

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تخمین عمر خستگی پرچرخه دسته موتور آلومینیومی و مطالعه اثر پارامترهای ساخت بر نرخ رشد ترک خستگی

نگارنده

حسین خلج زاده

اساتید راهنما

دکترعلیرضا شاطرزاده

دکتر سید وحید حسینی

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۱۵۰/۲۹۹
تاریخ: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۰

پاسنانهالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و پاد خفاوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین خلیج زاده با شماره دانشجویی ۹۶۰۶۱۱۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان "تخمین عمرخستگی پرچرخه دسته موتور آلومینیومی و مطالعه اثر پارامترهای ساخت بر نرخ رشد ترک خستگی" که در تاریخ ۹۹/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۶	<input type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۴/۹۹-۱۴
<input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: <input type="checkbox"/> نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی	

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر میرزا شاهرزاده	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر حسین تورزنده جانی	۳- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر محمد باقر نظری	۴- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سعید مهدی زاده رخی	۵- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم اثر

پدر و مادر عزیزم که همواره دعای خیرشان بدرقه راهم بوده است.

شکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات و حمایت‌های فراوان اساتید راه‌ما، دکتر علیرضا
شاطرزاده و دکتر سید وحید حسینی و همچنین اساتید محترم، دکتر سید هادی قادی،
دکتر مهدی کردویی و دکتر حسین توزنده جانی (اعضای هیئت علمی دانشگاه
صنعتی شاهرود) که مراد تهیه پایان نامه یاری نموده اند سپاس گزار می‌کنم.

تعمیر نامه

اینجانب حسین خلیج زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک دانشکده مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تخمین عمر خستگی پرچرخه دسته موتور آلومینیومی و مطالعه اثر پارامترهای ساخت بر نرخ رشد ترک خستگی تحت راهنمایی دکتر علیرضا شاطرزاده و دکتر سید وحید حسینی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

حکیده

از آنجایی که موتور در خودرو، نیروی محرکه را تامین می‌کند، اتصال و نحوه قرار گرفتن آن در شرایط کارکرد خودرو تاثیرگذار است. دسته موتورها از یک طرف به موتور و از طرف دیگر به بدنه خودرو متصل می‌شوند. دسته موتورها می‌بایست بگونه ای طراحی شوند تا از انتقال ارتعاشات از بدنه به موتور و بالعکس جلوگیری کنند. علاوه بر این از وظایف دسته موتور، تحمل وزن موتور و بارهای دینامیکی و ارتعاشی ناشی از حرکت خودرو در جاده است. لذا دسته موتورها عموماً بگونه ای طراحی می‌شوند که در محدوده تعریف شده‌ای از نیروهای سیکلی دارای عمر خستگی کافی باشند و در محدوده نیروهای زیاد ناشی از تصادف دچار شکست شوند تا سطح حادثه و خسارت به خودرو و سرنشین را به حداقل برسانند.

در این راستا این پژوهش به بررسی عمر خستگی پرچرخه دسته موتور آلومینیومی خودرو ساخت داخل خواهد پرداخت. در این تحقیق، ابتدا دسته موتور با استفاده از روشهای المان محدود تحت بارهای استاتیکی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت تا ضمن اطمینان از صحت عملکرد قطعه، نقاط حساس قطعه شناسایی شود. نتایج عددی بدست آمده، تحت نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن با خطای بیشتر از ۴٪ و همچنین تحت نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن با خطای کمتر از ۲٪ توانستند تغییر مکان محل اعمال بار در دسته موتور را پیش بینی کنند. سپس عمر خستگی پرچرخه دسته موتور تحت بارهای نوسانی با استفاده از روشهای عددی تخمین زده شد. براساس نتایج بدست آمده نمونه اولیه دسته موتور استحکام کافی را تحت بارهای خستگی نداشته است. در این پایان نامه با استفاده از روشهای عددی همراه با بازرسی تجربی، دلایل خرابی زودرس نمونه اولیه دسته موتور مطالعه شد. بر اساس نتایج، مدل عددی پیش بینی عمر خستگی انطباق خوبی با نتایج تجربی داشته است و بدرستی محل حساسیت قطعه و عمر قطعه را پیش بینی کرده است. نتایج بازرسی‌های تجربی هم در نمونه اولیه و همچنین در نمونه بهبود یافته نشان از افزایش شعاع راکورد، افزایش موضعی ضخامت ماده در ناحیه بحرانی و همچنین بهبود فرایندهای جداسازی براده های ریخته گری داشته است. در نهایت رشد ترک خستگی با استفاده از روشهای تجربی و مطالعه استحکام نهایی قطعه مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: دسته موتور آلومینیومی، پارامترهای ساخت، خستگی پرچرخه، روشهای المان محدود، رشد ترک خستگی

فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
۵	فهرست شکل ها
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ اهمیت مکانیک آسیب
۴	۳-۱ حالت های مختلف آسیب
۴	۱-۳-۱ آسیب ترد
۵	۲-۳-۱ آسیب نرم
۶	۳-۳-۱ آسیب خزشی
۶	۴-۳-۱ آسیب خستگی کم چرخه
۷	۵-۳-۱ آسیب خستگی پر چرخه
۸	۴-۱ خستگی
۹	۱-۴-۱ شکست بر اثر خستگی سه مرحله دارد:
۱۰	۲-۴-۱ ویژگی های ماکروسکوپی خستگی
۱۰	۳-۴-۱ ویژگی های میکروسکوپی خستگی
۱۳	فصل ۲: ادبیات تحقیق
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۴	۲-۲ دسته بندی مدل های پیش بینی عمر در خستگی بر مبنای مکانیک کلاسیک
۱۴	۱-۲-۲ مدل تنش-عمر

- ۱۵..... ۲-۲-۲ مدل کرنش- عمر
- ۱۷..... ۳-۲-۲ مدل مکانیک شکست مبتنی بر رفتار الاستیک خطی (LEFM)
- ۱۸..... ۴-۲-۲ مدل رشد آسیب خستگی
- ۱۹..... ۳-۲ مدل رشد آسیب خستگی بر مبنای مکانیک آسیب
- ۱۹..... ۱-۳-۲ مدل آسیب چابوش- لمتر
- ۲۲..... ۴-۲ آزمون پله
- ۲۴..... ۵-۲ جمع بندی

فصل ۳: آزمون تجربی و پارامترهای ساخت ۲۵

- ۲۶..... ۱-۳ مقدمه
- ۲۶..... ۲-۳ طراحی فیکسچر و پایه نگه دارنده
- ۲۸..... ۳-۳ استاندارد PSA در آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور
- ۲۸..... ۱-۳-۳ اصطلاحات و تعاریف در آزمون
- ۲۸..... ۲-۳-۳ روش آزمایش
- ۳۳..... ۳-۳-۳ روش ارزیابی
- ۳۴..... ۴-۳-۳ معیارهای اتمام آزمون
- ۳۴..... ۴-۳ آزمون استاتیکی
- ۳۸..... ۵-۳ آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور در جهت Z
- ۳۸..... ۱-۵-۳ بررسی نمونه اولیه
- ۴۶..... ۲-۵-۳ بررسی نمونه ثانویه (نمونه اصلاح شده)

فصل ۴: شبیه سازی و اثر پارامترهای ساخت ۵۵

- ۵۶..... ۱-۴ مقدمه:
- ۵۶..... ۲-۴ تاثیر پارامترهای ساخت بر عمر خستگی دسته موتور

- ۵۷..... ۱-۲-۴ ضخامت سنجی به وسیله آزمون غیر مخرب
- ۶۰..... ۲-۲-۴ آزمون رادیوگرافی
- ۶۲..... ۳-۲-۴ مقایسه مدل های V.01 و V.02 با برش های یکسان
- ۷۰..... ۳-۴ مدل سازی و تحلیل عددی دسته موتور
- ۷۳..... ۱-۳-۴ صحه گذاری روش المان محدود با استفاده از حل استاتیک
- ۷۶..... ۴-۴ بررسی رفتار خستگی در دسته موتور
- ۸۲..... ۵-۴ مطالعه رشد ترک
- ۸۳..... ۶-۴ نتیجه گیری

۸۴

مراجع

فهرست جداول

- جدول ۴-۱: خصوصیات مکانیکی قطعات در حل استاتیکی ۷۰
- جدول ۴-۲: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمون تجربی نمونه V.01T14 ۷۶
- جدول ۴-۳: خصوصیات مکانیکی قطعات در حل عددی خستگی ۷۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: آسیب ترد [۱۰] ۵
- شکل ۲-۱: آسیب نرم [۱۰] ۵
- شکل ۳-۱: آسیب خزشی [۱۰] ۶
- شکل ۴-۱: آسیب خستگی کم چرخه [۱۰] ۷
- شکل ۵-۱: آسیب خستگی کم چرخه [۱۰] ۸
- شکل ۶-۱: اثر شکست یک بازوی لنگ آلومینیومی تحت بار گذاری خستگی، A نشانه های ساحلی ۱۰
- شکل ۱-۲: نمودار وهلر [۱۸] ۱۵
- شکل ۲-۲: نمونه ای از منحنی حلقه هیستریزس [۱۸] ۱۶
- شکل ۳-۲: نمونه ای از منحنی کرنش- عمر [۱۸] ۱۷
- شکل ۴-۲: نمودار رشد ترک خستگی [۱۸] ۱۸
- شکل ۵-۲: نمودار آزمون پله [۲۷] ۲۳
- شکل ۱-۳: مدل فیکسچر به همراه دسته موتور [۳۰] ۲۷
- شکل ۲-۳: فیکسچر و دسته موتور نصب شده بر روی دستگاه اینسترون برای انجام آزمون خستگی [۳۰] ۲۷
- شکل ۳-۳: فرآیند آزمون پله [۳۱] ۳۰
- شکل ۴-۳: نمودار پذیرش برای آزمون خستگی قطعات فلزی در قسمت سیستم تعلیق انتقال نیرو [۳۱] ۳۳
- شکل ۵-۳: جهت های اعمال نیرو در دسته موتور [۳۰] ۳۴
- شکل ۶-۳: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T13 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F1 [۳۰] ۳۵
- شکل ۷-۳: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T13 با نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن در جهت F2 [۳۰] ۳۵
- شکل ۸-۳: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T14 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F1 [۳۰] ۳۶
- شکل ۹-۳: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T14 با نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن در جهت F2 [۳۰] ۳۶
- شکل ۱۰-۳: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T15 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F1 [۳۰] ۳۷
- شکل ۱۲-۳: ثابت کننده و دسته موتور نصب شده بر روی فک پایین دستگاه اینسترون [۳۰] ۳۸
- شکل ۱۳-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T02 [۳۰] ۳۹
- شکل ۱۴-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T03 [۳۰] ۴۰
- شکل ۱۵-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T04 [۳۰] ۴۰
- شکل ۱۶-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T05 [۳۰] ۴۱
- شکل ۱۷-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T06 [۳۰] ۴۱
- شکل ۱۸-۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T07 [۳۰] ۴۲

- شکل ۳-۱۹: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T08 [۳۰] ۴۳
- شکل ۳-۲۰: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T10 [۳۰] ۴۴
- شکل ۳-۲۱: نتایج آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور در جهت محور Z (نمونه اولیه) [۳۰] ۴۵
- شکل ۳-۲۲: نتیجه آزمون قطعه دسته موتور بالا راست خودرو پژو در نمودار خستگی مرجع [۳۰] ۴۶
- شکل ۳-۲۳: اصلاح قطعه توسط فرزند انگشتی و مقایسه نمونه اولیه با نمونه ثانویه (اصلاح شده) [۳۰] ۴۷
- شکل ۳-۲۴: الف) ترک در نمونه اولیه ب) نمونه ثانویه (اصلاح شده) پس از تقویت ناحیه بحرانی [۳۰] ۴۷
- شکل ۳-۲۵: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T01 [۳۰] ۴۸
- شکل ۳-۲۶: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T02 [۳۰] ۴۸
- شکل ۳-۲۷: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T03 [۳۰] ۴۹
- شکل ۳-۲۸: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T04 [۳۰] ۵۰
- شکل ۳-۲۹: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T05 [۳۰] ۵۰
- شکل ۳-۳۰: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T06 [۳۰] ۵۱
- شکل ۳-۳۱: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T08 [۳۰] ۵۱
- شکل ۳-۳۲: نتایج آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور در جهت محور Z نمونه ثانویه (اصلاح شده) [۳۰] ۵۲
- شکل ۳-۳۳: نتیجه آزمون قطعه دسته موتور بالا راست خودرو پژو در نمودار خستگی مرجع [۳۰] ۵۳
- شکل ۴-۱: اسکن سه بعدی از نمونه های آزمایش (اپتیک) ۵۶
- شکل ۴-۲: مدل بدست آمده از سطح خارجی دسته موتور در نرم افزار سالیدورک پس از اسکن سه بعدی ۵۷
- شکل ۴-۳: دستگاه التراسونیک شرکت olympus مدل 38 DL- Plus ۵۷
- شکل ۴-۴: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت) ۵۸
- شکل ۴-۵: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت) ۵۸
- شکل ۴-۶: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت) ۵۹
- شکل ۴-۷: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت) ۵۹
- شکل ۴-۸: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه در هر دو نمونه آزمایش ۶۰
- شکل ۴-۹: دستگاه رادیوگرافی مدل DK-2300 ۶۰
- شکل ۴-۱۰: مقایسه نمونه اول و نمونه اصلاح شده با آزمون رادیوگرافی ۶۱
- شکل ۴-۱۱: مقایسه نمونه اول و نمونه اصلاح شده با آزمون رادیوگرافی ۶۱
- شکل ۴-۱۲: طراحی سه بعدی نمونه اول و نمونه اصلاح شده پس از نتایج آزمون رادیوگرافی ۶۲
- شکل ۴-۱۳: ناحیه برش خورده دوم در هر دو نمونه ۶۳
- شکل ۴-۱۴: ناحیه برش خورده دوم در هر دو نمونه ۶۴

- شکل ۴-۱۵: ناحیه برش خورده سوم در هر دو نمونه ۶۵
- شکل ۴-۱۶: ناحیه برش خورده چهارم در هر دو نمونه ۶۶
- شکل ۴-۱۷: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده اول در هر دو نمونه ۶۷
- شکل ۴-۱۸: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده دوم در هر دو نمونه ۶۷
- شکل ۴-۱۹: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده سوم در هر دو نمونه ۶۸
- شکل ۴-۲۰: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده چهارم در هر دو نمونه ۶۸
- شکل ۴-۲۱: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه اول ۶۹
- شکل ۴-۲۲: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه دوم ۶۹
- شکل ۴-۲۳: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه سوم ۶۹
- شکل ۴-۲۴: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه چهارم ۷۰
- شکل ۴-۲۵: محل بارگذاری، محل اتصال پیچ ها با دسته موتور، نیروی پیش بار پیچ لود سل و هندسه کلی در شبیه سازی دسته موتور ۷۱
- شکل ۴-۲۶: شبکه بندی پیچ لود سل، تکیه گاه دسته موتور، دسته موتور ۷۲
- شکل ۴-۲۷: کانتورهای تنش و جابجایی در حل عددی استاتیکی با نیروی کششی، ۳۰۰۰ نیوتن و نیروی پیش بار پیچ لود سل معادل، ۳۴۰۰۰ نیوتن ۷۳
- شکل ۴-۲۸: کانتورهای تنش و جابجایی در حل عددی استاتیکی با نیروی فشاری، ۵۰۰۰ نیوتن و نیروی پیش بار پیچ لود سل معادل، ۳۴۰۰۰ نیوتن ۷۴
- شکل ۴-۲۹: نمودار مقایسه نتایج نیرو بر حسب جابجایی نمونه (V.01T14) در آزمون تجربی و حل عددی در نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن ۷۵
- شکل ۴-۳۰: نمودار مقایسه نتایج نیرو بر حسب جابجایی نمونه (V.01T14) در آزمون تجربی و حل عددی در نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن ۷۵
- شکل ۴-۳۱: حالت کلی اتصال قطعات به یکدیگر در حل عددی خستگی دسته موتور ۷۷
- شکل ۴-۳۲: محل اعمال نیروی پیش بار پیچ لود سل و نیروی دینامیکی اعمال شده به دسته موتور ۷۷
- شکل ۴-۳۳: نتایج حل عددی خستگی پر چرخه دسته موتور ۷۸
- شکل ۴-۳۴: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پر چرخه دسته موتور در ناحیه اول (I) ۷۹
- شکل ۴-۳۵: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پر چرخه دسته موتور در ناحیه دوم (II) ۷۹
- ۸۰
- شکل ۴-۳۶: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پر چرخه دسته موتور در ناحیه سوم (III) ۸۰
- ۸۱
- شکل ۴-۳۷: نمودار رفتار نمونه ثانویه T02 قبل از رشد ترک خستگی با نیروی ۳۲۵۰ نیوتن ۸۲
- شکل ۴-۳۸: نمودار رفتار نمونه ثانویه T02 همراه با رشد ترک خستگی با نیروی ۳۵۰۰ نیوتن ۸۲
- شکل ۴-۳۹: نمودار رفتار نمونه ثانویه T05 همراه با رشد ترک خستگی با نیروی ۳۵۰۰ نیوتن ۸۳

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

خستگی پدیده ای رایج در میان اجزای ماشین است که در معرض بار دینامیکی قرار دارند. منابع این بارهای دینامیکی یا خستگی ممکن است از نیروهای واکنشی دیگر مکانیسم های متصل به دستگاه، بارهای نوسانی مستقیم و یا به علت ارتعاشات دستگاه باشد. بسیاری از ساختارهای مهندسی حتی با توجه به حرکات جوی هوا ممکن است خستگی را تجربه کنند. خستگی پدیده است که تقریباً تمام اجزای ماشین در طول عمر خود تجربه می کنند. از آنجاکه خستگی به زمان وابسته است مدل سازی شرایط بارگذاری فیزیکی با معادلات ریاضی مناسب برای پیش بینی آسیب ناشی از خستگی، بدون شک یک کار چالش برانگیز است. مدلسازی آسیب خستگی در اجزای ماشین نیاز به در نظر گرفتن پارامترهایی مانند هندسه، متالورژی و شرایط بارگذاری دارد تا بتوان آنرا به یک معادله ریاضی تبدیل نمود. بارگذاری خستگی را می توان از بارگذاری استاتیک در شرایط مختلف رفتار مواد تحت اثر تنش های نوسانی دو سویه تشخیص داد. استاندارد تعریف خستگی که توسط ASTM ارائه شده است به شرح زیر است: "فرآیند پیشرفته تغییر ساختار دائمی موضعی در مواد که تنشهای نوسانی در برخی از نقطه یا نقاط تولید می کنند که ممکن است باعث انباشت ترکها یا شکست کامل پس از تعداد سیکل نوسان کافی گردد." این تعریف ASTM نشان می دهد که خستگی یک پدیده پیشرفته است که طی یک دوره زمانی مشخص با تغییر شکل محلی دائمی رخ می دهد.

فایندلی به عنوان یکی از اولین محققانی است که بر روی خستگی چند محوره تحقیق کرده است [۱]. او در حین انجام آزمایشات خود چندین مورد اصلاح بر روی تجهیزات آزمون خستگی انجام داد و در سال ۱۹۴۲ دستگاهی برای تست نمونه های فلزی تحت بارگذاری خستگی ترکیبی پیچشی و خمشی ابداع کرد [۲].

هدف اصلی مطالعه خستگی بررسی آغاز و انتشار ترک هایی است که به علت بارهای سیکلی یک محوره یا چند محوره اتفاق می افتد. هردو بار خستگی یک محوره یا چند محوره منجر به ایجاد ترک هایی می شوند که به تدریج گسترش می یابند و منجر به شکست نهایی می شوند. برای فلزات معمولی و آلیاژها، فرآیند شکست خستگی متشکل از چهار مرحله اصلی تغییر شکل سیکلی است. مرحله اول تغییر شکل به دلیل اعمال مکرر تنش است و توسط مرحله دوم که جوانه زنی میکرو ترک می باشد دنبال می شود در مرحله سوم از انباشت ترک های میکرو به ترکهای بزرگ می رسیم و در مرحله نهایی ترکها تکثیر می شود تا زمانی که شکست فاجعه بار رخ دهد [۳].

