء، نسخه پیشرفته‌تری از جزء هشت‌گره‌ای خطی (C3D8H) محسوب می‌شود که با افزودن توابع شکل ناسازگار طراحی شده تا از بروز پدیده قفل‌شدگی برشی در تغییرشکل‌های بزرگ جلوگیری کند. این ویژگی باعث می‌شود جزء C3D8IH بتواند با دقت بالاتر و بدون سخت‌شدگی مصنوعی، رفتار مواد نرم و تقریباً غیرقابل فشردگی مانند لاستیک را شبیه‌سازی کند. اندازه دانه ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

نقاط بحرانی، تحت بارگذاری EM3 (جدول ۲) یعنی مکان‌هایی با بیشینه مقدار مؤلفه‌های ارزیابی آسیب، به‌عنوان محل آغاز ترک پیش‌بینی شده بر اساس هر یک از پنج مؤلفه ارزیابی آسیب برای دسته‌موتور لاستیکی در شکل ۱۱ مشخص شده‌اند. از این شکل‌ها مشاهده می‌شود که نقاط بحرانی تعیین شده توسط همگی مؤلفه‌های ارزیابی آسیب با یکدیگر منطبق بوده و محل آغاز ترک به درستی پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۰ الف) دانه‌بندی و شرایط مرزی دسته‌موتور، ب) دسته‌موتور مورد پژوهش



شکل ۱۱ مؤلفه‌های ارزیابی آسیب دسته‌موتور تحت بارگذاری EM3 از روش اجزا محدود. (الف) بیشینه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، (ب) کرنش برشی هشت‌وجهی، (ج) کرنش آلمانسی-اوایلر، (د) چگالی انرژی کرنشی، (ر) تنش مؤثر

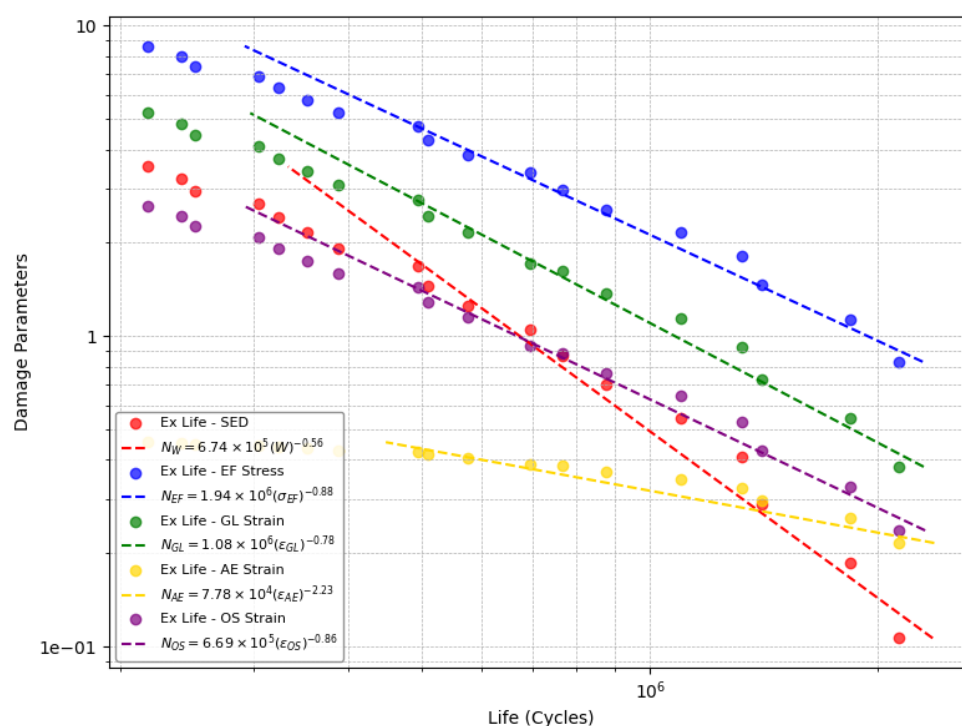
۷- الگوهای تخمین عمر خستگی

پس از محاسبه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی برای نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی در هر بارگذاری و استخراج عمر خستگی تجربی مطابق جدول ۱، هر یک از این مؤلفه‌ها در برابر عمر خستگی تجربی قرارداد می‌شوند. داده‌ها به مقیاس لگاریتمی منتقل شده و معادله (۲) بر آن‌ها برازش می‌شود. متغیرهای K و b که بترتیب عرض از مبدأ و شیب خط برازش شده هستند، برای هر خط استخراج می‌شوند و بر اساس آن‌ها الگوهای تخمین عمر خستگی مبتنی بر مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی ساخته می‌شوند. الگوهای تخمین عمر خستگی به صورت جدول ۳ هستند.