بیشتر قطعات مهندسی تحت بارهای نوسانی متغیر هستند و خرابی های ناشی از خستگی یکی از مهمترین مدهای شکست در سازه های مهندسی می باشد. برای پیش بینی عمر باقیمانده این قطعات فرمول بندی روشی، برای محاسبه آسیب تجمعی خستگی بسیار مهم می باشد. آسیب خستگی با چرخه بار اعمال شده به صورت تجمعی افزایش می یابد. مفهوم آسیب تجمعی حدود صد سال قبل توسط پالمرن^۱ ارائه شد و بیست سال بعد آن قاعده آسیب خطی توسط آسیب مینر^۲ معرفی گردید و برای سالیان زیادی مهندسان

¹ Palmgren

² Miner

طراح از این قوانین برای پیش بینی عمر خستگی قطعات بهره می جستند.

پیش بینی عمر خستگی تحت بارگذاری متغیر با یک مدل خرابی مکانیکی غیرخطی جدید توسط داتوما و همکارانش [۴] انجام شده است. از داده های آزمون خستگی فولاد سخت و تمپر شده برای تایید مدل پیشنهادی استفاده شده است. نتایج توافق خوبی برای پیش بینی عمر خستگی در بارگذاری های پیچیده نشان داده است. هانگ و همکارانش [۵] یک تحلیل نرم افزاری برای پیش بینی عمر خستگی قطعه ای پر کاربرد در صنایع ریلی (e-clip) را که تحت بارگذاری سیکلی بود در دوازده حالت انجام دادند. نتایج نشان داد که داخل قوس پشتی قطعه کوتاهترین عمر خستگی را دارد و بنابراین بحرانی ترین قسمت است. نقش ترکهای ریز در عمر خستگی و کاهش انعطاف پذیری به منظور درک ماهیت واقعی آسیب خستگی در خستگی های چرخه پایین توسط موراکامی و همکارانش [۶] بررسی شده است. نتایج آنها نشان داد که عمر خستگی با حذف ترکهای سطحی افزایش می یابد. چن و همکارانش [۷] به مطالعه تجربی رفتار ترک خستگی در صفحه های فولادی با ترک در مرکز تعمیر شده با مواد CFRP پرداخته اند. آنها اثر ماده استفاده شده برای تعمیر، زاویه بارگذاری و طول ترک اولیه را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش زاویه بار تاثیر ماده تعمیری کاهش می یابد. کونور و همکارانش [۸] تغییر شکل ترک خستگی در مقیاس میکرو و ماکرو را تحت بارگذاری یکنواخت و غیر یکنواخت اندازه گیری نمودند. فرایندهای ساخت تاثیر قابل توجهی بر عمر خستگی مواد می گذارند و پژوهشگران در سالیان اخیر در جهت بهبود عمر خستگی و یا استفاده بهینه از مواد تاثیر این عوامل را بررسی می کنند. ایفرگان و همکارانش تاثیر پارامترهای ساخت پیچ را بر عمر خستگی پیچها در سازه های هوایی مطالعه کردند [۹]. مادیرا در مطالعه اثر خستگی پارامترهای ساخت در فرایند جوشکاری بدین نتیجه رسید که وجود ترکهای اولیه در ناحیه اتصال جوش، تاثیر بسیار بالایی بر نرخ رشد ترک خستگی در اتصالات خواهد گذاشت.

از آنجایی که موتور در خودرو، نیروی محرکه حرکت را تامین می کند، اتصال و نحوه قرار گرفتن آن در شرایط کارکرد خودرو تاثیرگذار است. دسته موتورها از یک طرف می بایست اتصال ایمنی را به بدنه بوجود آورند. از طرف دیگر اتصال صلب و قوی آن می تواند عوارض زیادی از جمله افزایش انتقال ارتعاشات به بدنه بوجود آورد. لذا دسته موتورها عموماً بگونه ای طراحی می شوند که در محدوده تعریف شده ای از نیروهای وارد بر موتور دارای عمر خستگی کافی باشند و در محدوده نیروهای زیاد ناشی از تصادف دچار شکست شوند تا سطح حادثه و خسارت به خودرو و سرنشین را به حداقل برسانند.

۱-۲ اهمیت مکانیک آسیب

آسیب^۱ در مواد فرآیندی است قابل رشد که با کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی باعث وقوع زوال در مواد می شود و مکانیک آسیب شاخه ای از مکانیک است که پارامترها و عوامل مکانیکی موثر در زوال ماده تحت اثر بار گذاریهای مکانیکی را مورد مطالعه قرار می دهد [۱۰]. این شاخه از علم مکانیک همچنین یک ابزار

¹ Damage

مناسب برای مدل کردن ریز ترک ها، حفره ها و غیره است. به عبارت دیگر آسیب فرایند فیزیکی پیش رونده ای است که در نهایت منجر به شکست ماده می شود. لازمه چنین تشخیصی شناخت دقیق شکست و عواملی است که باعث شکست می گردند. آسیب به صورت های مختلفی تا کنون ارائه شده است که می توان به آسیب ترد^۱، آسیب نرم^۲، آسیب خستگی^۳ و آسیب خزشی^۴ اشاره نمود.

در آسیب ترد یا شبه ترد ایجاد ترک با کرنش پلاستیک کم همراه است. آسیب نرم همراه با کرنش پلاستیک بسیار زیاد رخ می دهد. همچنین بارگذاری یکنواخت و تعداد سیکل های زیاد منجر به آسیب خستگی تحت عنوان آسیب پر چرخه^۵ می شود و اگر بارگذاری زیاد با تعداد سیکل های کم باشد آسیب خستگی تحت عنوان آسیب کم چرخه^۶ پدید می آید و در صورتی که بار کم و زمان زیاد باشد آسیب خزشی به وجود می آید. در هر یک از حالت های فوق اثر وجود آسیب کاهش خواص ماده و یا سازه است. در مکانیک آسیب هدف اصلی پیش بینی شکست در مواد می باشد [۱۱].

۳-۱-۳ حالت های مختلف آسیب

صورت های مختلف آسیب که عبارت اند از [۱۲]:

۱-۳-۱ آسیب ترد^۷

هرگاه یک ترک بدون مقدار قابل توجهی از کرنش پلاستیک شروع به رشد کند، آسیب ترد نامیده می شود. به عبارت دیگر کرنش پلاستیک کوچکتر از کرنش الاستیک باشد.

این بدان معنی است که نیروهای گسستگی^۸ کوچکتر از نیروهایی هستند که ممکن است باعث رخ دادن لغزش شوند و بزرگتر از نیروهایی هستند که سبب جدایی مرزها می شوند. شکل ۱-۱ یک شکست نگار^۹ به همراه نمودار تنش-کرنش در کشش تا زمان رخ دادن شکست آن را نشان می دهد.

¹ Brittle damage

² Ductile damage

³ Fatigue damage

⁴ Creep damage

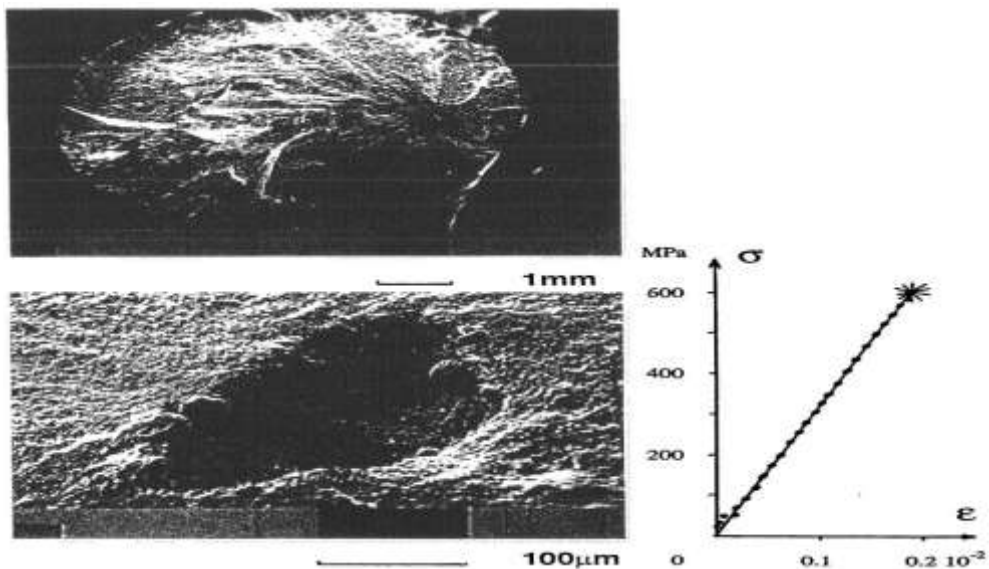
⁵ High cycle fatigue

⁶ Low cycle fatigue

⁷ Brittle damage

⁸ Cleavage forces

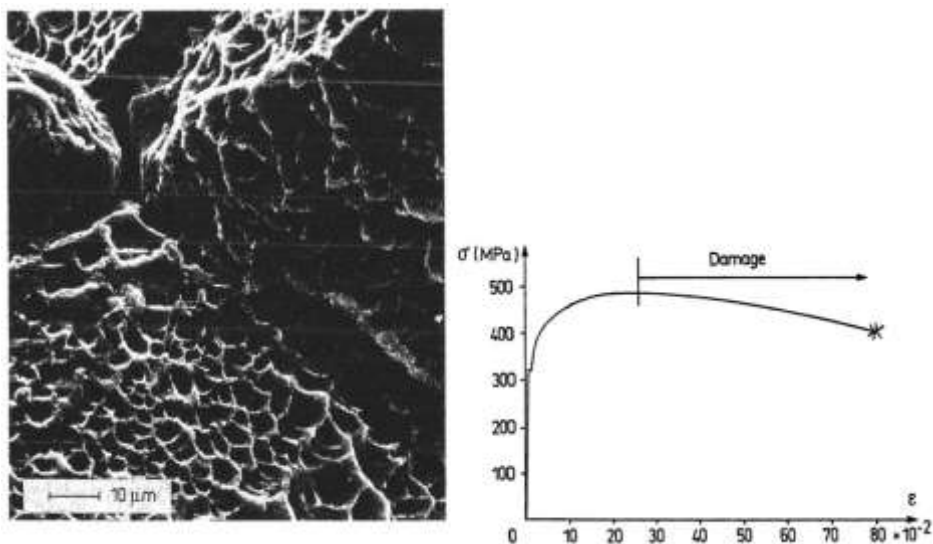
⁹ Fractograph



شکل ۱-۱: آسیب ترد [۱۰]

۱-۳-۲ آسیب نرم^۱

آسیب نرم هنگامی اتفاق می افتد که شکست همراه با تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه ای باشد. یعنی مقدار کرنش پلاستیک معادل از یک حد آستانه بزرگتر باشد. آسیب در این پدیده نتیجه جوانه زنی^۲ حفره ها است به علت جدایش میان ناخالصی ها است که با رشد و به هم پیوستگی آن ها به واسطه ناپایداری پلاستیک ادامه می یابد [۱۳]. که در شکل ۱-۲ نمونه ای از این آسیب نشان داده شده است.



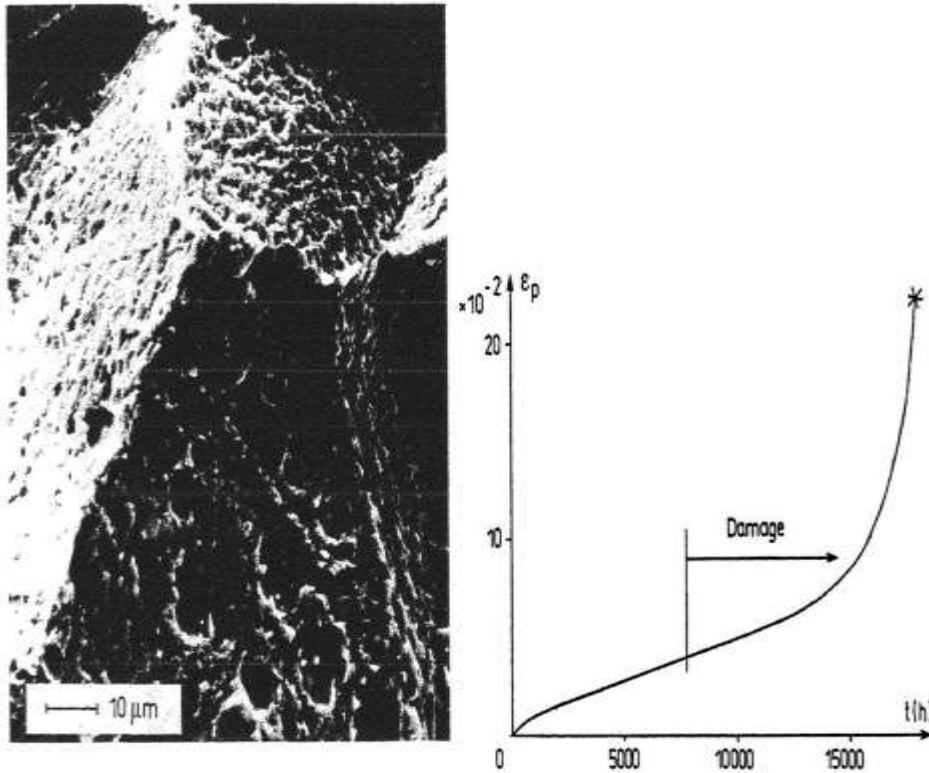
شکل ۱-۲: آسیب نرم [۱۰]

^۱ Ductile damage

^۲ Nucleation

۱-۳-۳ آسیب خزشی^۱

در دماهای بالاتر از یک سوم دمای ذوب ($T > \frac{1}{3}T_m$) پدیده خزش اهمیت می یابد، و ممکن است ماده تحت تاثیر تنش ثابت دارای تغییر شکل پلاستیک کند. همچنین در این حالت وقتی کرنش به اندازه کافی بزرگ شود، جدایی درون دانه ای اتفاق می افتد که پدیده آسیب و افزایش نرخ کرنش به واسطه خزش را به همراه دارد. شکل ۱-۳ نمونه ای از این آسیب را نشان می دهد.



شکل ۱-۳: آسیب خزشی [۱۰]

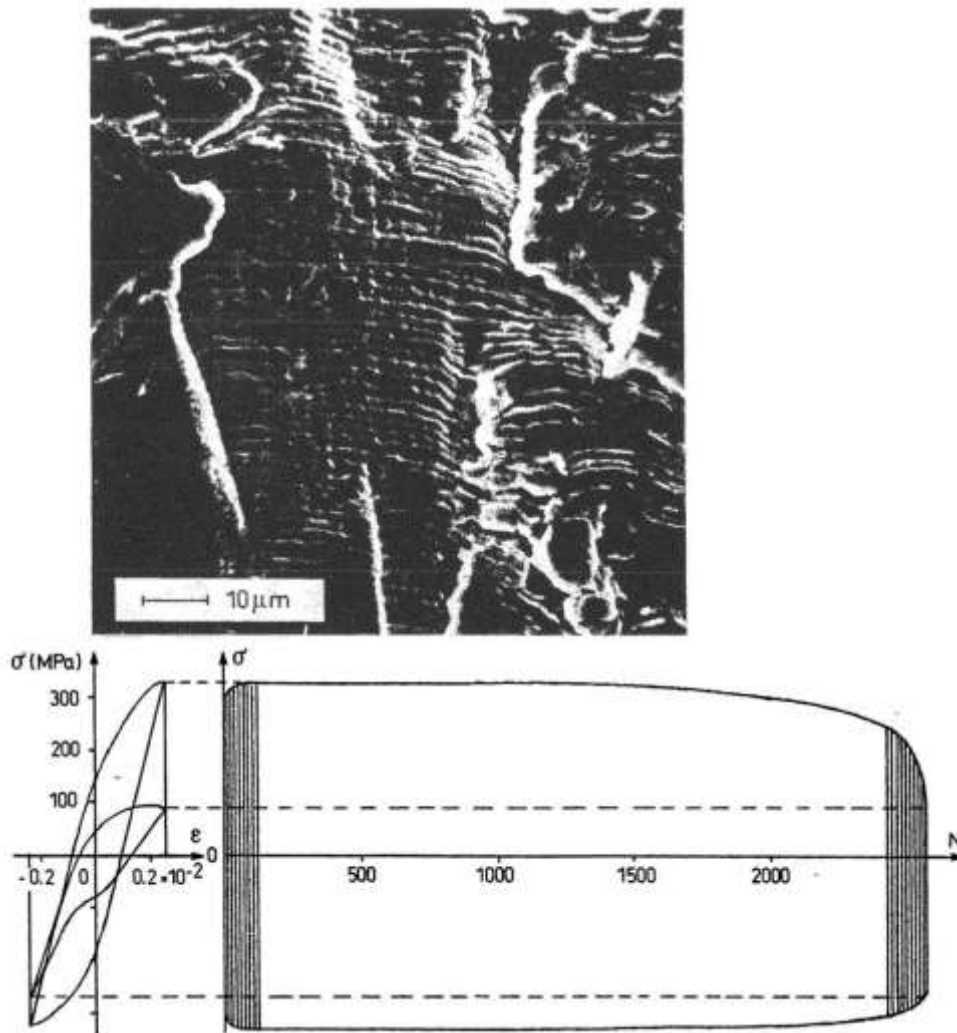
۱-۳-۴ آسیب خستگی کم چرخه^۲

زمانی که یک ماده تحت بارگذاری های تکرار شونده (دوره ای)^۳ با مقادیر زیاد تنش و یا کرنش و تعداد تکرارهای کم قرار می گیرد آسیب هم با کرنش پلاستیک تکرار شونده و هم با گسترش میکرو ترک ها توسعه می یابد. مشخصه آسیب خستگی کم چرخه تعداد کم سیکل ($N_F < 10\ 000$ cycles) تا زمان شکست است [۱۴, ۱۵]. شکل ۱-۴ مثالی را از این حالت نشان می دهد.

¹ Creep damage

² Low cycle fatigue damage

³ cyclic

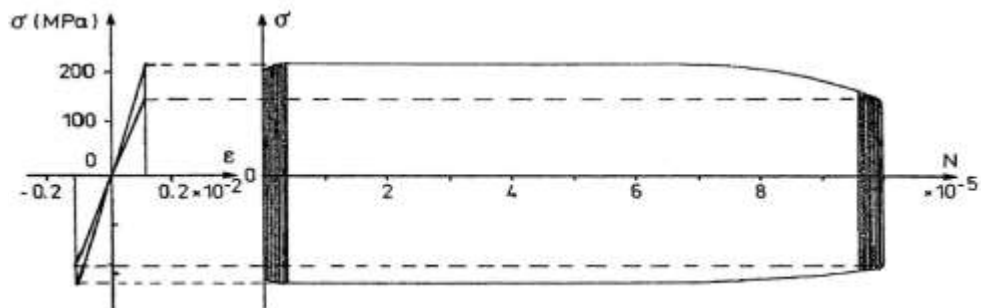
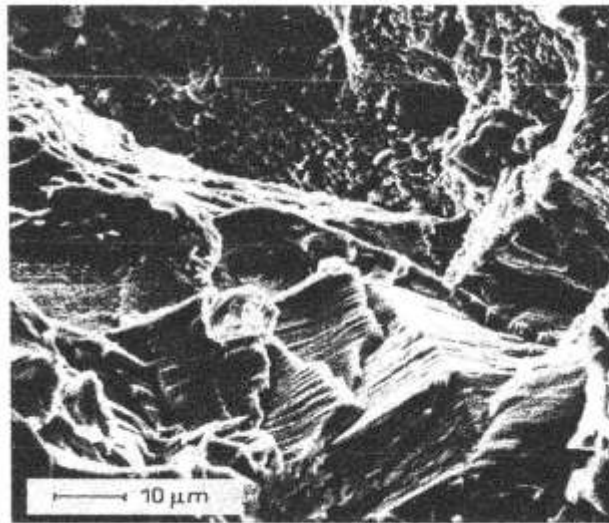


شکل ۱-۴: آسیب خستگی کم چرخه [۱۰]

۱-۳-۵ آسیب خستگی پر چرخه^۱

وقتی این آسیب به وجود می آید که ماده در معرض بارگذاری دوره ای با مقادیر تنش کم قرار می گیرد. در این حالت تنها ممکن است در مقیاس میکرو و در مکان هایی که ریز ترک های میان دانه ای رخ می دهد، مقدار کرنش پلاستیک بزرگ باشد. در خستگی پرچرخه تعداد دوره های منجر به شکست زیاد می باشد ($N_F > 100\ 000$ cycles). شکل ۱-۵ نمونه ای از آسیب خستگی پرچرخه را نشان می دهد.

^۱ High cycle fatigue damage



شکل ۱-۵: آسیب خستگی کم چرخه [۱۰]

۴-۱ خستگی

شکست^۱ خستگی وقتی اتفاق می‌افتد که ماده تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی قرار گیرد. دلیل اصلی خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن اتفاق می‌افتد. خستگی علت شکست زود هنگام بیشتر قطعه‌های صنعتی است. خستگی بطور معمول همراه با جوانه زنی ترک در سطح قطعه یا نواحی تمرکز تنش و اشاعه آن در ناحیه تحت تنش پیشینه است. خستگی شامل تنش‌ها و کرنش‌هایی است که به طور طبیعی متناوب‌اند و هم‌چنین این فرآیند، مستلزم چیزی بیش از یک بار ثابت است. برای این که فرآیند خستگی بحرانی شود، باید اندازه و دامنه تنش‌ها و کرنش‌های نوسانی از محدوده ای مشخص برای ماده مورد نظر فراتر رود. کلمه ترک^۲ یکی از لغاتی است که در موضوع خستگی اغلب به درستی درک نشده و به طور صحیح از آن استفاده نمی‌شود. علت نهایی همه واماندگی‌های خستگی بدین

¹ Fracture

² Crack

صورت بوده که یک ترک به حدی رشد می کند که ماده باقی مانده قادر به تحمل تنش ها یا کرنش ها نبوده و شکست ناگهانی اتفاق می افتد. علت رشد ترک تا این اندازه، بارگذاری تناوبی است. از سال ۱۸۵۰ معلوم شده است که فلز تحت تنش نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. شکستهایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می دهند شکستهای خستگی نامیده می شوند؛ که این نامگذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می شود شکستها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می دهند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی می باشد.

۱-۴-۱ شکست بر اثر خستگی سه مرحله دارد:

۱-۴-۱-۱ شروع ترک (جوانه زنی ترک)

مرحله جوانه زنی به تشکیل ریز ترک های سطحی می انجامد. این ریز ترک ها در امتداد صفحات لغزش فعال قرار می گیرند، یعنی در امتداد صفحات لغزشی که تنش برشی حداکثر مقدار را دارد.

۱-۴-۱-۲ رشد ترک

در مرحله رشد، ترک عمود بر تنش اعمالی رشد می کند، در این مرحله نوع شکست از نوع دو به نوع یک تغییر می کند. در این مرحله ترک های اولیه به قدری رشد کرده اند که بتوانند با تمرکز تنش قابل قبولی در یک جهت خاص و آن هم عمود بر تنش اعمالی رشد کنند. در پیشروی ترک، دو مرحله خواهیم داشت، به این ترتیب که ترکهایی در جسم جوانه میزند، که یکی از آنها در امتداد صفحه ی لغزش فعال رشد می کند، تا اینکه طول ترک به حد مشخصی برسد و بعد از آن، ترک در جهت عمود بر تنش اعمالی به پیشروی خود ادامه می دهد، تا زمانی که که شکست اتفاق بیفتد. اینکه ترک در چه طولی از مرحله اول وارد مرحله دوم می شود به جنس ماده و میزان تنش اعمالی بستگی دارد. هر چه تنش اعمالی کمتر باشد، طول ترک در لحظه ی انتقال از مرحله اول به مرحله دوم بزرگتر خواهد بود.

۱-۴-۱ شکست نهایی ماده

در این مرحله، به دلیل افزایش طول ترک، سطح مقطع نمیتواند بار وارده را تحمل کند و نهایتاً به شکست ماده منجر می‌شود. واژه شکست بیان‌کننده آخرین مرحله فرآیند خستگی یعنی شکست قطعه و تبدیل شدن آن به دو یا چند تکه است.

۱-۴-۲ ویژگی‌های ماکروسکوپی^۱ خستگی

شکست خستگی ظاهری شبیه به شکست ترد دارد، به گونه‌ای که در آن سطوح شکست ترد بوده و بدون حالت گلوبی شدن^۲ به محور تنش عمود است.

غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده شده است که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت کرده اند این خطوط به علایم ساحلی^۳ معروف اند که به علت تغییر میزان بار اعمالی و یا فرکانس بار در خلال رشد ترک ایجاد می‌شود. وجود این علایم از دیگر نشانه‌های سطح شکست خستگی است (شکل ۱-۶). شکل علایم ساحلی معمولاً به صورت خمیده بوده و مرکز انحنای آن‌ها به سمت منشأ ترک است، لذا می‌توان محل جوانه زنی ترک را مشخص نمود.



شکل ۱-۶: اثر شکست یک بازوی لنگ آلومینیومی تحت بار گذاری خستگی، A نشانه‌های ساحلی

۱-۴-۳ ویژگی‌های میکروسکوپی^۴ خستگی

مکانیزم خستگی بسیار پیچیده بوده و هنوز هم تنها قسمتی از آن شناخته شده است. فرآیند خستگی شامل جوانه زنی و رشد ترک یا ترک‌ها تا شکست نهایی است. بسیاری از آلیاژهای مهندسی طی فرآیند به هم

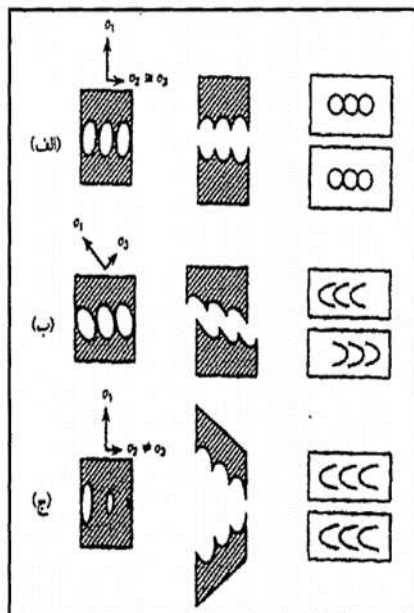
¹ Macroscopy

² Necking

³ Beach mark

⁴ Microscopy

پیوستن ریز ترک ها دچار شکست می شوند. ریز ترک ها در مناطق ای جوانه زنی می کنند که در آن مناطق ناپیوستگی در کرنش وجود داشته باشد مانند آخال ها و مرزخانه ها رخ می دهد. ترک خوردن ذرات و یا جدا شدن فصل مشترک یک آخال یا ذره رسوبی از زمینه را به عنوان مرحله جوانه زنی در نظر می گیرند. رشد ترک معمولا شامل رشد ریز حفره ها در طول صفحات پیشینه برش و پس از آن رشد ترک ها در طول صفحات پیشینه تنش کششی است. بسته به مواد و مرحله فرآیند خستگی، رشد ترک می تواند با مکانیزم های مختلفی ادامه پیدا کند. در شرایط بارگذاری تک محوره ترک ها تمایل دارند که با شکست ذرات یا از جدایش فصل مشترک تشکیل شوند و در صفحه ای که عمود بر محور تنش است رشد کنند. ترک های هم محور حاصل معمولا کروی هستند (شکل ۱-۷-الف). وقتی شکست تحت تاثیر تنش های برشی است رشد و به هم پیوستن بعدی در صفحاتی با تنش برشی پیشینه است. لذا این ترک ها تمایل به کشیده شدن دارند و در نتیجه در سطح شکست ترک های کشیده شده به وجود می آید و با مقایسه جهت این ترک ها در دو نیمه سطح شکست می توان نتیجه گرفت که ترک ها در جهت تنش برشی کشیده شده و جهت آنها در دو نیمه شکست مخالف هم است (شکل ۱-۷-ب). و در نهایت اگر تنش به صورت ترکیبی از تنش کششی و خمشی باشد فرآیند پارگی رخ می دهد که بر اثر آن ترک های کشیده شده ای، ایجاد می شود که در صفحاتی عمود بر جهت بارگذاری قرار دارند و به سمت منشا ترک می باشند (شکل ۱-۷-ج) [۱۶].



شکل ۱-۷: اثر نوع بارگذاری بر روی سطح شکست ترک. الف: تنش کششی ب: تنش برشی ج: پارگی [۱۶]

فصل ۲: ادبیات تحقیق

۲-۱ مقدمه

در فصل قبل مفهوم خستگی معرفی گردید، و انواع مختلف آسیب شرح داده شد. از آنجا که آسیب همواره نتایج برگشت ناپذیری از خود بر جای می گذارد، پدیده ای ماندگار در نظر گرفته می شود. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه شکست ماکروسکوپی انجام شده است و معیارهای متنوع گسیختگی، برای تشخیص شکست پیشنهاد شده است. که می توان به معیارهای کولمب، رانکین، ترسکا، فون میزز، موهر و کاکت اشاره نمود. و در سال های اخیر توسط لمتروچابوش^۱، هالت، لکیومور آسیب به صورت پدیده قابل رشد در ماده، به منظور تخمین شکست ماکروسکوپی مورد توجه قرار گرفت و به شکست خستگی نیز تسری پیدا نمود [۱۷]. در این میان تحلیل خستگی پر چرخه شاید دشوار ترین بخش از مکانیک آسیب باشد چرا که آسیب در خستگی پرچرخه در تنش هایی به مراتب کوچکتر از تنش های تسلیم مهندسی و در مقیاس میکروسکوپی ماده رخ می دهد و حتی زمانی که آسیب در حال رشد است نشانه ای از شکست در قطعه مشاهده نمی شود [۱۱]. در این فصل با تحلیل های مبتنی بر خستگی پرچرخه با در نظر گرفتن محدوده امن در طراحی سازه و اجزای مهندسی بیان می گردد. در طراحی خستگی به علت تفاوت های موجود برای یک قطعه و یا سازه از نظر ایمنی، ساده یا پیچیده بودن، قیمت محصول و همچنین واماندگی ها ممکن است خسارت های جبران ناپذیری به وجود آید.

۲-۲ دسته بندی مدل های پیش بینی عمر در خستگی بر مبنای مکانیک کلاسیک

۲-۲-۱ مدل تنش - عمر

اثرات تنش بر عمر نهایی تا خستگی به سه عامل دامنه تنش، تاریخچه اعمال تنش و همچنین به تنش میانگین وابسته است و این به نوبه خود باعث پیچیده تر شدن اثر تنش روی تحلیل خستگی می گردد. لذا در محدوده عمر پرچرخه، تنش ها عامل اصلی گسیختگی می باشند در این صورت استفاده از منحنی وهلر^۲ مناسب می باشد، که در شکل ۲-۱ نمای از آن برای نوعی فولاد نشان داده شده است. برای مقادیر کم تنش منحنی های وهلر حالت مجانب افقی به خود میگیرد به عبارت دیگر برای تغییرات مقادیر کم تنش عمر مقادیر بیشتری تغییر خواهد کرد. مهم ترین رابطه ای که برای ناحیه پرچرخه پیشنهاد شده است، رابطه باسکوین^۳ است:

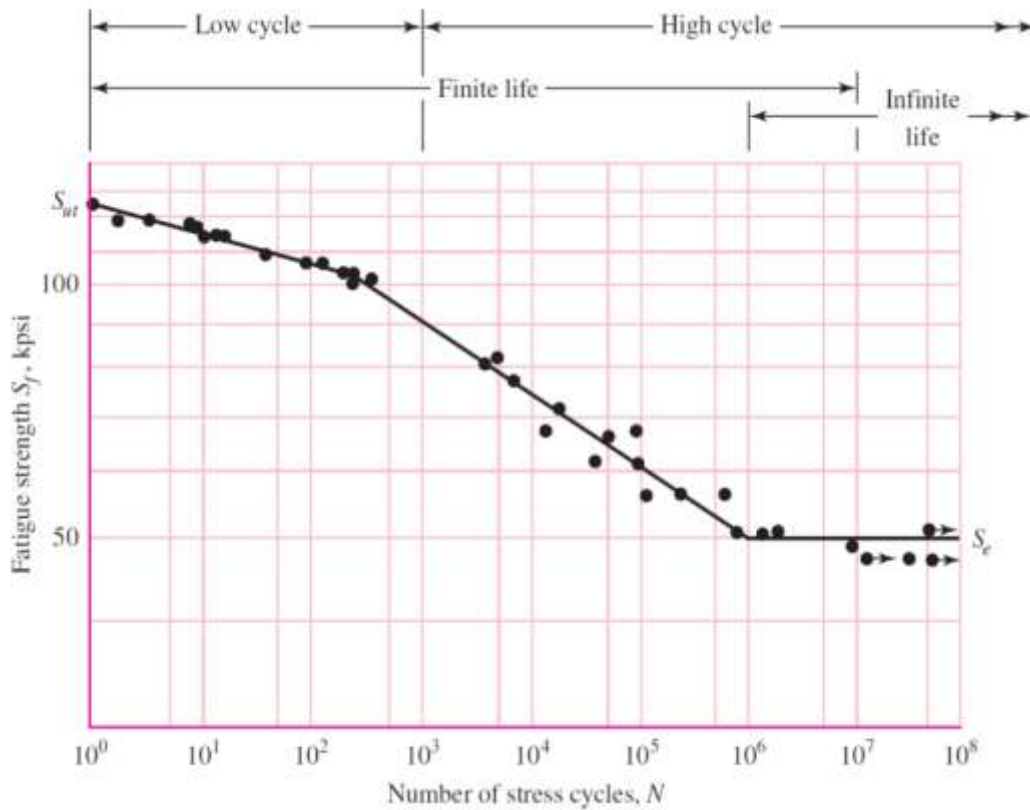
$$S_f = AN^B \quad (1-2)$$

¹ Chaboche

² Wöhler diagram

³ Basquin

که در آن S_f استحکام خستگی، A و B شرایط مرزی نمودار وهلر به ازای چرخه شروع و پایان قسمت دوم منحنی هستند. باید توجه داشت که هرچند روابط تقریبی برای A و B در مراجع ارائه شده است، ولی برای محاسبات دقیق تر، آن ها را باید از طریق آزمایش برای هر ماده تعیین کرد.

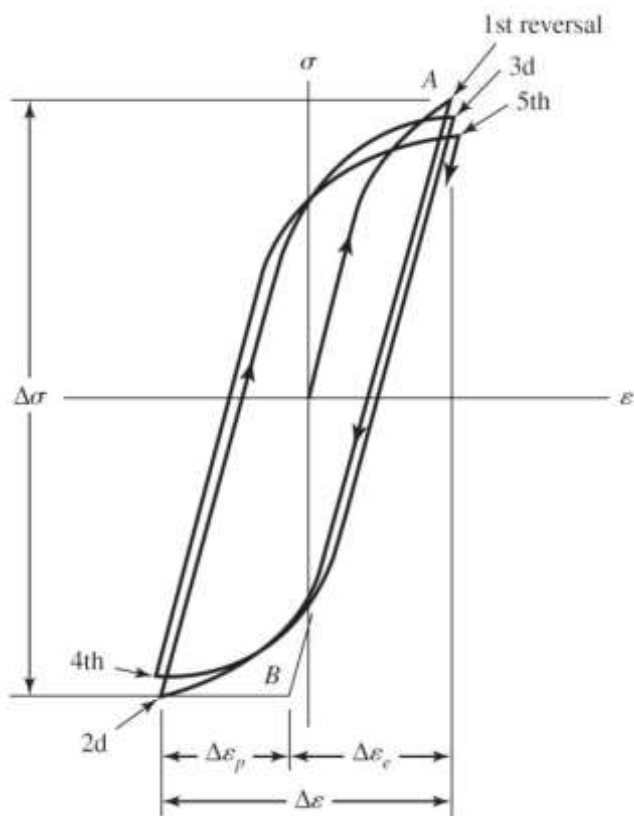


شکل ۲-۱: نمودار وهلر [۱۸]

۲-۲-۲ مدل کرنش - عمر

این روش در هندسه های پیچیده همچون شیارها مناسب است. این روش شامل تجزیه و تحلیل پیچیده ای است که برای تجزیه و تحلیل بوسیله رایانه مناسب است. روش کرنش - عمر از این جهت جذاب است که میتوان به صورت عملی کرنش را توسط کرنش سنج اندازه گیری کرد و این برای تجزیه و تحلیل بوسیله المان محدود (FEM) مناسب است. به هر حال این روش همانند روش تنش - عمر شامل تجزیه و تحلیل رشد ترک نمی باشد و تجزیه تحلیل رشد ترک از طریق استفاده از مکانیک شکست انجام می شود. برای تعیین عمر قطعات باید رابطه ای بین دامنه کرنش و تعداد چرخه بیان شود، به همین منظور لند گراف رفتار خستگی تعداد بسیاری از فولاد های با استحکام بالا را در سیکل های پایین بررسی کرد و در جریان تحقیقات خود نمودارهای زیادی از رفتار تنش - کرنش متناوب رسم نمود و در نهایت منحنی تنش - کرنش به صورت

حلقه هیستریزیس^۱ حاصل شد. حلقه هیستریزیس با دامنه کرنش $\Delta\varepsilon$ که مجموع کرنش های الاستیک و پلاستیک است، مطابق شکل ۲-۲ بدست می آید.



شکل ۲-۲: نمونه ای از منحنی حلقه هیستریزیس [۱۸]

در سال ۱۹۷۵ انجمن طراحی خستگی مهندسیین خودرو (SAE) گزارشی را منتشر کرد که در آن عمر قطعه براساس تعداد تناوب لازم بار برای شکست به دامنه کرنش ارتباط داده شده است. مشهورترین و متعارف ترین رابطه ای که برای مدل کرنش- عمر پیشنهاد شده است، رابطه مانسون- کافین^۲ است. ضرایب و توان های این رابطه را می توان در گزارش SAEJ1099 یافت.