برازش معادله (۲) بر داده‌های عمر خستگی تجربی و مؤلفه‌های ارزیابی آسیب نمونه دمبلی در شکل ۱۲ همراه با ضریب همبستگی داده‌های عمر خستگی تجربی با عمر خستگی محاسبه شده نمونه‌های دمبلی با الگوها نمایش داده شده است.

جدول ۳ الگوهای تخمین عمر خستگی

معادله ریاضی	الگوی تخمین عمر خستگی
(۸)	$N_W = 6.74 \times 10^5 (W)^{-0.56}$
(۹)	$N_{EF} = 1.94 \times 10^6 (\sigma_{EF})^{-0.88}$
(۱۰)	$N_{GL} = 1.08 \times 10^6 (\varepsilon_{GL})^{-0.78}$
(۱۱)	$N_{AE} = 7.88 \times 10^4 (\varepsilon_{AE})^{-2.23}$
(۱۲)	$N_{OS} = 6.69 \times 10^5 (\varepsilon_{OS})^{-0.86}$



شکل ۱۲ برازش معادله (۲) بر داده‌های عمر خستگی تجربی و مؤلفه‌های ارزیابی آسیب نمونه دمبلی

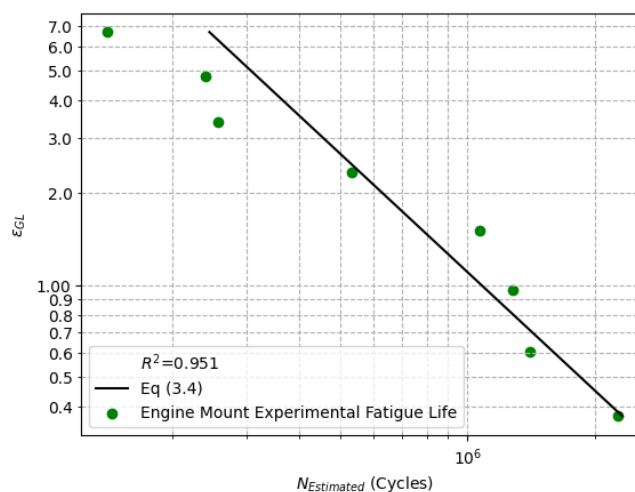
نتایج محاسبه ضریب همبستگی بین عمرهای تخمینی خستگی و عمر تجربی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی نشان می‌دهد که کرنش برشی هشت‌وجهی، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ و تنش مؤثر دارای ضریب همبستگی ۰.۹۸، کرنش آلمانسی-اولیور ۰.۸۸ و چگالی انرژی کرنشی ۰.۹۶ هستند، که این مقادیر دقت بالای الگوهای تخمین عمر خستگی در برازش داده‌های نمونه دمبلی و قابلیت اطمینان آن‌ها در پیش‌بینی عمر خستگی را تأیید می‌کنند.

۸- تخمین عمر خستگی دسته‌موتور

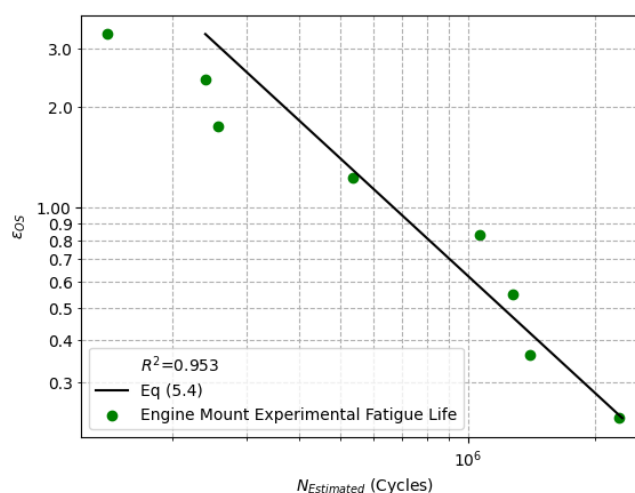
با استفاده از الگوهای تخمینی عمر خستگی (جدول ۳)، عمر خستگی دسته‌موتور لاستیکی محاسبه می‌شوند. عمر اندازه‌گیری‌شده دسته‌موتور تحت هر بار نیز در این جدول برای مقایسه با عمر تخمینی اضافه شده است. برای مقایسه واضح‌تر عمر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده، شکل ۱۳ همبستگی بین عمر اندازه‌گیری‌شده و عمرهای پیش‌بینی‌شده با استفاده از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی (R^2) نیز به عنوان شاخص دقت الگوهای تخمینی نسبت به داده‌های تجربی در شکل ۱۳ برای هر الگوی ارائه شده است.