کرنش کل برابر با مجموع مولفه های کرنش الاستیک و پلاستیک است بنابراین دامنه کرنش کل برابر است با:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (2-2)$$

¹ Hysteresis loop

² Manson-Coffin

معادله خط کرنش پلاستیک:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon_F' (2N)^c \quad (3-2)$$

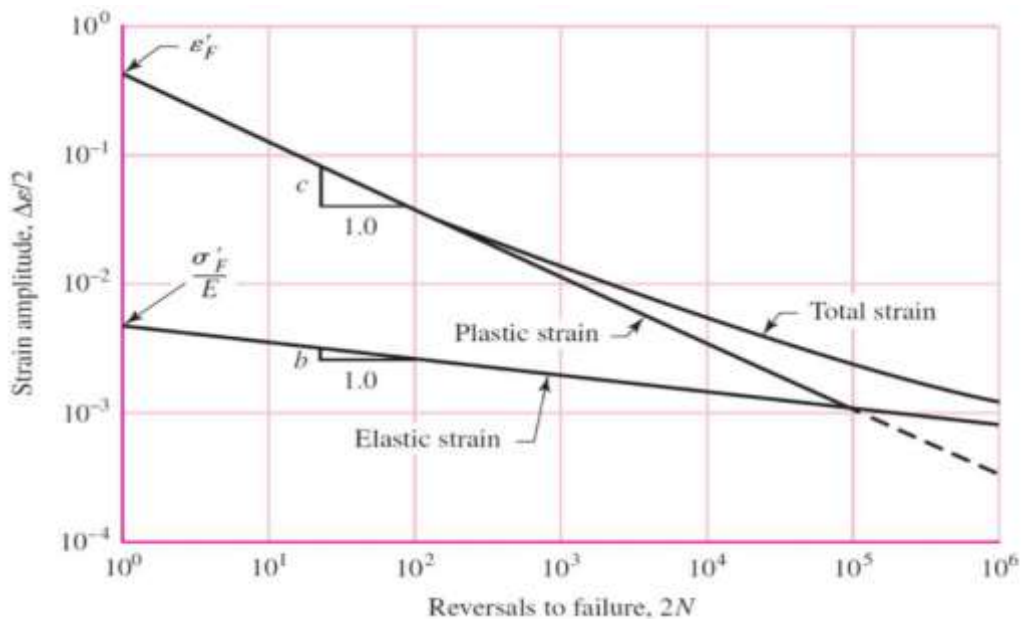
معادله خط کرنش الاستیک:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_F'}{E} (2N)^b \quad (4-2)$$

لذا برای دامنه کرنش کل داریم:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_F'}{E} (2N)^b + \varepsilon_F' (2N)^c \quad (5-2)$$

در رابطه فوق σ_F' ضریب استحکام خستگی، ε_F' ضریب شکل پذیری خستگی، b نمای استحکام خستگی، C نمای شکل پذیری خستگی و E مدول یانگ است که نمایی از آن در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: نمونه ای از منحنی کرنش - عمر [۱۸]

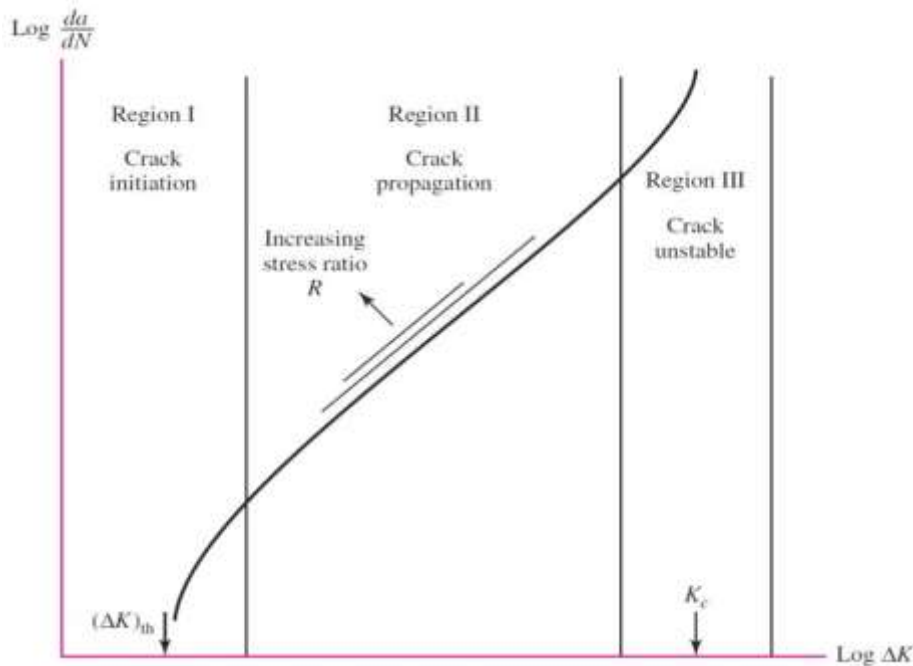
۳-۲-۲ مدل مکانیک شکست مبتنی بر رفتار الاستیک خطی (LEFM)

روش مکانیک شکست الاستیک خطی جهت مطالعه رفتار رشد ترک مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از اساسی ترین روابطی که برای رشد ترک خستگی پیشنهاد شده است، رابطه پاریس- اردوگان می باشد، که

این قانون رابطه ای بین نرخ رشد ترک و محدوده ضریب شدت تنش را در فرآیند بار چرخه ای نشان می دهد [۱۹].

$$\sum \frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (۶-۲)$$

در رابطه فوق a طول ترک، ΔK ضریب شدت تنش و مقادیر C و m به صورت تجربی و از طریق آزمایش رشد ترک خستگی قابل محاسبه می باشند. بنابر این نرخ رشد ترک خستگی تنها تابعی از پارامتر تغییرات ضریب شدت تنش (ΔK) می باشد. اگر چه فاکتورهای زیادی همانند تنش متوسط، نسبت بار و همچنین شرایط محیط مانند خوردگی و دما، منطقه پلاستیک، میکروساختار بر حالت رشد ترک خستگی تاثیر می گذارند اما مهمترین پارامتر میزان تنش و در نتیجه آن میزان فاکتور شدت تنشی است که در محدوده انتشار ترک ایجاد می شود. در شکل ۴-۲ نمودار لگاریتمی آن در محدوده انتشار ترک نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: نمودار رشد ترک خستگی [۱۸]

۴-۲-۲ مدل رشد آسیب خستگی^۱

حقیقت این است که منحنی وهلر علاوه بر وابستگی به دامنه تنش به مقدار میانگین تنش ($\bar{\sigma}$) نیز وابسته است. مقدار سیکلی که ماده تا قبل از وقوع شکست می تواند طی کند با افزایش $\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

^۱ Fatigue damage evolution

تنش میانگین کاهش پیدا می کند. دیاگرام گودمن اثر تنش میانگین و همچنین اختلاف رفتار ماده در کشش و فشار را نشان می دهد. نظریه گودمن محدوده ای از تنش در اختیار قرار می دهد که به ازای این مقادیر و با تعداد تکرار مورد بحث شکست رخ ندهد. هر مشخصه ای از تنش شامل مقدار میانگین و نسبت مقدار بیشینه به کمینه است دیاگرام گودمن منطبق بر یک نقطه است که ممکن است در محدوده امن یا در ناحیه شکست واقع شود. هر دیاگرام گودمن برای تعداد تکرار مشخصی ترسیم می شود. نکته قابل توجه دیگر اثر تاریخچه اعمال خستگی بر وقوع شکست تحت خستگی است.

بر همین اساس ماینز فرض کرد که میزان آسیب خستگی ناشی از دامنه های تنش متفاوت را می توان به صورت خطی با توجه به تعداد سیکل های هر سطح تنش جمع کرد. این مطلب را معمولاً تحت عنوان قضیه ماینز- پالمگرن یا قانون ماینز می شناسند. اگر n_i تعداد سیکل های تنش در یک دامنه مشخص باشد و N_i تعداد سیکل های منجر به شکست در همان سطح تنش داده شده در نمودار S-N باشد، در صد آسیب خستگی D_i ایجاد شده توسط سیکل های تنش از رابطه $D_i = \frac{n_i}{N_i}$ بدست می آید. هنگامی که مجموع آسیب های تمام سطوح تنش برابر یک شود قطعه دچار شکست می شود:

$$\sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (7-2)$$

هرچند قانون آسیب خطی به دلیل استقلال از سطح بار و همچنین سهم ناچیز آسیب برای تنش های کمتر از حد خستگی باعث به وجود آمدن ناهم خوانی بین عمر پیش بینی شده و عمر تجربی می شود اما با این وجود عمر خستگی اجزا را بطور معقولی تخمین می زند [۲۰].

۳-۲ مدل رشد آسیب خستگی بر مبنای مکانیک آسیب

۱-۳-۲ مدل آسیب چابوش - لمتر

در سال های اخیر یک دیدگاه جدید براساس مکانیک محیط های پیوسته پیشنهاد شده است که مکانیک آسیب پیوسته نامیده می شود. این نظریه با رفتار مکانیکی ماده در حال زوال در مقیاس پیوسته سروکار دارد که با مفاهیم اولیه پایه گذاری شده توسط کاجانوف^۱ و رابوتنوف^۲ تطابق دارد. قالب کلی معادله رشد آسیب خستگی بر مبنای مکانیک آسیب پیوسته به شکل زیر می باشد:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = f(D, \sigma) \quad (8-2)$$

¹ Kachanov

² Rabotnov

برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ میلادی، چابوش^۱ رابطه فوق را به صورت زیر پیشنهاد کرد [۲۱].

$$\frac{\delta D}{\delta N} = D^{\alpha(\sigma_{\max}, \bar{\sigma})} \left[\frac{\sigma_a}{C(\bar{\sigma})} \right]^\beta \quad (9-2)$$

که در آن α تابعی از تنش های بیشینه و میانگین، C تابعی از تنش میانگین، σ_a تنش دامنه^۲ و β پارامتر ماده است.

در سال ۱۹۷۹ لمتر و پلامتری^۳ رابطه چابوش را به شکل زیر اصلاح کردند:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = (1 - D)^{\alpha(\sigma_{\max}, \bar{\sigma})} \left[\frac{\sigma_a}{M(\bar{\sigma})(1-D)} \right]^\beta \quad (10-2)$$

که در آن:

$$M(\bar{\sigma}) = C(\bar{\sigma})(\beta + 1)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11-2)$$

سپس در سال ۱۹۸۸ چابوش رابطه پیشنهادی خود را به صورت زیر تصحیح کرد [۱۰].

$$\frac{\delta D}{\delta N} = [1 - (1 - D)]^{\alpha(\sigma_{\max}, \bar{\sigma})} \left[\frac{\sigma_a}{M(\bar{\sigma})(1-D)} \right]^\beta \quad (12-2)$$

که در آن:

$$\alpha = 1 - a \left\langle \frac{\sigma_a - \sigma_a^*}{\sigma_u - \sigma_{\max}} \right\rangle$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a^* = \sigma_f(1 - b_1 \bar{\sigma})$$

$$M = M_0(1 - b_2 \bar{\sigma})$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

در روابط فوق σ_{\min} و σ_{\max} به ترتیب تنش های بیشینه و کمینه در هر چرخه، $\bar{\sigma}$ تنش میانگین هر چرخه، σ_u تنش نهایی ماده در بارگذاری کششی، σ_f حد خستگی ماده در بارگذاری کششی-فشاری کاملاً معکوس شونده ($R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$)، b_1 و b_2 ثوابت ماده و M_0 و β پارامترهای ماده بوده که از آزمایش های خستگی و مقدار a از سعی و خطا به دست می آید. علامت $\langle \dots \rangle$ هم پراوترز ماکولی می باشد:

¹ Chaboche

² Amplitude stress

³ Lemaitre-Plumtree

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x; & x \geq 0 \\ 0; & x < 0 \end{cases} \quad (13-2)$$

این مدل سه مزیت اصلی دارد: اولاً رشد آسیب را زیر حد خستگی امکان پذیر می سازد [۲۱]. ثانیاً قادر به در نظر گرفتن اثر کارسختی با معرفی یک متغیر داخلی است که بیشترین تغییرات کرنش پلاستیک را درحافظه بارگذاری قبلی نگه می دارد. ثالثاً اثر تنش میانگین را به طور مستقیم در نظر می گیرد.

در سال ۱۹۹۰ چاپوش و لمتر مدل مذکور را به حالت چند محوره توسعه دادند.

$$\frac{\delta D}{\delta N} = [1 - (1 - D)^{\beta+1}]^{\alpha(\sigma_{eq \max}, \bar{\sigma}_H)} \left[\frac{A_{II}}{M(\bar{\sigma}_H)(1-D)} \right]^\beta \quad (14-2)$$

که در آن:

$$\alpha = 1 - a \left\langle \frac{A_{II} - A_{II}^*}{\sigma_u - \sigma_{eq \max}} \right\rangle$$

$$A_{II} = \frac{1}{2} J_2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2} (S_{\max} - S_{\min}) : (S_{\max} - S_{\min})}$$

$$A_{II}^* = \sigma_f(1 - 3b_1 \bar{\sigma}_H)$$

$$\sigma_{eq \max} = J_2(\sigma_{\max}) = \sqrt{\frac{3}{2} S_{\max} : S_{\max}}$$

$$\bar{\sigma}_H = \frac{1}{2} (\sigma_{H \max} + \sigma_{H \min})$$

$$\sigma_{H \max} = \frac{1}{3} \text{Tr}(\sigma_{\max})$$

$$\sigma_{H \min} = \frac{1}{3} \text{Tr}(\sigma_{\min})$$

در روابط فوق σ تانسور تنش کوشی^۱، S تانسور تنش انحرافی (کاهش یافته)^۲، J_2 نامتغیر دوم^۳، تنش های انحرافی، σ_{eq} تنش معادل^۴، σ_H تنش هیدرواستاتیک^۵، A_{II} دامنه تنش برشی هشت وجهی^۶، Tr عملگر جمع درایه های روی قطر اصلی^۷ و : نماد ضرب نقطه ای (زده ای)^۸ تانسورها است.

۲-۴ آزمون پله

آزمون پلکانی^۹، آزمونی با پاسخ دو مرحله ای می باشد. به طوریکه برخلاف آنالیز مرسوم عمر- تنش (S-N) آنالیز، با پاسخ دو مرحله ای تعداد دورهای (سیکل های) شکست را بررسی نمی کند، اما با سرعت بیشتری قبولی یا رد در آزمایش را بررسی می کند. بنابراین، جواب آزمون دو مرحله ای برای استفاده به عنوان داده های آزمایش در نظر گرفته می شوند (می آزمایند که در کدام نمونه شکست رخ نداده) [۲۲].

آزمایش پله در ابتدا توسط دیکسون و مود [۲۳] برای آزمون مواد منفجره پیشنهاد شد. در یک آزمون پلکانی، نمونه ها به طور پی در پی آزموده می شوند، با آزمودن نمونه اولیه در تنشی بسیار ناچیز و کم تقریباً برابر صفر S_{init} ، بهترین فرض برای ارزیابی میانگین مقاومت خستگی در هر یک از دو روش تجربی و یا داده های منحنی S-N می باشد. به واسطه سیکل های مشخص در آزمایش ها، مقدار تنش بر روی نمونه در آزمایش بعدی کاهش و یا افزایش می یابد، خواه نمونه اولیه باقی مانده باشد و یا در آزمایش شکست خورده باشد. این فرایند تا پایان همه نمونه های تخصیص یافته جهت آزمون ادامه می یابد. عموماً، اندازه پله (S) مابین سطوح تنش مجاور، ثابت نگاه داشته می شود (تقریباً برابر انحراف استاندارد استحکام خستگی)، که در خصوص آمارهای دیکسون و مود به صورت مستقیم انحراف میانگین و استاندارد استحکام خستگی در دوره های (سیکل های) داده شده تخمین زده می شود. با وجود اینکه انحراف استاندارد واقعی در استحکام خستگی یکی از مجهولات می باشد، اگر فاصله نسبت به انحراف استاندارد واقعی به اندازه ۵۰ درصد نادرست باشد. برای تخمین استحکام خستگی میانگین خیلی مسئله مهمی نیست [۲۴]. با این حال، فواصل دلخواه مابین سطوح تنش می تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۲۵]. در حقیقت، آزمون ها ممکن است با رعایت فواصل غیر یکسان از نظر آماری کارآمدتر از شرایطی با رعایت فواصل یکسان باشند، با این حال آنالیزها خیلی کسالت آور می شوند و معادلات و جداول حاصل برای آزمایش هایی با فواصل یکسان دیگر مفید نیستند [۲۶]. آزمایش هایی با فواصل غیر یکسان بررسی نمی شوند. شکل ۲-۵ شیوه پلکانی را برای دست

¹ Cauchy stress tensor

² Deviatoric (Reduced) stress tensor

³ Second invariant

⁴ Equivalent (Representative) stress

⁵ Hydrostatic stress

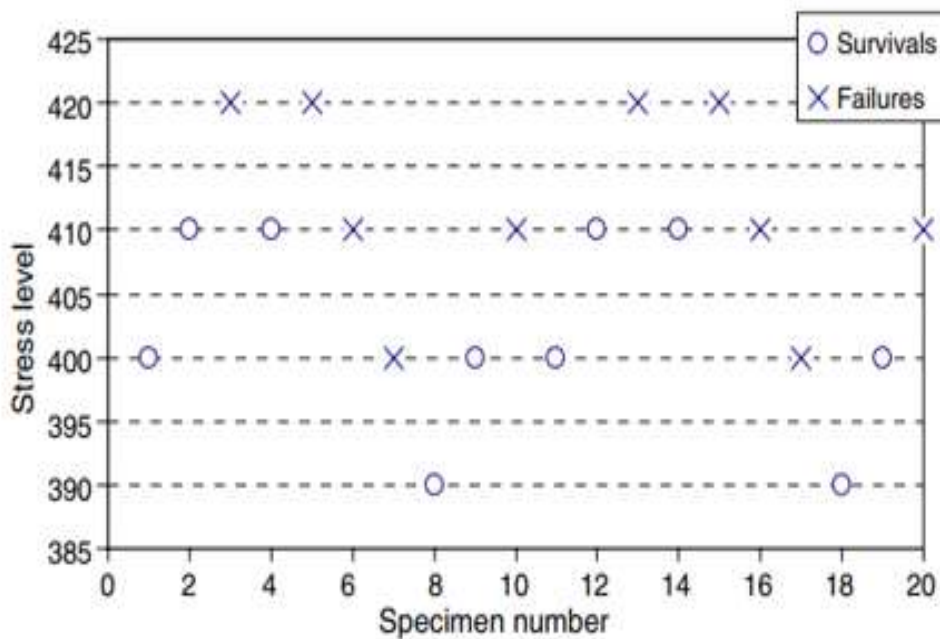
⁶ Octahedral shear stress amplitude

⁷ Trace

⁸ Dot (Scalar) product

⁹ Staircase

یافتن به یک پله ثابت به تصویر کشیده است.



شکل ۲-۵: نمودار آزمون پله [۲۷]

شرط اول در آنالیز دیکسون و مود این است که متغیر مورد بررسی باید توزیع زمان داشته باشد. که در این صورت ممکن است تبدیل مقادیر تنش صورت پذیرد. بدین منظور علاوه بر تبدیلات لگاریتمی تبدیلات توانی نیز به کار می رود. این شرط به نظر خیلی محدود کننده می آید و آزمایش پلکانی را برای برخی از مواد غیر ممکن می سازد [۲۸].

شرط دوم دیکسون و مود این است که تعداد نمونه ها باید زیاد باشد، (۴۰ تا ۵۰ نمونه و یا بیشتر). هرچند، تحقیقات بیشتر مشخص کرد که این شرط برای آزمون استحکام خستگی میانگین واقعاً ضروری نیست. [۲۹] توجه کنید که توزیع میانگین آنالیز دیکسون و مود حتی در نمونه های ۵ تا ۱۰ عدد هم موفق گشته است.

شرط آخر شیوه دیکسون و مود این است که انحراف استاندارد توزیع نرمال باید به طور کلی، قبل از آزمایش برآورد شود. این شرط ضروری است زیرا روابط و معادلات مربوط به برآورد انحراف استاندارد با فرض اندازه پله (گام) به مقدار $\sigma/5$ تا 2σ می باشد که σ انحراف استاندارد واقعی استحکام خستگی می باشد. بنابراین برخی اطلاعات راجع به انحراف استاندارد در تعیین اندازه پله اولیه آزمایش لازم شد. این شرط به شدت آن چه به نظر می رسد لازم نیست، زیرا معمولاً بعضی از داده ها در دسترس می باشند و یا می توان از داده های سایر مواد و یا با تخمین اولیه خام از انحراف استاندارد یک ماده مشابه استفاده نمود. [۲۳].

۲-۵ جمع بندی

با توجه به مطالب گفته شده در قسمت ۲-۲-۴، رابطه خطی ماینز به عنوان مدل رشد آسیب خستگی انتخاب می شود. در این پایان نامه مدل مذکور در حالت الاستیک- پلاستیک در نرم افزار المان محدود برای حل عددی پیاده سازی می شود. سپس با نتایج حاصل شده از آزمایشگاه صحت سنجی می شود.

فصل ۳: آزمون تجربی و پارامترهای ساخت

۳-۱ مقدمه

با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی زیادی هستند، شکست ناگهانی قطعات حساس می‌تواند بسیار فاجعه آمیز و پرمخاطره باشد. دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می‌دهد. خستگی مواد وقتی اتفاق می‌افتد که ماده تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی قرار گیرد که منجر به شکست ناگهانی قطعه می‌گردد. لذا برای پیش‌بینی رفتار مواد تحت تنش‌های سیکلی، تست‌های مختلفی با توجه به نوع، عملکرد و شرایط محیطی قطعه انجام می‌پذیرد. در این مطالعه جهت صحت‌گذاری و تعیین عمر خستگی دسته موتور، آزمون‌های خستگی مطابق استاندارد^۱ PSA انجام می‌پذیرد.

با استفاده از ساخت فیکسچر مخصوص قطعه مورد نظر، دسته موتور تحت بارهای خستگی پرچرخه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا نیروی حد تحمل خستگی در قطعه مشخص شود. در نهایت با ارتباط نتایج عددی و نتایج آزمون تجربی، حد استحکام خستگی در قطعه مورد نظر بدست خواهد آمد. به علاوه آزمون بار استاتیکی نیز انجام خواهد شد و نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

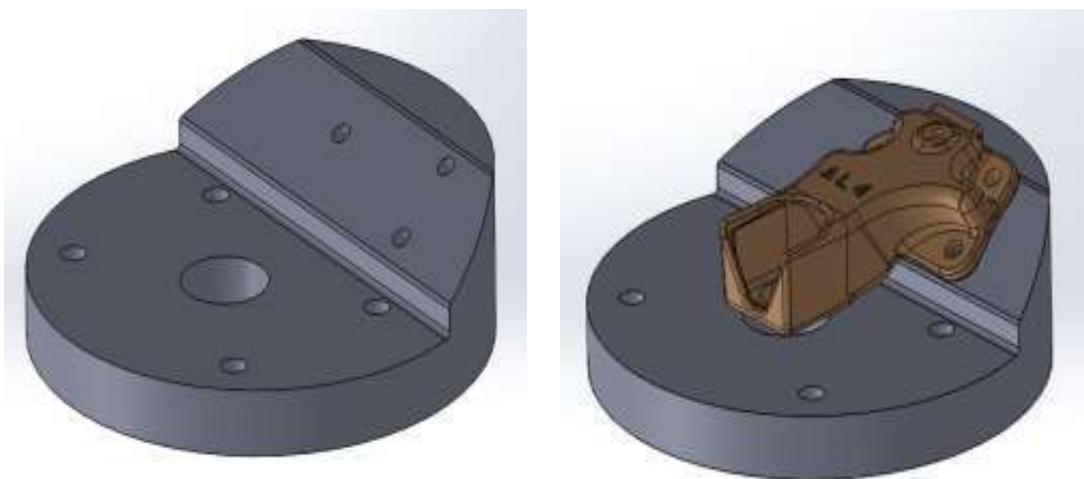
جهت صحت‌گذاری و تعیین عمر خستگی دسته موتور مطابق استاندارد PSA-B320730، نیاز به انجام آزمون‌های خستگی، و آزمون استاتیکی می‌باشد که به منظور نصب نمونه‌های آزمون دسته موتور بر روی دستگاه خستگی اینسترون و انجام آزمون‌های لازم، می‌بایست در مرحله اول طراحی و ساخت فیکسچر و ملزومات آن مطابق الزامات استاندارد PSA انجام پذیرد.

پس از معرفی تجهیزات به بیان تئوری آزمون‌ها و اثر پارامترهای ساخت پرداخته می‌شود. در ادامه نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی به صورت تحلیل داده‌ها و بررسی چشمی ارائه خواهد شد و نتیجه‌گیری نهایی اعلام می‌گردد.

۳-۲ طراحی فیکسچر و پایه نگه دارنده

هدف از طراحی فیکسچر با توجه به نیازها و پاسخگویی به الزامات استاندارد PSA جهت استقرار دهی در موقعیت مناسب با قابلیت تکرار پذیری و نگهداری دسته موتور هنگام انجام آزمون می‌باشد. در این راستا طراحی فیکسچر متناسب با هندسه قطعه و نیازمندی‌های انجام آزمون صورت گرفت. بدنه اصلی فیکسچر جهت انجام آزمون در جهت محور Z طراحی و از جنس VCN 15 به دلیل استحکام مناسب، مقاومت به زنگ زدگی و سختی اولیه حدود ۳۵ راکول سی ساخته شد. ابعاد فیکسچر مطابق با ابعاد دستگاه و قطعه کار طراحی و ساخته شده است. طرح فیکسچر و نحوه مونتاژ قطعه بر روی فیکسچر در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

^۱ Peugeot Société Anonyme



شکل ۳-۱: مدل فیکسچر به همراه دسته موتور [۳۰]

در شکل ۳-۲ فیکسچر ساخته شده به همراه دسته موتور جهت انجام آزمون خستگی بر روی دستگاه نصب شده است. تمامی پیچ ها براساس مشخصات نقشه و سازنده با استفاده از گشتاور سنج با ظرفیت ۱۴۰ نیوتن متر ساخت شرکت Britool هم بندی شده اند.



شکل ۳-۲: فیکسچر و دسته موتور نصب شده بر روی دستگاه اینسترون برای انجام آزمون خستگی [۳۰]

۳-۳ استاندارد PSA در آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور

هدف از انجام این پروسه تست اعتبار سنجی خستگی قطعات فلزی برای سیستم انتقال قدرت که توسط تامین کننده در مرحله پیش از تولید می باشد را توضیح می دهد.

این آزمایش ها براساس اصل قابلیت اطمینان ابعاد مورد استفاده در استاندارد PSA است که نیاز به انجام تمام آزمایش ها برای خستگی قطعات و انجام چندین باره برای ارزیابی در ابعاد آماری آنها لازم است تا توزیع مقاومت قطعات به خستگی، یعنی توزیع حد دوام در N_c (معمولا یک میلیون سیکل تعریف میشود) که تحت تنش های سینوسی قرار می گیرند، بدست آید.

۳-۳-۱ اصطلاحات و تعاریف در آزمون

برای خواسته های این استاندارد موارد زیر تعریف شده است.

F_a : دامنه سیگنال مربوط به نیرو مرجع F_n

F_d : حد تحمل در N_c

F_{d0} : مقدار بار اولیه در تست پله ای

F_m : سیگنال میانگین مربوط به بار مرجع F_n

F_n : نیروی مرجع مشتری ($F_n = -\frac{F_m}{F_a}$)

K : ضریب ضرب F_n برای به دست آوردن مقاومت متوسط قطعات ($K = F_{d0}^*$)

m : مقاومت متوسط تخمین زده شده

N_e : تعداد قطعات آزمایش شده

N_c : تعداد سیکل های بارگذاری

P_a : افزایش بار سطح تست پله ای

q : پراکندگی نسبی

S : انحراف استاندارد

B : عددی است بین انحراف استاندارد F_n و m برای یک اندازه بسیار کوچک

γ : سطح اطمینان

*: اندازه مربوط به بار مرجع مشتری F_n

۳-۳-۲ روش آزمایش

استحکام صفحات، سفتی اتصالات (تنش در پیچ، قطعاتی که روی سفت شدن موثرند) تاثیر بسزایی در نتایج آزمایش دارد. بنابراین ضروریست توجه ویژه ای به این اجزا داشته باشیم. تجهیزات آزمایش باید از سطوح

خودرو استفاده کند. قطعات باید با توجه به نیروی پیشنهادی که درخواست شده، سفت شوند. اتصالات باید با پیچ های جدید و منطبق با صنعت خودروسازی بسته شوند. اتصالات باید برای هر آزمایش تعویض گردد.

۳-۲-۱ اصول فرآیند خستگی

پارامترهای مشخص توزیع مقاومت در برابر خستگی قطعات فلزی، m^* و q تنها مواردی هستند که قبل از اینکه تست های خستگی به شکست برسد، می تواند تخمین زده بشوند لذا برای دست یابی به این مورد، مراحل پیش رو باید به ترتیب بر روی قطعات انجام شوند:

مرحله مقدماتی: تعیین سطح اولیه آزمون پله (F_{d0}^*)

مرحله اول: تعیین m^* به وسیله روش پله ای

مرحله دوم: تعیین انحراف استاندارد (S^*) و در نتیجه پراکندگی نسبی (q)

۳-۲-۲ میزان بارگذاری

نیرو F_n مربوط به مرجع مشتری بدین صورت است:

$$F_n = F_m + F_a \sin wt \quad (۱-۳)$$

که F_m و F_a به ترتیب مقدار میانگین و دامنه نیرو است.

با افزایش نیروی F به میزان ΔF^* نیروی جدید F به صورت زیر بیان می شود.

$$F = F_m + (F^* + \Delta F^*) \cdot F_a \cdot \sin wt \quad (۲-۳)$$

۳-۲-۳ تعیین سطح اولیه آزمون پله

سطح اولیه تست پله ای (F_{d0}^*) می تواند توسط روش های زیر تعیین شود:

اگر مقاومت میانگین قطعات توسط محاسبات تخمین زده شود، این مقدار می تواند مقدار اولیه (F_{d0}^*) برای آزمایش پله ای قرار بگیرد. محاسبه با قطعات پایانی باید تحت شرایط نظیر هندسه قطعات، ویژگی های مکانیکی، مشابه با آزمون اعتبار سنجی انجام شود. بنابراین مقدار اولیه آزمون پله از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$F^* = F_{d0}^* = k \quad (۳-۳)$$

و همچنین می توان از آزمایش لوکاتی انجام شده بر قطعه مرجع، به منظور تعیین مرحله شروع تست پله ای (مقداری نزدیک مقدار میانگین تا ۲۰٪ مقدار ماکزیمم می دهد).
 اگر قطعه مورد آزمایش در N_C سیکل در سطح F^* نشکند، آزمون برای چرخه N_C در سطح F^* به علاوه گام افزایشی ΔF^* ادامه می یابد، تا زمانی که شکست قطعه حاصل شود.

مقادیر ΔF^* و N_C برای قطعات فلزی سیستم تعلیق انتقال قدرت، عبارتند از:

$$N_C = 300\ 000 \text{ cycles}$$

$$\Delta F^* = 0.1$$

تعیین مقاومت میانگین قطعات (m^*) توسط آزمون پله براساس موارد زیر صورت می پذیرد:
 اطلاعات مرحله اولیه

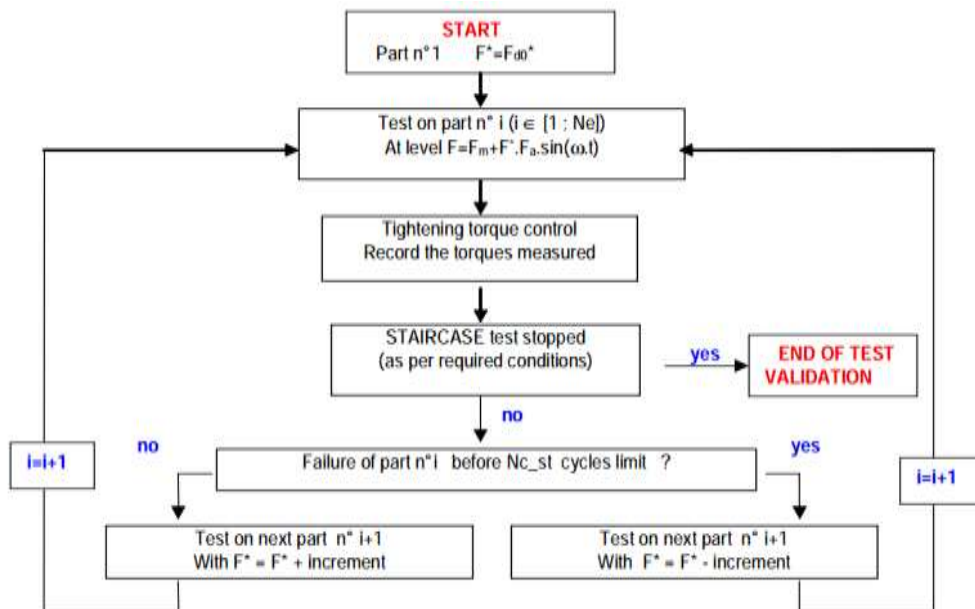
تعداد دور (N_C) در هر مرحله از آزمایش که باید تعریف شود.

در عمل برای قطعات سیستم تعلیق انتقال قدرت، موارد زیر را در نظر می گیریم:

$$F_{d0}^* = 10\% \text{ افزایش}$$

$$N_C = 300\ 000 \text{ cycles}$$

البته می توان تعداد سیکل های بارگذاری (N_C) را پس از توجیه تامین کننده به ۵۰۰۰۰۰ کاهش داد.
 شکل ۳-۳ مراحل تست پله را توضیح می دهد.



شکل ۳-۳: فرآیند آزمون پله [۳۱]

تعداد قطعات مورد آزمایش در تست پله ای باید حداقل ۶ قطعه باشد. هنگامی که تعداد قطعات آزمایش شده بین ۶ تا ۱۰ باشد، تعداد عدم شکست ها بیشتر یا کمتر همانند تعداد شکست ها خواهد بود تا یک تقریب مناسب از میانگین m^* ارائه شود. اگر ۶ قطعه مورد آزمایش قرار گیرد: با ۳ شکست و ۳ عدم شکست، تست پله ای خاتمه می یابد. در موارد دیگر، آزمون ادامه می یابد.

اگر تعداد قطعات مورد آزمایش ۷ باشد، اگر وجود داشته باشد: با ۳ شکست و ۴ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. با ۴ شکست و ۳ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. در موارد دیگر، آزمون ادامه می یابد.

اگر تعداد قطعات مورد آزمایش ۸ باشد، اگر وجود داشته باشد: با ۴ شکست و ۴ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. با ۳ شکست و ۵ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. با ۵ شکست و ۳ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. در موارد دیگر، آزمون ادامه می یابد.

اگر تعداد قطعات آزمایش شده ۹ است، اگر وجود دارد: با ۴ شکست و ۵ عدم شکست، آزمون پله خاتمه یافته است. با ۵ شکست و ۴ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. در موارد دیگر، آزمون ادامه می یابد.

اگر تعداد قطعات آزمایش شده ۱۰ باشد، اگر وجود داشته باشد: با ۵ شکست و ۵ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. با ۴ شکست و ۶ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. با ۶ شکست و ۴ عدم شکست، آزمون پله خاتمه می یابد. در موارد دیگر، آزمون ادامه می یابد.

اگر تعداد قطعات آزمایش شده ۱۱ باشد: هرچه نتیجه آزمون باشد، آزمون پله خاتمه می یابد یا معلق می شود. اگر نسبت بین شکست و عدم شکست کمتر یا برابر با $۸/۳$ یا برابر یا بالاتر از $۳/۸$ باشد، عرضه کننده باید با PSA تماس بگیرد. این موقعیت می

تواند زمانی رخ دهد که پراکندگی قابل توجه است. به طور کلی، تخمین نسبتاً خوبی از m^* زمانی که ۶ قطعه آزمایش شده وجود دارد، بدست می آید.

۳-۲-۴-۳ آزمون لوکاتی

این مرحله شامل ادامه آزمون بر روی قطعات بدون شکست در پایان تست پله برای تعیین انحراف استاندارد (S^*) از مجموع قطعات آزمایش شده است. این مرحله معمولاً هنگامی آغاز میشود که آزمون آزمون پله خاتمه می یابد و تعداد قطعاتی که آزمایش شده مطابق با الزامات شرح داده شده در پاراگراف بالا رفتار کنند. با این حال به دلایل عملی می توان آن را به منظور اجتناب از جداسازی قطعات غیر شکسته بلافاصله آغاز کرد.

برای قطعات فلزی بخش تعلیق:

تعداد دور: برای آزمایش همان تعداد سیکل ها تست پله را نگه می داریم.

افزایش بار، مشابه آزمون پله $F_d = 10\%$

در انتهای هر مرحله از آزمون لوکاتی پس از پله لازم است میزان سفتی اتصالات محاسبه و یادداشت شود.

برای بخش های فلزی اگزوز:

توصیه می شود که همان تعداد سیکل را برای آزمون پله حفظ کنیم، با این حال امکان کاهش به ۲۰۰۰۰۰ دور امکان پذیر است.

افزایش بار، مشابه آزمون پله $F_d = 10\%$

در عمل، اگر تعداد قطعات آزمایش شده در پایان آزمایش پله :

بالاتر از ۵۰ قطعه باشد ، برآورد خوبی از انحراف استاندارد وجود دارد و فاز دوم انجام نمی گیرد.

کمتر از ۵۰ قطعه باشد، دو مورد ممکن است بوجود آید:

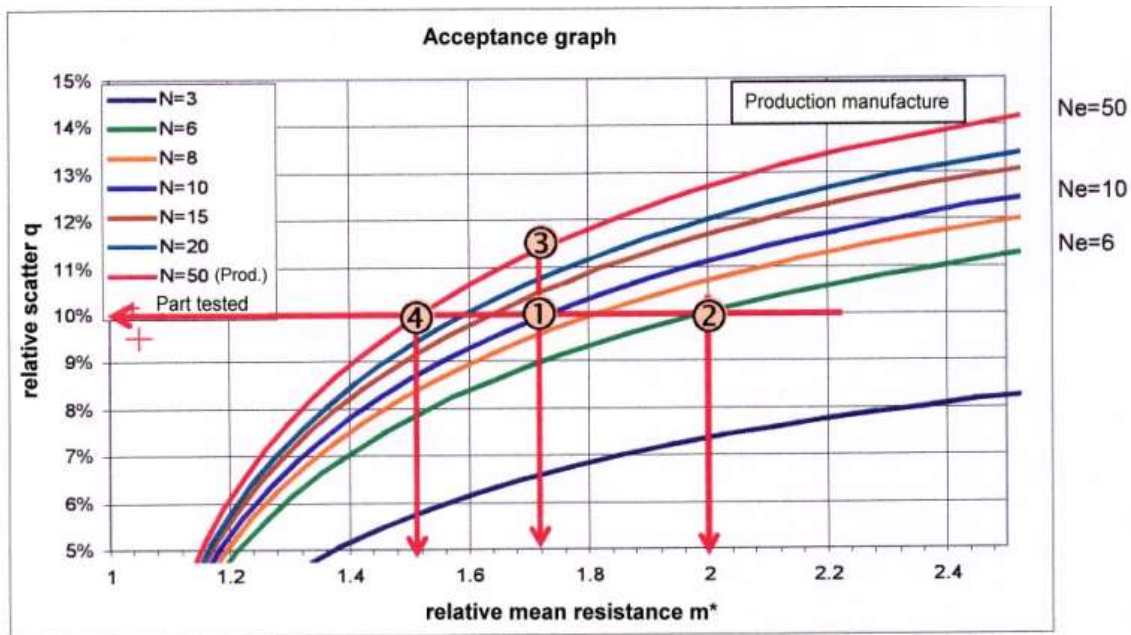
(۱) یا تامین کننده خود را با قرارداد با مقدار پراکندگی نسبی متعهد میکند و مرحله دوم انجام نمیگیرد.

(۲) یا تامین کننده خود را با قرارداد با مقدار پراکندگی نسبی متعهد نمیکنند و مرحله دوم انجام میگیرد.

در این مورد مقدار حد دوام بیشتر و تعداد کمتر قطعات قابل قبول است.

۳-۳-۳ روش ارزیابی

آزمایشات بر روی تعداد N_e قطعه منجر به دستیابی m^* و q می شود. پذیرش این قسمت با استفاده از نمودارهای خستگی قطعات فلزی که به عنوان نمونه در شکل ۳-۴ نشان داده شده سنجیده میشود. به عبارت دیگر، $(q$ و $m^*)$ آن باید زیر منحنی مربوط به تعداد قطعات آزمایش شده باشد.



شکل ۳-۴: نمودار پذیرش برای آزمون خستگی قطعات فلزی در قسمت سیستم تعلیق انتقال نیرو [۳۱]

۳-۳-۳-۱ محاسبه مقدار متوسط، انحراف استاندارد و پراکندگی نسبی

آزمون لوکاتی، برای محاسبه و به دست آوردن میانگین و انحراف استاندارد در نظر گرفته نمیشود. m^* بر اساس آزمایش پله تنها بدست می آید لذا از تست لوکاتی برای تعیین این مقدار استفاده نمی شود. از طرفی شرایط برای به دست آوردن انحراف استاندارد بر اساس آزمایش های پله به ندرت انجام می شود و در عمل به تعداد قابل توجهی از قطعه برای تست برای این عنوان مورد نیاز است. بنابراین انحراف معیار S^* از بارهای معادل F_d^* محاسبه میشود، در نتیجه داریم:

$$q = \frac{S^*}{m^*} \quad (۴-۳)$$

۳-۳-۲ مقادیر پراکندگی نسبی

اگر پراکندگی نسبی برای تامین کننده ناشناخته باشد، در این حالت تعداد کم آزمایش (به عنوان مثال بین ۶ تا ۱۵) منجر به مقدار پراکندگی نسبی q می شود و اگر تعداد قطعات تست شده کمتر باشد نیاز به مقاومت معادل بیشتر دارد.

اگر پراکندگی نسبی برای تامین کننده شناخته شده باشد، فروشنده قرارداد خود را با پراکندگی نسبی q تولیدی خود متعهد می کند. به این ترتیب، طراح می تواند ابعاد قطعات فلزی را براساس این پراکندگی نسبی q در نظر بگیرد مفروضات چنین تعهدی باید برای PSA توجیه شود. علاوه بر این، مهم است که q در پایگاه های داده ها نگه داشته شود و آنها را برای کنترل تولید به روز نگه داریم و نظارت کنیم. تامین کننده باید PSA را از این نظارت مطلع سازد.