از نتایج محاسبه ضریب همبستگی بین هر یک از عمرهای خستگی تخمینی بر پایه مؤلفه‌های مختلف ارزیابی آسیب خستگی و عمر خستگی تجربی دسته‌موتور می‌توان مشاهده کرد که کرنش برشی هشت‌وجهی بیشترین مقدار ضریب همبستگی (۰.۹۵۳) را دارد و در تخمین عمر خستگی دسته‌موتور و پیش‌بینی محل شروع ترک بهترین دقت را از خود نشان می‌دهد. کرنش اصلی گرین-لاگرانژ پس از آن، با اختلاف اندک و مقدار ضریب همبستگی ۰.۹۵۱، در رتبه دوم قرار می‌گیرد. در ادامه، کرنش آلمانسی-اوایلر با ضریب ۰.۸۷۶، چگالی انرژی کرنشی با ضریب ۰.۸۶۶، و در نهایت تنش مؤثر با ضریب همبستگی ۰.۷۳۷. بترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.

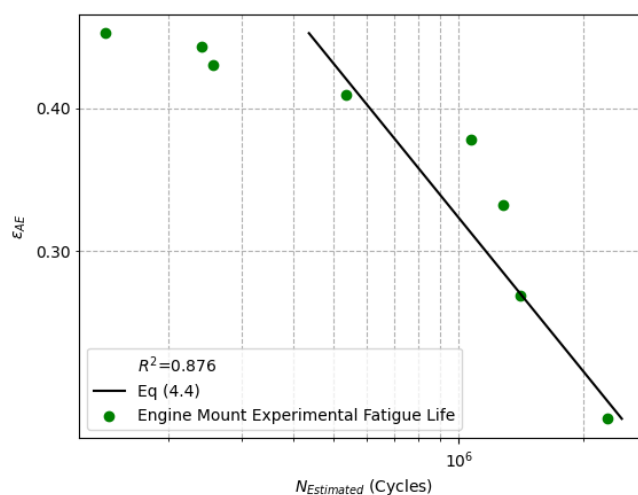
شایان ذکر است که از تنش و ن مایسیس، که بر پایه تنش‌های اصلی کوشی محاسبه می‌شود، نیز به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی استفاده شد. با این حال، تحلیل نتایج نشان داد که این مؤلفه توانایی پیش‌بینی عمر خستگی را در بازه‌ای قابل قبول نداشته و ضریب همبستگی با مقدار منفی آن بیانگر این است که افزایش کرنش نه تنها منجر به کاهش عمر خستگی در الگوی محاسباتی نشد، بلکه در برخی موارد با افزایش ظاهری عمر خستگی همراه بود، که نشان‌دهنده عدم انطباق فیزیکی و آماری این معیار با رفتار واقعی ماده است.



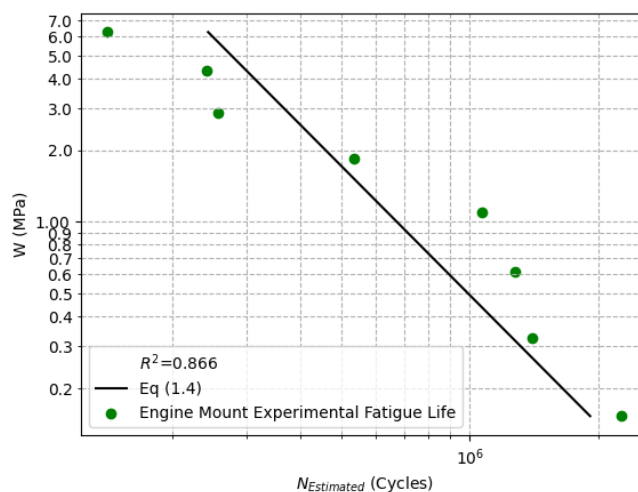
(الف)



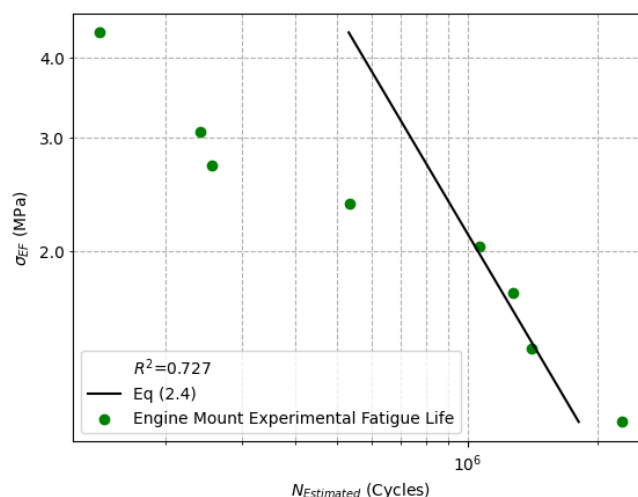
(ب)



(ج)

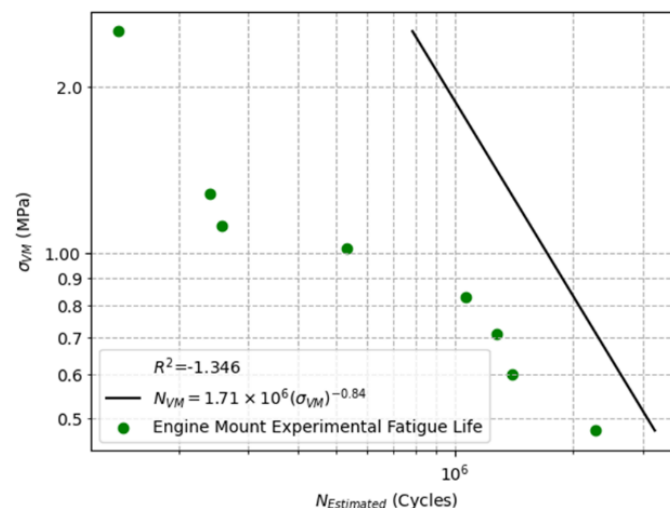


(د)



(ر)

شکل ۱۳ همبستگی بین عمر اندازه‌گیری شده و عمرهای پیش‌بینی شده با استفاده از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب الف) بیشینه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، ب) کرنش برشی هشت‌وجهی، ج) کرنش آلمانسی-اوایلر، د) چگالی انرژی کرنشی، ر) تنش مؤثر



شکل ۱۴ همبستگی بین عمر اندازه‌گیری‌شده و عمرهای پیش‌بینی شده با استفاده از مؤلفه‌های ارزیابی آسیب تنش ون مایسیس

نتایج به‌دست‌آمده برای کرنش برشی هشت‌وجهی و کرنش اصلی گرین-لاگرانژ به‌عنوان مؤلفه ارزیابی آسیب، با مطالعات بلخریا و شنگ‌گوان و همکاران [۱۱، ۱۲] مطابقت دارد که ضریب همبستگی الگوهای تخمینی مبتنی بر کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش برشی هشت‌وجهی و کرنش آلمانسی-اوایلر را بالای ۰.۹ گزارش کرده‌اند. با این حال، در مقایسه با مطالعه شنگ‌گوان [۱۴] روی دسته‌موتور، تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. به‌طور مثال، ضریب همبستگی الگوی تخمینی بر پایه کرنش اصلی گرین-لاگرانژ حدود ۱۴٪ کمتر، الگوی مبتنی بر چگالی انرژی کرنشی حدود ۸٪ کمتر و الگوی مبتنی بر تنش مؤثر حدود ۱۴٪ بیشتر از این پژوهش است که می‌تواند ناشی از اعمال بارگذاری چندمحوره با نسبت‌های کرنش متفاوت باشد.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به دقت بالای بیش از ۹۰٪ الگوهای تخمینی مبتنی بر کرنش برشی هشت‌وجهی و کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، استفاده از این دو الگو می‌تواند در کاهش قابل توجه تعداد آزمایش‌های میدانی روی قطعات لاستیکی مؤثر باشد، که علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، فرایند بهینه‌سازی طراحی و تحلیل دوام قطعات را نیز تسهیل می‌کند.