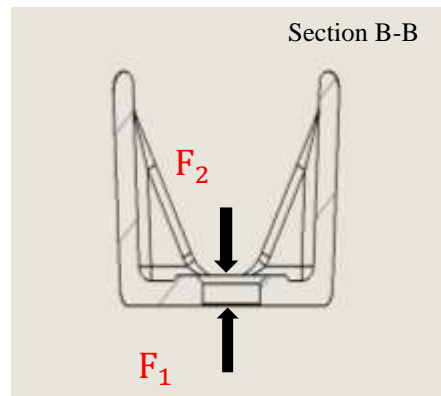
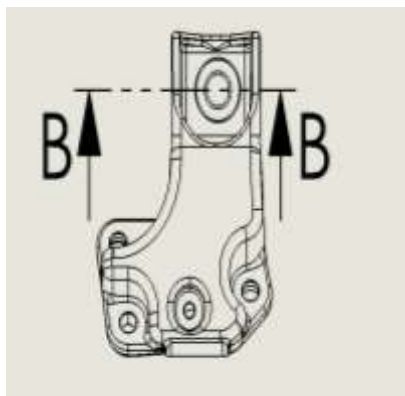
۳-۳-۴ معیار های اتمام آزمون

معیار توقف تست مربوط به وقوع یکی از رویدادهای زیر است:

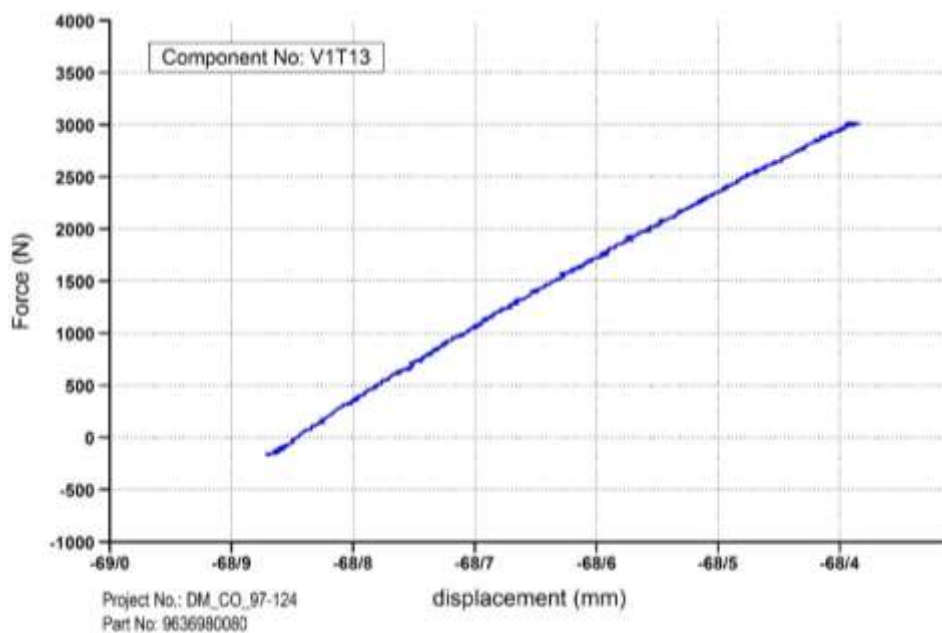
- ۱) تشخیص اولین ترک خستگی قابل مشاهده توسط آزمایش کننده (نفوذ رنگ ...)
- ۲) تشخیص از دست دادن سفتی قطعه توسط سطوح تست
- ۳) یک شکست شفاف
- ۴) قطع حداقل یک اتصال در مونتاژ (در صورت امکان)

۳-۴ آزمون استاتیکی

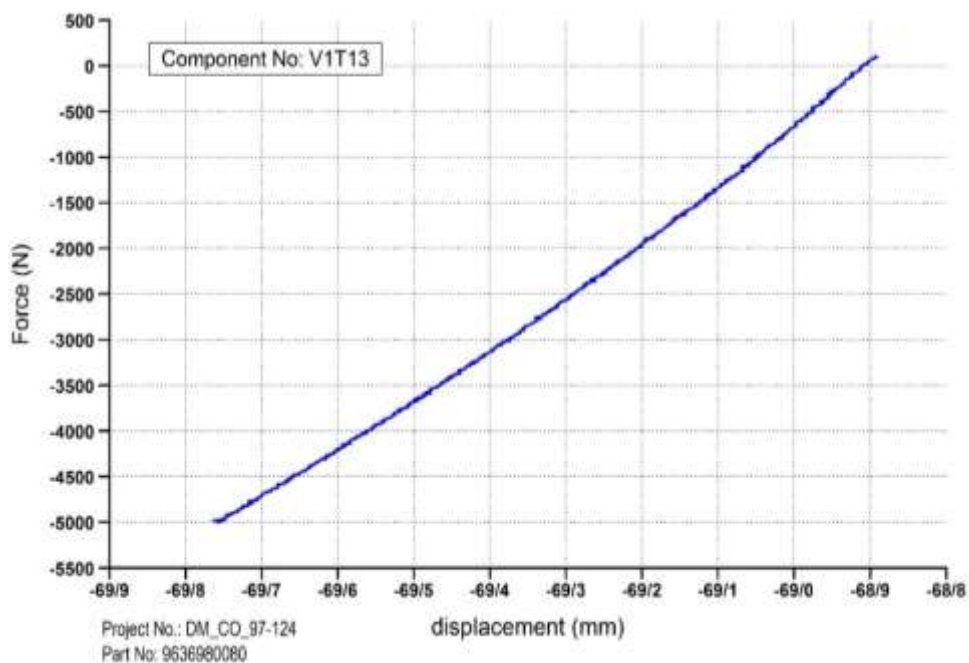
به منظور شناسایی قسمت های بحرانی در نمونه های آزمایشگاهی تست های استاتیکی کشش و فشار بر روی قطعات انجام شد. این آزمون مطابق شکل ۳-۵ در دو جهت F_1 و F_2 انجام شد که این نیرو ها در جهت محور Z می باشند. نیروی F_1 ، نیرویی معادل ۳۰۰۰ نیوتن در جهت مثبت محور Z (کششی) و نیروی F_2 ، نیرویی معادل ۵۰۰۰ نیوتن در جهت منفی محور Z (فشاری) به دسته موتور وارد می کنند. در شکل های ۳-۶ تا ۳-۱۱ نمودارهای نیرو برحسب جابجایی در جهت محور Z را نشان داده است.



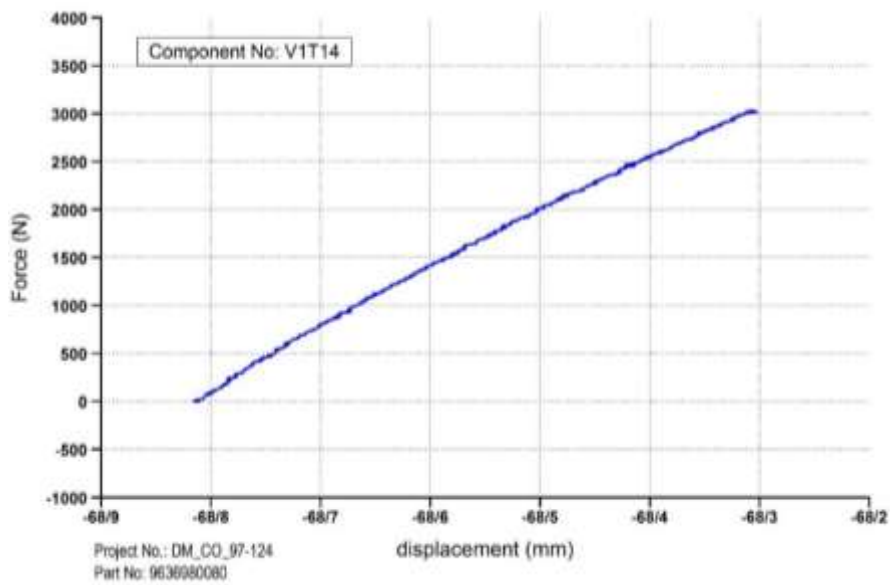
شکل ۳-۵: جهت های اعمال نیرو در دسته موتور



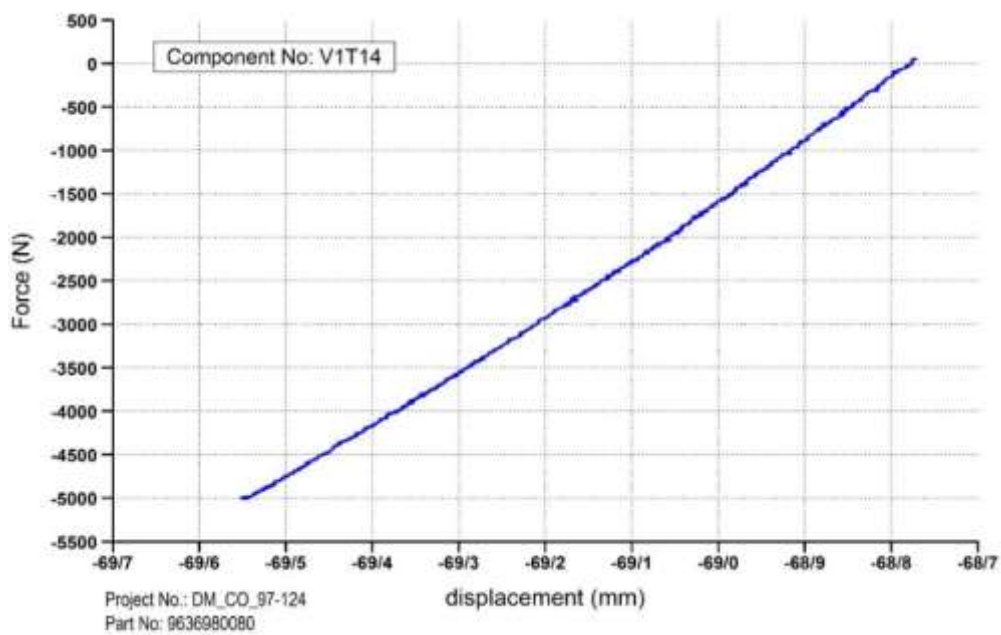
شکل ۳-۶: نمودار نیرو و جابجایی قطعه V1T13 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F_1 [۳۰]



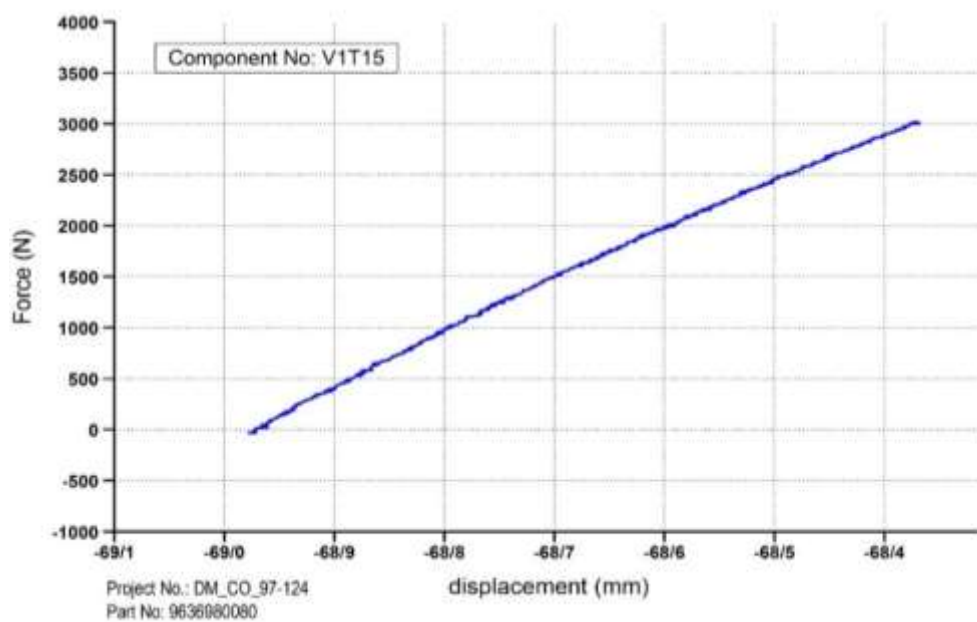
شکل ۳-۷: نمودار نیرو و جابجایی قطعه V1T13 با نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن در جهت F_2 [۳۰]



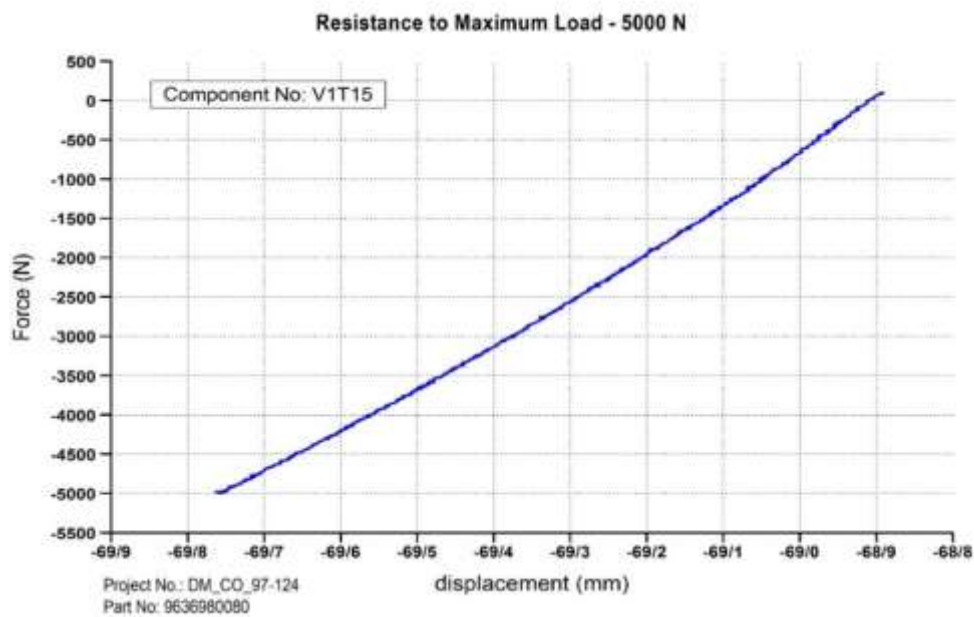
شکل ۳-۸: نمودار نیرو و جابجایی قطعه V1T14 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F_1 [۳۰]



شکل ۳-۹: نمودار نیرو و جابجایی قطعه V1T14 با نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن در جهت F_2 [۳۰]



شکل ۳-۱۰: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T15 با نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن در جهت F_1 [۳۰]



شکل ۳-۱۱: نمودار نیرو جابجایی قطعه V1T15 با نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن در جهت F_2 [۳۰]

۳-۵ آزمون خستگی پر چرخه دسته موتور در جهت Z

با توجه به نقش اساسی دسته موتور در خودرو، طراحی و ساخت آن باید از مقاومت خستگی بالایی برخوردار باشد. در همین راستا از آزمون خستگی مطابق با استاندارد PSA را بروی دسته موتور به وسیله دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ با ظرفیت ۲۵۰ KN و همچنین حسگر نیرو سنج ساخت شرکت اینسترون انجام شد.

به منظور انجام آزمون خستگی، فیکسچری از جنس VCN 15 به دلیل استحکام مناسب، مقاومت به زنگ زدگی و سختی اولیه حدود ۳۵ راکول سی با هدف پاسخگویی به نیازها و الزامات استاندارد PSA طراحی شد که قطعه با اتصالات استاندارد خودرو به آن و در نهایت به دستگاه اینسترون متصل گردید. که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱: ثابت کننده و دسته موتور نصب شده بر روی فک پایین دستگاه اینسترون [۳۰]

۳-۵-۱ بررسی نمونه اولیه

آزمون لوکاتی با نیروی ۲۵۰۰ نیوتن به منظور تعیین سطح اولیه آزمون پله انجام شد. پس از اعمال چهار مرحله بارگذاری با افزایش ۱۰ درصدی نیرو تا ۳۰۰ هزار چرخه و عدم شکست، و در نهایت در مرحله پنجم با نیروی ۳۵۰۰ نیوتن قطعه دچار شکست شد. به منظور بررسی دقت در آزمایش و اطمینان در تکرار پذیر بودن شکست در آزمون پله ای در این نیرو، نیروی تجمعی در آزمون لوکاتی مقدماتی، طبق معادله ۳-۵، با نیروی ۳۲۵۰ نیوتن در یک میلیون چرخه معادل گردید.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = C \quad (۳-۵)$$

n_i تعداد چرخه تکرار بارگذاری قطعه و N_i تعداد چرخه ای که قطعه می تواند بدون تغییر در بارگذاری طی کند. در این رابطه $0.7 \leq C \leq 2$ است که برای محاسبه $C = 1$ در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از معادله ۳-۶، نیروی معادل در یک میلیون چرخه محاسبه شد.

$$S_f = a N^b \quad (6-3)$$

که در آن:



$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \quad (7-3)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right) \quad (8-3)$$



که S_{ut} استحکام نهایی، S_e استحکام حد دوام و f ضریب استحکام خستگی است.

۳-۱-۱-۵-۱ آزمون غیر مخرب



برای بررسی ترک و اندازه آن با توجه به جنس نمونه ها و ویژگی های آن از روش غیر مخرب مایع نافذ استفاده شد که در شکل های ۳-۱۳ تا ۳-۲۰ نشان داده شده است.

Primary locati test-T02					
Load:	1.0*2500	1.1*2500	1.2*2500	1.3*2500	1.4*2500
Cycle (M. C.):	0.3	0.3	0.3	0.3	0.21
					



شکل ۳-۱۲: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T02 [۳۰]

Staircase test-T03	Load: $1.3F_n = 3250N$	Cycle (M. C.): 0.9
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		



شکل ۳-۱۳: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T03 [۳۰]

Staircase test-T04	Load: $1.2F_n = 3000N$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load: $1.3F_n = 3250N$	Cycle (M. C.): 0.39
		

شکل ۳-۱۴: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T04 [۳۰]

Staircase test-T05	Load: $1.3F_n = 3250N$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		

شکل ۳-۱۵: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T05 [۳۰]

Staircase test-T06	Load: $1.2F_n = 3000N$	Cycle (M. C.): 0.97
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		

شکل ۳-۱۶: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T06 [۳۰]

Staircase test-T07	Load: $1.1F_n = 2750 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load: $1.2F_n = 3000 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.49



شکل ۳-۱۷: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T07 [۳۰]

Staircase test-T08	Load: $1.2F_n = 3000\text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.82
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):



شکل ۳-۱۸: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T08 [۳۰]

Staircase test-T10	Load: $1.1F_n = 2750 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load: $1.2F_n = 3000 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.12



شکل ۳-۱۹: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V01T10 [۳۰]

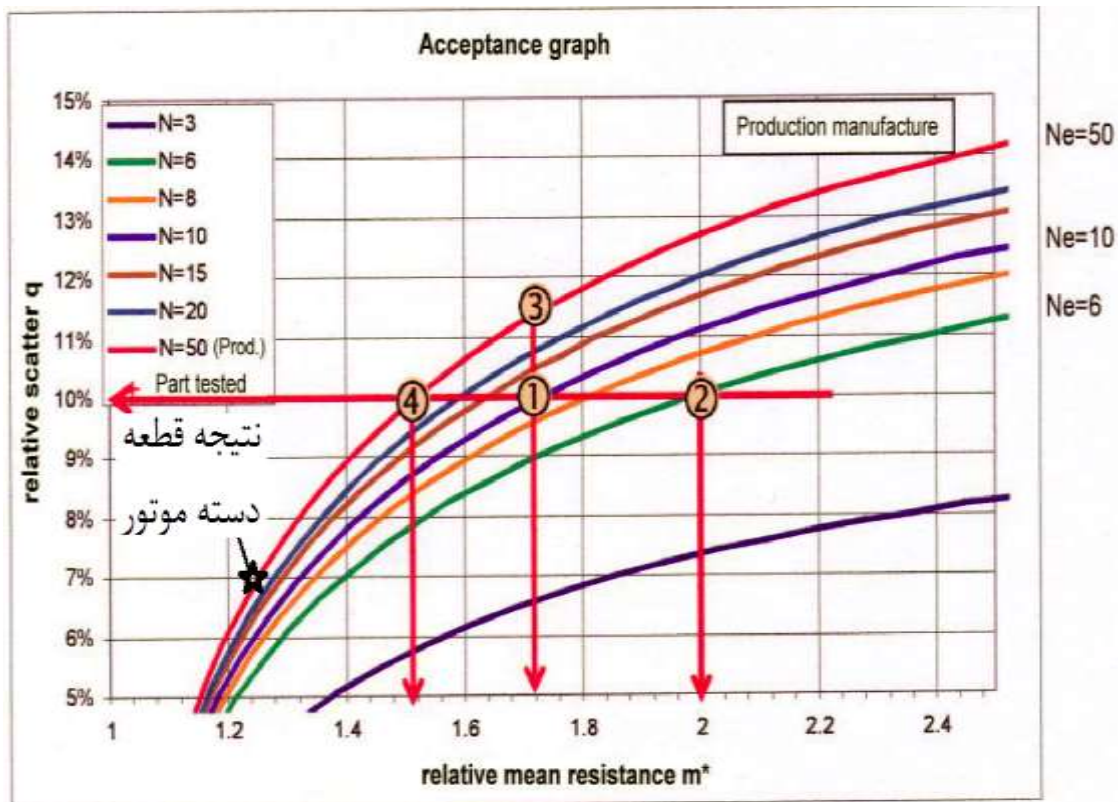
۳-۱-۵-۲ نتایج آزمون نمونه اول

در آزمون غیر مخرب، محل وقوع ترک در قطعات مختلف مشخص شد. شکل ۳-۲۱ نتایج آزمون اولیه پله و آزمون ثانویه پله و لوکاتی را نشان می دهد، براین اساس در آزمون لوکاتی مقدار $Fd^* = 1.30$ بدست آمد.