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی برای تخمین دقیق عمر خستگی دسته‌موتورهای لاستیکی در موتورهای درون‌سوز بر پایه مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی ارائه شد. در ابتدا، برای تعیین خواص مکانیکی و تدوین معادله ساختاری لاستیک مورد استفاده در دسته‌موتور، آزمون‌های کشش تک‌محوره، فشاری تک‌محوره و کشش صفحه‌ای انجام گرفت و الگوی مونی-ریولین برای توصیف رفتار ابرکشسان ماده به‌کار گرفته شد. سپس، آزمون‌های عمر خستگی، تحت شرایط آزمایشگاهی مشخص بر روی نمونه‌های دمبلی سه‌بعدی و دسته‌موتور اجرا شد تا داده‌های تجربی عمر خستگی استخراج گردند. در ادامه، مؤلفه‌های ارزیابی آسیب خستگی شامل چگالی انرژی کرنشی، تنش مؤثر، کرنش اصلی گرین-لاگرانژ، کرنش آلمانسی-اوایلر و کرنش برشی هشت‌وجهی با بهره‌گیری از روش اجزا محدود و تحت شرایط بارگذاری منطبق با آزمون‌های خستگی محاسبه شدند. سپس با برازش رابطه توزیع توانی میان مؤلفه‌های محاسبه‌شده و عمر خستگی تجربی نمونه دمبلی سه‌بعدی، الگوهای تخمین عمر خستگی استخراج گردیدند. در نهایت، با جای‌گذاری مقادیر محاسبه‌شده مؤلفه‌های آسیب خستگی دسته‌موتور در الگوهای متناظر، عمرهای خستگی تخمینی به‌دست آمدند و با داده‌های تجربی مقایسه شدند. نتایج تحلیل همبستگی

نشان داد که الگوی مبتنی بر کرنش برشی هشت‌وجهی بیشترین مقدار ضریب همبستگی (۰.۹۵۳) را دارد و در تخمین عمر خستگی دسته‌موتور و پیش‌بینی محل شروع ترک بالاترین دقت را از خود نشان می‌دهد. کرنش اصلی گرین-لاگرانژ پس از آن، با اختلاف اندک و مقدار ضریب همبستگی ۰.۹۵۱، در رتبه دوم قرار می‌گیرد. در ادامه، کرنش آلمانسی-اولر با ضریب ۰.۸۷۶، چگالی انرژی کرنشی با ضریب ۰.۸۶۶، و در نهایت تنش مؤثر با ضریب همبستگی ۰.۷۲۷ بترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.

References

- [1] Shangguan WB. Engine mounts and powertrain mounting systems: a review. *International Journal of Vehicle Design*. 2009 Jan 1;49(4):237-58. doi: 10.1504/IJVD.2009.024956
- [2] Sachdeva DS, Hadi R. Effect of engine mounting strategy on vehicle NVH. In *Noise & Vibration Conference and Exhibition 2003* May 5. doi: 10.4271/2003-01-1467
- [3] Porgoo MA, Mashadi B, Kakaee A. Powertrain mounting system optimization to improve vibration behavior for EF7 engine. *The Journal of Engine Research*. 2019 Jan 21;53(53):55-68. [In Persian]
- [4] Moradi Kelardeh SH, Hosseini SV, Sadeghi A. Fatigue life improvement of engine mounting bracket using cumulative fatigue test and numerical modeling. *The Journal of Engine Research*. 2019;55(55):29-37. [In Persian]
- [5] Woo CS, Kim WD, Kwon JD. A study on the material properties and fatigue life prediction of natural rubber component. *Materials Science and Engineering: A*. 2008 Jun 15;483:376-81. doi: 10.1016/j.msea.2006.09.189
- [6] Harbour RJ, Fatemi A, Mars WV. Fatigue life analysis and predictions for NR and SBR under variable amplitude and multiaxial loading conditions. *International Journal of Fatigue*. 2008 Jul 1;30(7):1231-47. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.08.015
- [7] Li Q, Zhao JC, Zhao B. Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis. *Engineering failure analysis*. 2009 Oct 1;16(7):2304-10. doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.03.008
- [8] Ro HS. Modeling and interpretation of fatigue failure initiation in rubber related to pneumatic tires [doctoral dissertation]. West Lafayette (IN): Purdue University; 1989.
- [9] Zine A, Benseddig N, Abdelaziz MN, Hocine NA, Bouami D. Prediction of rubber fatigue life under multiaxial loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2006 Mar;29(3):267-78. doi: 10.1007/1-4020-4972-2_380
- [10] Ayoub G, Naït-Abdelaziz M, Zaïri F. Multiaxial fatigue life predictors for rubbers: Application of recent developments to a carbon-filled SBR. *International Journal of Fatigue*. 2014 Sep 1;66:168-76. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.020
- [11] Shangguan WB, Wang XL, Deng JX, Rakheja S, Pan XY, Yu B. Experiment and modeling of uniaxial tension fatigue performances for filled natural rubbers. *Materials & Design*. 2014 Jun 1;58:65-73. doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.035
- [12] Belkhiria S, Hamdi A, Fathallah R. Strain-based criterion for uniaxial fatigue life prediction for an SBR rubber: Comparative study and development. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020 Jul;234(7):897-909. doi: 10.1177/1464420720913595
- [13] Luo RK. Effective stress criterion for rubber multiaxial fatigue under both proportional and non-proportional loadings. *Engineering Failure Analysis*. 2021 Mar 1;121:105172. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105172
- [14] Shangguan WB, Liu TK, Wang XL, Xu C, Yu B. A method for modelling of fatigue life for rubbers and rubber isolators. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014 Jun;37(6):623-36. doi: 10.1111/ffe.12145
- [15] Zarrin-Ghalami T, Datta S, Bodoombo Keinti R, Chandrashekar R. Elastomeric component fatigue analysis: Rubber fatigue prediction and correlation comparing crack initiation and crack growth methodologies. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* 237384. 2020 Apr 14;2(4):1754-63. doi: 10.4271/2020-01-0193
- [16] Tobajas R, Elduque D, Ibarz E, Javierre C, Gracia L. A new multiparameter model for multiaxial fatigue life prediction of rubber materials. *Polymers*. 2020 May 23;12(5):1194. doi:

- [10.3390/polym12051194](https://doi.org/10.3390/polym12051194)
- [17] Liu X, Zhao X, Shangguan WB. Fatigue life prediction of natural rubber components using an artificial neural network. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2022 Jun;45(6):1678-89. doi: [10.1111/ffe.13690](https://doi.org/10.1111/ffe.13690)
- [18] Luo RK. Fatigue crack assessment of a rubber isolator in road engineering using the effective tensile stress criterion. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2026 Mar;58(2):498-508. doi: [10.1177/00952443251415134](https://doi.org/10.1177/00952443251415134)
- [19] Dassault Systèmes. Abaqus/CAE User's Guide, Version 2016. Providence (RI): Dassault Systèmes Simulia Corp.; 2015.
- [20] ASTM International. ASTM D412-16(2021): Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021. doi: [10.1520/D0412-16R21](https://doi.org/10.1520/D0412-16R21)
- [21] ASTM International. ASTM D575-91: Standard test methods for rubber properties in compression. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2024. doi: [10.1520/D0575-91R24](https://doi.org/10.1520/D0575-91R24)
- [22] British Standards Institution. BS 903-5:2004: Physical testing of rubber — Guide to the application of rubber testing to finite element analysis. London: BSI; 2004.
- [23] Kia Motors. Kia Engineering Standards: KES DA505: Engine Mount Rubber. 1993.
- [24] National Railway Administration of the People's Republic of China. TB/T 2843-2015: General technical conditions for elastic components of railway vehicles. Beijing: National Railway Administration; 2015.
- [25] ASTM International. ASTM D4482-11(2021): Standard Test Method for Rubber Property—Extension Cycling Fatigue. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021. doi: [10.1520/D4482-11R21](https://doi.org/10.1520/D4482-11R21)
- [26] Rivlin RS. Large elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*. 1948 Oct 5;241(835):379-97. doi: [10.1098/rsta.1948.0024](https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0024)