LEGEND		PSA PEUGEOT CITROEN																																																																																																																										
	To be filled	FATIGUE LIFE TESTING SYNTHESIS STAIRCASE-LOCATI METHOD Durability strength at N number of cycle: 1,000,000																																																																																																																										
	No change Possible																																																																																																																											
	Can be changed if necessary																																																																																																																											
	Formula detailed in the call																																																																																																																											
GLOBAL INFORMATION																																																																																																																												
Supplier:	SAPCO	Responsible:	SAPCO																																																																																																																									
vehicle project:	206	Part tested:	206 Mounting																																																																																																																									
Part reference:	9636980080																																																																																																																											
Test performed:	FATIGUE TEST																																																																																																																											
Fatigue life contract: 1 F _n = 0 +/- 2000 N at 1,000,000 cycles																																																																																																																												
DETERMINATION OF FIRST VALUE OF LOCATI TEST			(This determination is based on numerical analysis)																																																																																																																									
Material used for tested parts:	Alum. Alky.																																																																																																																											
Relative dispersion accepted for supplier conception:	0.1																																																																																																																											
Force used for calculation:	1 F _n																																																																																																																											
Numerical results in number of cycles:	1,000,000																																																																																																																											
First value to apply for Locati test:	(it can be changed by hand) 1 F _n	at	1,000,000 cycles																																																																																																																									
TEST RESULTS AND FATIGUE LIFE EQUIVALENT CALCULATION																																																																																																																												
FIRST VALUE TO APPLY ON STAIRCASE (Locati method)																																																																																																																												
PART 0	Number of load	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																																																																																																												
	N of cycle in Million	0.30	0.30	0.30	0.30	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																												
	F [*] =F/F _n	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4																																																																																																												
RESULT PART 0:		F _d [*] =F _{d0} /F _n = 1.30		F _n		at		1000000		cycles																																																																																																																		
STAIRCASE: mean strength result		LOCATI TEST																																																																																																																										
F _{d0} : 1.30 F _n Step= 0.1 (=q*F _{d0})		Remark: If you have to perform more than 4 level, you have to include in the table only the last 4 step!																																																																																																																										
Broken Part: *		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Load case 1</th> <th>Load case 2</th> <th>Load case 3</th> <th>Load case 4</th> <th>F_{equi}</th> </tr> <tr> <th>N(Mc)</th> <th>F[*]</th> <th>N(Mc)</th> <th>F[*]</th> <th>N(Mc)</th> <th>F[*]</th> <th>N(Mc)</th> <th>F[*]</th> <th>F_{equi}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.00</td><td>1.30</td><td></td><td></td><td>1.30</td></tr> <tr><td>0.90</td><td>1.30</td><td>1.40</td><td>1.50</td><td>1.28</td></tr> <tr><td>1.00</td><td>1.20</td><td>0.99</td><td>1.30</td><td>1.31</td></tr> <tr><td>1.00</td><td>1.30</td><td>1.40</td><td>1.50</td><td>1.30</td></tr> <tr><td>0.97</td><td>1.20</td><td>1.30</td><td>1.40</td><td>1.19</td></tr> <tr><td>1.00</td><td>1.10</td><td>0.49</td><td>1.20</td><td>1.22</td></tr> <tr><td>0.82</td><td>1.20</td><td>1.30</td><td>1.40</td><td>1.16</td></tr> <tr><td>1.00</td><td>1.10</td><td>0.12</td><td>1.20</td><td>1.13</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Load case 1	Load case 2	Load case 3	Load case 4	F _{equi}	N(Mc)	F [*]	N(Mc)	F [*]	N(Mc)	F [*]	N(Mc)	F [*]	F _{equi}	1.00	1.30			1.30	0.90	1.30	1.40	1.50	1.28	1.00	1.20	0.99	1.30	1.31	1.00	1.30	1.40	1.50	1.30	0.97	1.20	1.30	1.40	1.19	1.00	1.10	0.49	1.20	1.22	0.82	1.20	1.30	1.40	1.16	1.00	1.10	0.12	1.20	1.13																																																																	
Load case 1	Load case 2					Load case 3	Load case 4	F _{equi}																																																																																																																				
N(Mc)	F [*]					N(Mc)	F [*]	N(Mc)	F [*]	N(Mc)	F [*]	F _{equi}																																																																																																																
1.00	1.30							1.30																																																																																																																				
0.90	1.30					1.40	1.50	1.28																																																																																																																				
1.00	1.20					0.99	1.30	1.31																																																																																																																				
1.00	1.30					1.40	1.50	1.30																																																																																																																				
0.97	1.20					1.30	1.40	1.19																																																																																																																				
1.00	1.10					0.49	1.20	1.22																																																																																																																				
0.82	1.20					1.30	1.40	1.16																																																																																																																				
1.00	1.10					0.12	1.20	1.13																																																																																																																				
Non damaged part: 0																																																																																																																												
Start Level	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	Piece	F ₁ Mark																																																																																																																	
1	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8																																																																																																																			
1.3			*							1	T02																																																																																																																	
1.2			o							2	T03																																																																																																																	
1.3				**						3	T04																																																																																																																	
1.2			*							4	T05																																																																																																																	
1.1		o								5	T06																																																																																																																	
1.2			*							6	T07																																																																																																																	
1.1		o								7	T08																																																																																																																	
1.1			o							8	T09																																																																																																																	
										9																																																																																																																		
										10																																																																																																																		
										11																																																																																																																		
										12																																																																																																																		
										13																																																																																																																		
										14																																																																																																																		
										15																																																																																																																		
										16																																																																																																																		
										17																																																																																																																		
										18																																																																																																																		
										19																																																																																																																		
Mean strength m1= 1.20		Mean strength																																																																																																																										
For information: m1 must be closed to m2 to Confirm validity of test result m2		m2= 1.24 F _n at 1,000,000 cycles																																																																																																																										
		q= 0.67 (proto relative dispersion)																																																																																																																										

شکل ۳-۲۰: نتایج آزمون خستگی پرچرخه دسته موتور در جهت محور Z (نمونه اولیه) [۳۰]

همچنین آزمون ثانویه خستگی پرچرخه دسته موتور، شکست قطعات را در نیروهای مختلف نشان می دهد. باتوجه به شکل ۳-۲۱، $m^* = 1.24$ با پراکندگی نسبی ۰/۰۷ می باشد که براساس شکل ۳-۲۲ غیر قابل قبول ارزیابی می شود.

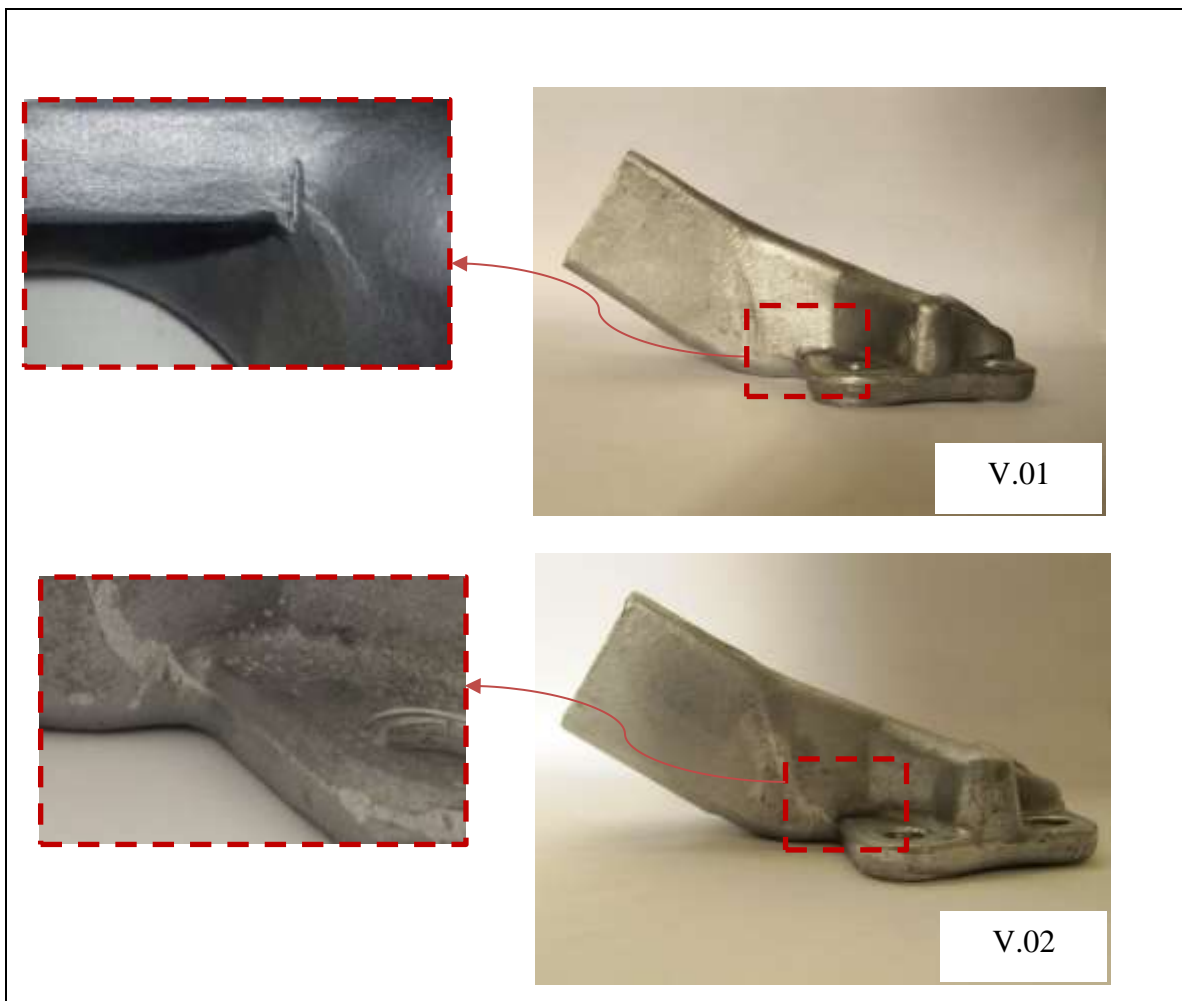


شکل ۳-۲۱: نتیجه آزمون قطعه دسته موتور بالا راست خودرو پژو در نمودار خستگی مرجع [۳۰]

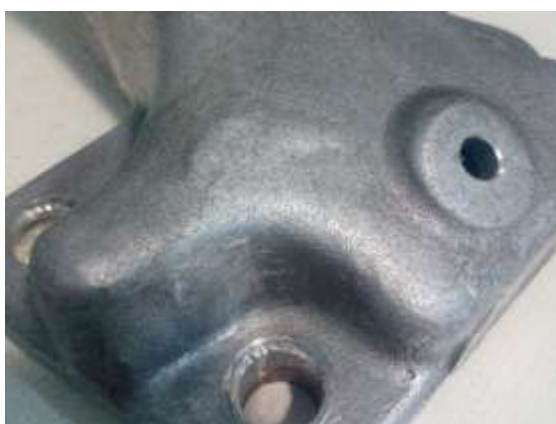
۳-۵-۲ بررسی نمونه ثانویه (نمونه اصلاح شده)

پس از بررسی نتایج آزمون خستگی پرچرخه نمونه اولیه و همچنین باتوجه به شکل ۳-۲۳ عیب های ساخت قطعه طی مذاکرات صورت گرفته با قطعه ساز اصلاح شدو همچنین نواحی بحرانی قطعه تقویت گردید که در شکل ۳-۲۴ اثر تقویت نواحی بحرانی با آزمون مایع نافذ نشان داده شده است. نحوه انجام آزمون دوم مطابق آزمون اول می باشد.

مطابق قبل برای شناسایی نواحی ترک خورده از آزمون مایع نافذ که در شکل های ۳-۲۵ تا ۳-۳۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۲: اصلاح قطعه توسط فرز انگشتی و مقایسه نمونه اولیه با نمونه ثانویه (اصلاح شده) [۳۰]



(ب)



(الف)



شکل ۳-۲۳: الف) ترک در نمونه اولیه ب) نمونه ثانویه (اصلاح شده) پس از تقویت ناحیه بحرانی [۳۰]

Primary locati test-V2T01					
Load:	1.0*2500	1.1*2500	1.2*2500	1.3*2500	1.4*2500
Cycle (M. C.):	0.3	0.3	0.3	0.3	0.29




شکل ۳-۲۴: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T01 [۳۰]


Staircase test-V2T02	Load: $1.3F_n = 3250N$	Cycle (M. C.): 0.9
Locati after staircase	Load: $1.4F_n = 3500N$	Cycle (M. C.): 0.5

شکل ۳-۲۵: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T02 [۳۰]

Staircase test-V2T03	Load: $1.4F_n = 3500N$	Cycle (M. C.): 0.57
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		



شکل ۳-۲۶: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T03 [۳۰]

Staircase test-V2T04	Load: $1.3F_n = 3250 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load: $1.4F_n = 3500 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.25
		



شکل ۳-۲۷: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T04 [۳۰]

Staircase test-V2T05	Load: $1.4F_n = 3500 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.71
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		

شکل ۳-۲۸: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T05 [۳۰]

Staircase test-V2T06	Load: $1.3F_n = 3250 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.89
Locati after staircase	Load:	Cycle (M. C.):
		

شکل ۳-۲۹: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T06 [۳۰]

Staircase test-V2T08	Load: $1.2F_n = 3000 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 1.0
Locati after staircase	Load: $1.3F_n 3250 \text{ N}$	Cycle (M. C.): 0.29
		

شکل ۳-۳۰: شناسایی ناحیه ترک خورده با آزمون مایع نافذ V02T08 [۳۰]

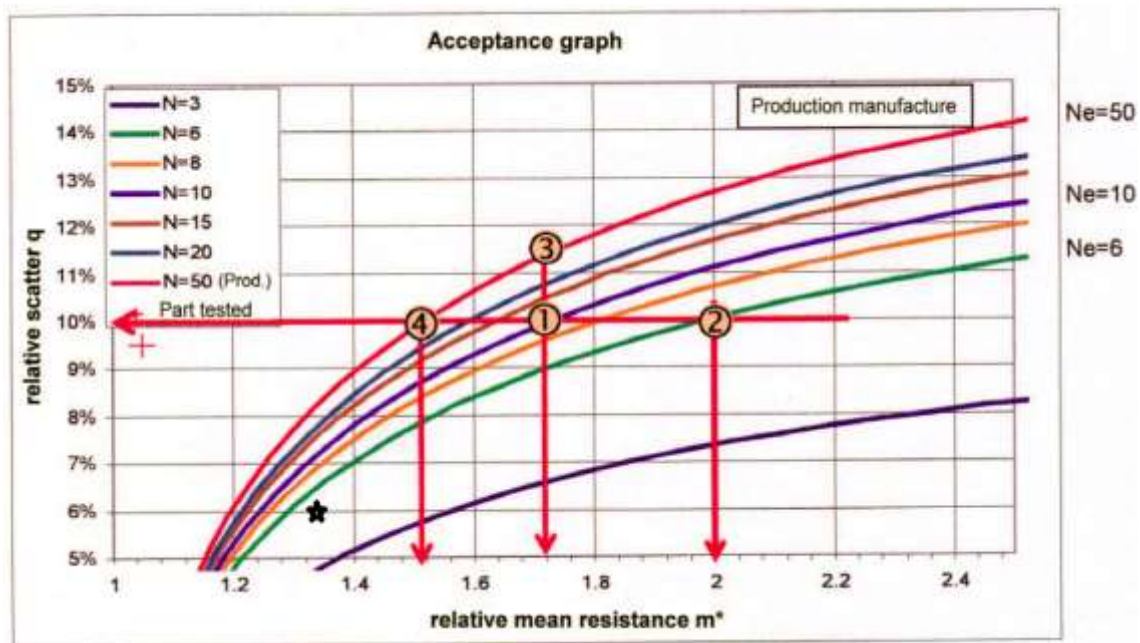
۳-۵-۱-۲-۱ نتایج آزمون نمونه ثانویه (نمونه اصلاح شده)

در آزمون غیر مخرب، محل وقوع ترک در قطعات مختلف مشخص شد. شکل ۳-۳۲ نتایج آزمون اولیه پله و آزمون ثانویه پله و لوکاتی را نشان می دهد، براین اساس در آزمون لوکاتی مقدار $Fd^* = 1.32$ بدست آمد.

LEGEND		PSA PEUGEOT CITROEN																									
	To be filled	FATIGUE LIFE TESTING SYNTHESIS STAIRCASE-LOCATI METHOD																									
	No change Possible	Durability strength at N number of cycle: 1,000,000																									
	Can be changed if necessary																										
	Formula deleted in the cell																										
GLOBAL INFORMATION																											
Supplier:	SAPCO	Responsible:	SAPCO																								
vehicle project:	206	Part tested:	206 Mounting - Ver 02																								
Part reference:	9636980060																										
Test performed:	FATIGUE TEST																										
Fatigue life contract: 1 Fn= 0 +/- 2500 N at 1,000,000 cycles																											
DETERMINATION OF FIRST VALUE OF LOCATI TEST																											
Material used for tested parts:		(This determination is based on numerical analysis)																									
Relative dispersion accepted for supplier conception:		Alum. Alloy																									
Force used for calculation:		0.1																									
Numerical results in number of cycles:		1 Fn																									
First value to apply for Locati test:		1,000,000																									
(it can be changed by hand) 1 Fn at 1,000,000 cycles																											
TEST RESULTS AND FATIGUE LIFE EQUIVALENT CALCULATION																											
FIRST VALUE TO APPLY ON STAIRCASE (Locati method)																											
PART 0	Number of load	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15											
	N of cycle in Million	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00											
	F*=F/Fn	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4											
RESULT PART 0:		Fd*=Fdo/Fn= 1.32		Fn at 1000000		cycles																					
STAIRCASE: mean strength result				LOCATI TEST																							
Fdo: 1.32 Fn Step= 0.1 (=q*Fdo)				Remark: If you have to perform more than 4 level, you have to include in the table only the last 4 step!																							
Broken Part: x				N(Mc) F* N(Mc) F* N(Mc) F* N(Mc) F*																							
Non damaged part: o				Freq/N																							
Start Level	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	Piece	P. Nam																
1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1	T01	1.00	1.32	1.00	1.30	0.50	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	1.32			
1.3			o							2	T02	1.00	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	1.43		
1.4				x						3	T03	0.57	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	1.27		
1.3			o							4	T04	1.00	1.30	0.25	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	1.38	
1.4					x					5	T05	0.71	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	1.32		
1.3				x						6	T06	0.89	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	1.27	
1.2			o							7	T06	1.00	1.20	0.29	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	1.28
1.1										8																	
										9																	
										10																	
										11																	
										12																	
										13																	
										14																	
										15																	
										16																	
										17																	
										18																	
										19																	
Mean strength m1= 1.29				Mean strength m2= 1.33 Fn at 1,000,000 cycles																							
For information: m1 must be closed to m2 to Confirm validity of test result m2				q= 0.06 (proto relative dispersion)																							

شکل ۳-۳۱: نتایج آزمون خستگی پر چرخه دسته موتور در جهت محور Z نمونه ثانویه (اصلاح شده) [۳۰]

همچنین آزمون ثانویه خستگی پرچرخه دسته موتور ، شکست قطعات را در نیروهای مختلف نشان می دهد. باتوجه به شکل ۳-۳۲، $m^* = 1.33$ با پراکندگی نسبی ۰/۰۶ می باشد که براساس شکل ۳-۳۳ قابل قبول ارزیابی می شود.



شکل ۳-۳۲: نتیجه آزمون قطعه دسته موتور بالا راست خودرو پژو در نمودار خستگی مرجع [۳۰]

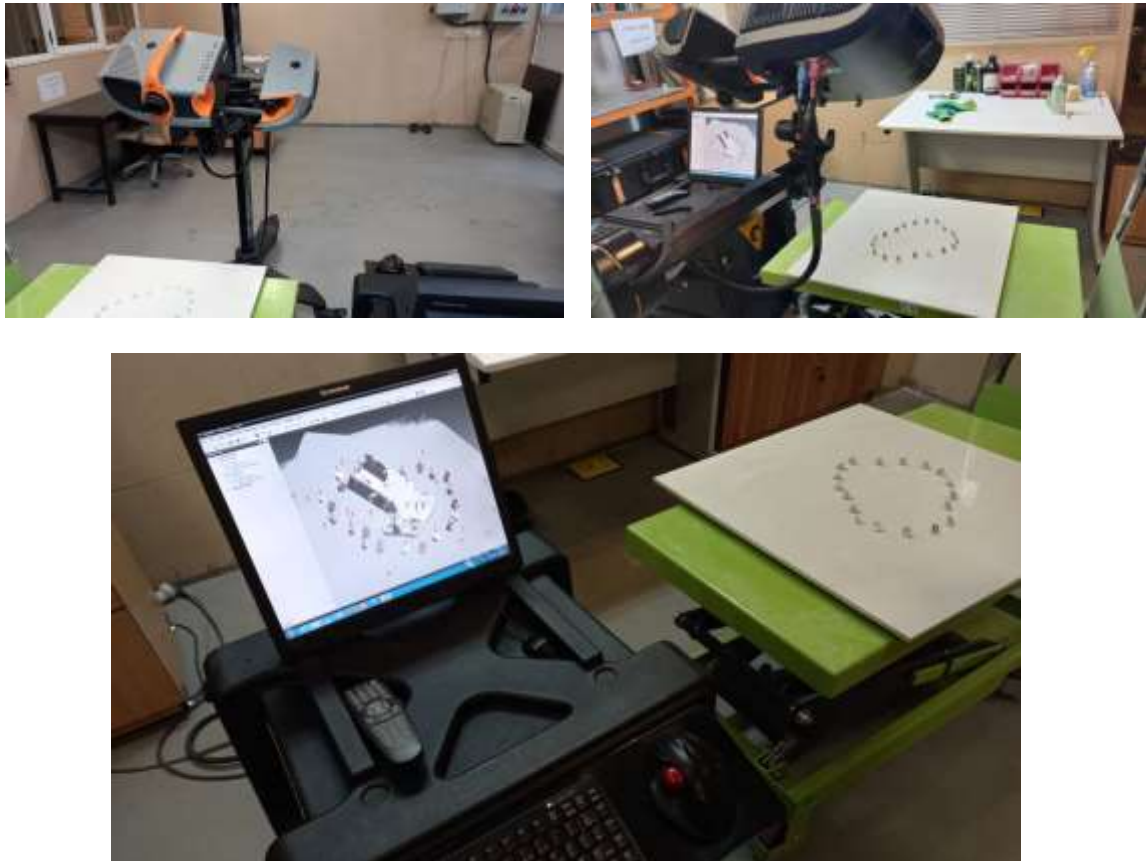
فصل ۴: شیشه سازی و اثر پارامترهای ساخت

۱-۴ مقدمه:

در این فصل در ابتدا برای صحه گذاری نتایج شبیه سازی با آزمایش استاتیکی، از روی نمونه آزمایش شده مدل سه بعدی تهیه میگردد و پس از نزدیکی نتایج با داده های آزمایش استاتیکی و استخراج نمودارهای حاصل از آن به شبیه سازی خستگی پرچرخه دسته موتور آلومینیومی با نتایج آزمایشگاه می پردازیم.

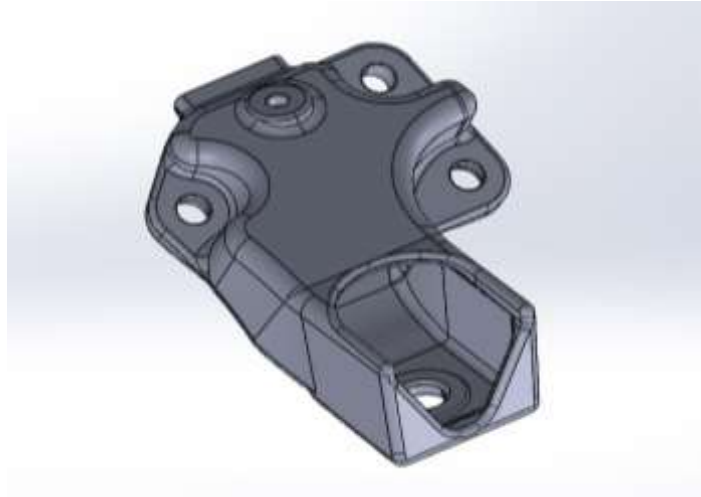
۲-۴ تاثیر پارامترهای ساخت بر عمر خستگی دسته موتور

در حل عددی با هدف شبیه سازی نتایج آزمایشگاه به بررسی پارامترهای ساخت می پردازیم در همین راستا به منظور طراحی مدل سه بعدی از نمونه های آزمایش شده، ابتدا توسط دستگاه اپتیک ساخت شرک اسپانیایی Nub 3D با لنز دوربین ۱.۵ مگاپیکسل از نمونه ها اسکن سه بعدی (اپتیک) گرفته تا سطح خارجی آن که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است بدست آید.



شکل ۱-۴: اسکن سه بعدی از نمونه های آزمایش (اپتیک)

پس از اسکن سه بعدی داده های بدست آمده را برای مدل سازی سه بعدی از سطح خارجی نمونه ها، وارد نرم افزار سالیدورک میکنیم که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: مدل بدست آمده از سطح خارجی دسته موتور در نرم افزار سالیدورک پس از اسکن سه بعدی

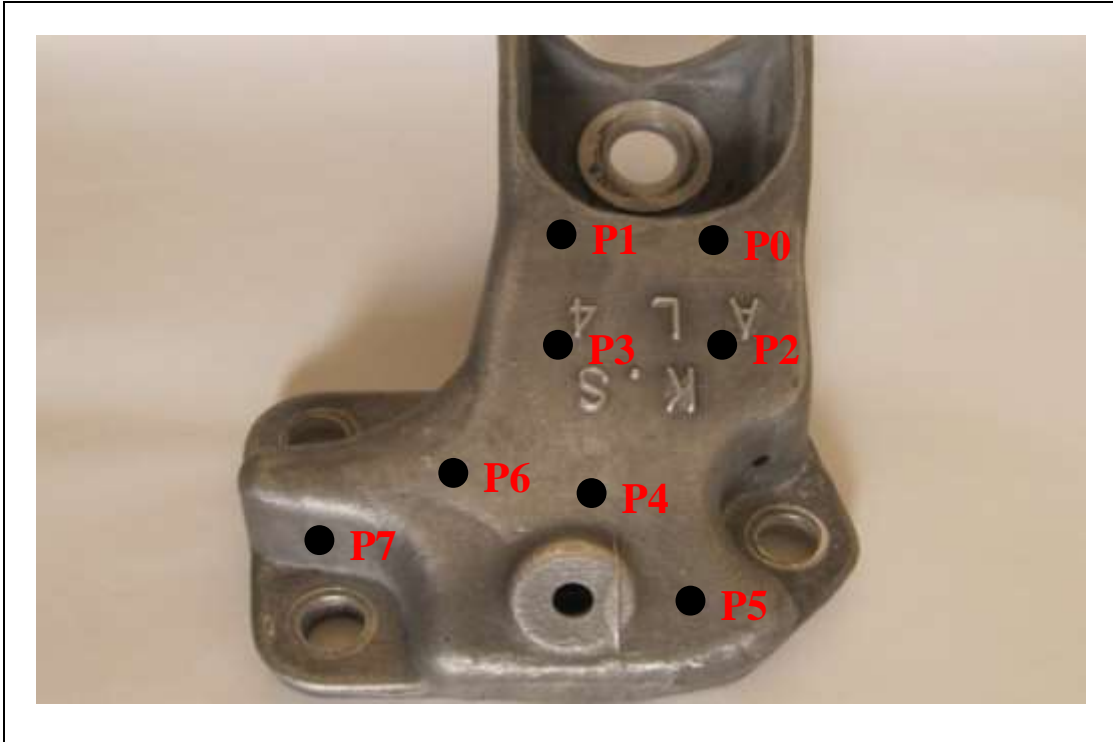
۴-۲-۱ ضخامت سنجی به وسیله آزمون غیر مخرب

آزمون غیر مخرب به مجموعه ای از روش های ارزیابی و تعیین خواص دستگاه ها و قطعات ساخته شده گفته می شود که هیچ گونه آسیب یا تغییری در سامانه ایجاد نکند. که می توان به آزمون رادیو گرافی، آزمون فراصوت، آزمون مایع نافذ اشاره کرد.

برهمن اساس به منظور درستی از ضخامت قسمت های مختلف قطعه با مدل سه بعدی طراحی شده، نواحی مختلف مشابه در هر یک از نمونه های آزمایش شده را با دستگاه التراسونیک (آزمون غیر مخرب فراصوت) ساخت شرکت آمریکایی Olympus مدل 38DL-Plus که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. و در شکل های ۴-۴ تا ۴-۷ نواحی مورد بررسی مشابه در هر دو نمونه مشخص شده است.



شکل ۴-۳: دستگاه التراسونیک شرکت Olympus مدل 38 DL- Plus



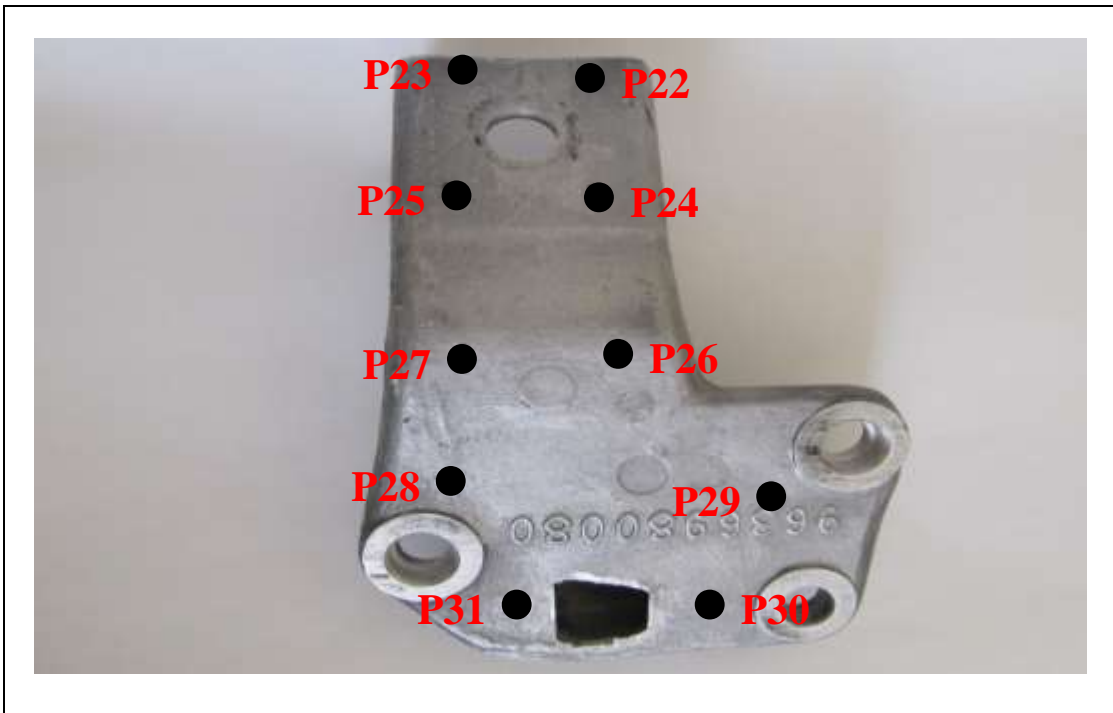
شکل ۴-۴: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت)



شکل ۴-۵: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت)

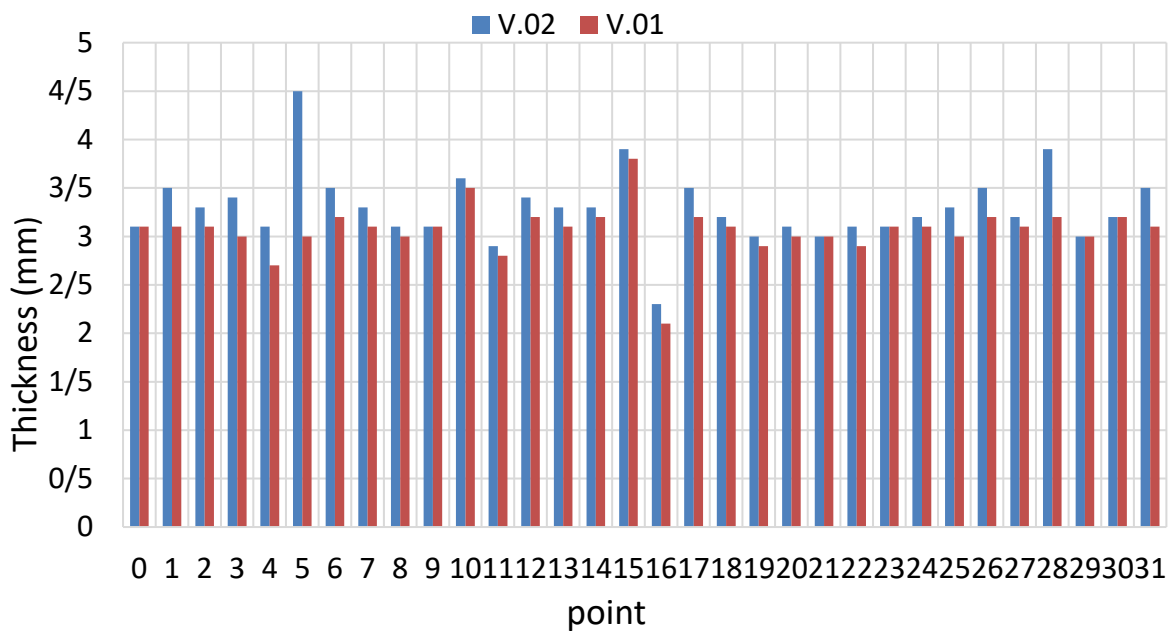


شکل ۴-۶: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت)



شکل ۴-۷: ضخامت سنجی از نمونه های آزمایش (آزمون غیر مخرب فراصوت)

باتوجه به نتایج بدست آمده از آزمون غیر مخرب فراصوت توسط دستگاه التراسونیک، ضخامت های نواحی مشابه در هر دو نمونه در شکل ۴-۸ حاصل شد.



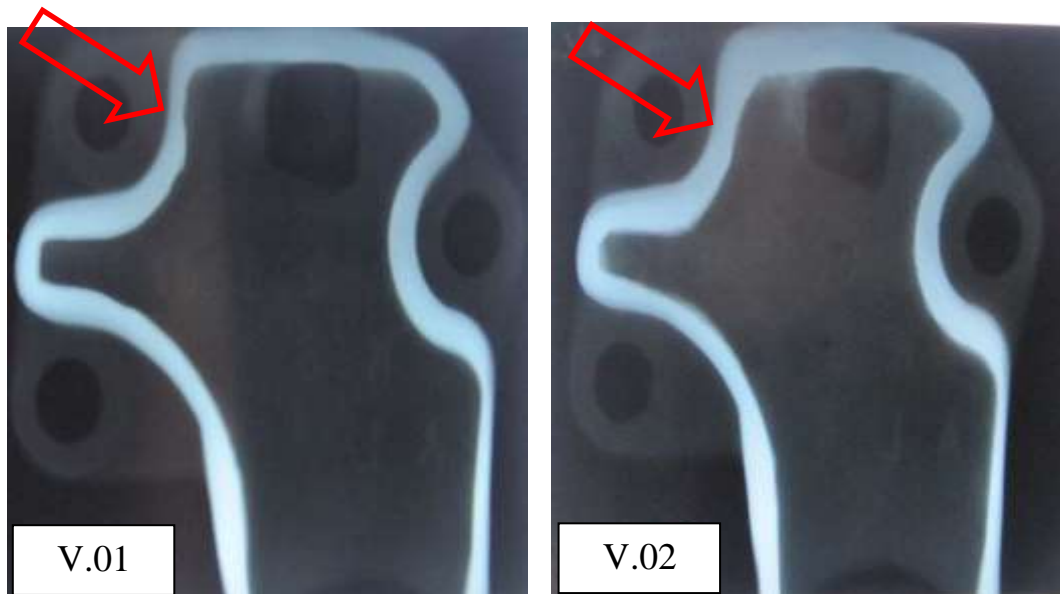
شکل ۴-۸: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه در هر دو نمونه آزمایش

۴-۲-۲ آزمون رادیوگرافی

به منظور درک بهتر از نواحی اصلاح شده به وسیله دستگاه ایکس ری مدل DK-2300 ساخت دانمارک که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است از نمونه های آزمایش شده تصاویر رادیوگرافی تهیه شد که در شکل ۴-۱۰ این نواحی نشان داده شده است.

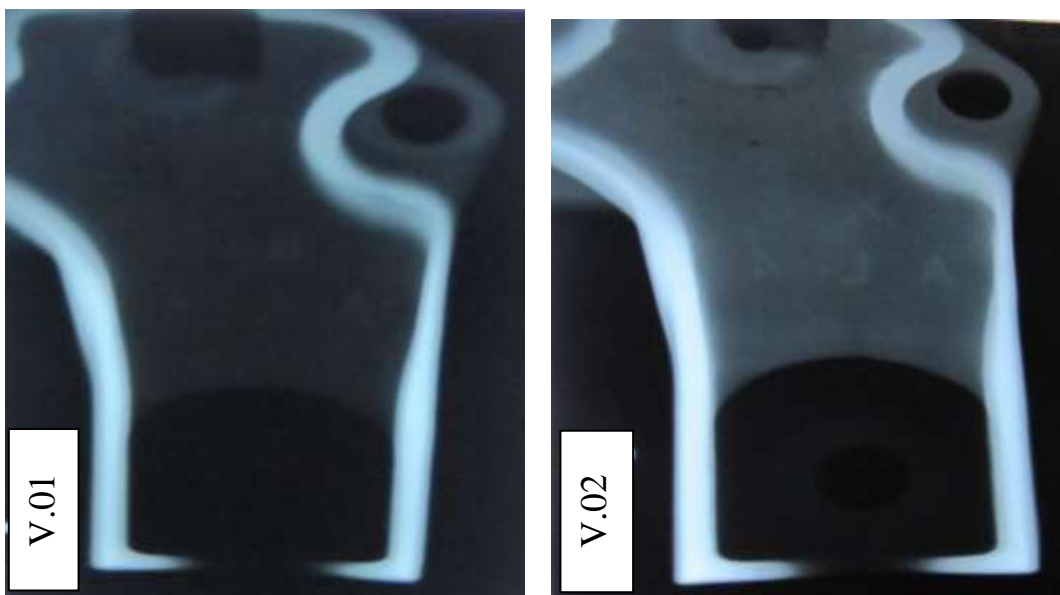


شکل ۴-۹: دستگاه رادیوگرافی مدل DK-2300



شکل ۴-۱۰: مقایسه نمونه اول و نمونه اصلاح شده با آزمون رادیوگرافی

پس از تصویر برداری از نمونه های آزمایشگاهی مشخص شد که نمونه ها تنها در نواحی اصلاح شده باهم متفاوت اند و در دیگر نقاط تفاوت چندانی ندارند. که در شکل ها ۴-۱۱ به خوبی قابل مشاهده است .



شکل ۴-۱۱: مقایسه نمونه اول و نمونه اصلاح شده با آزمون رادیوگرافی

سپس با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون رادیوگرافی، مدل سه بعدی طراحی شده را مطابق با این نتایج اصلاح میکنیم که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

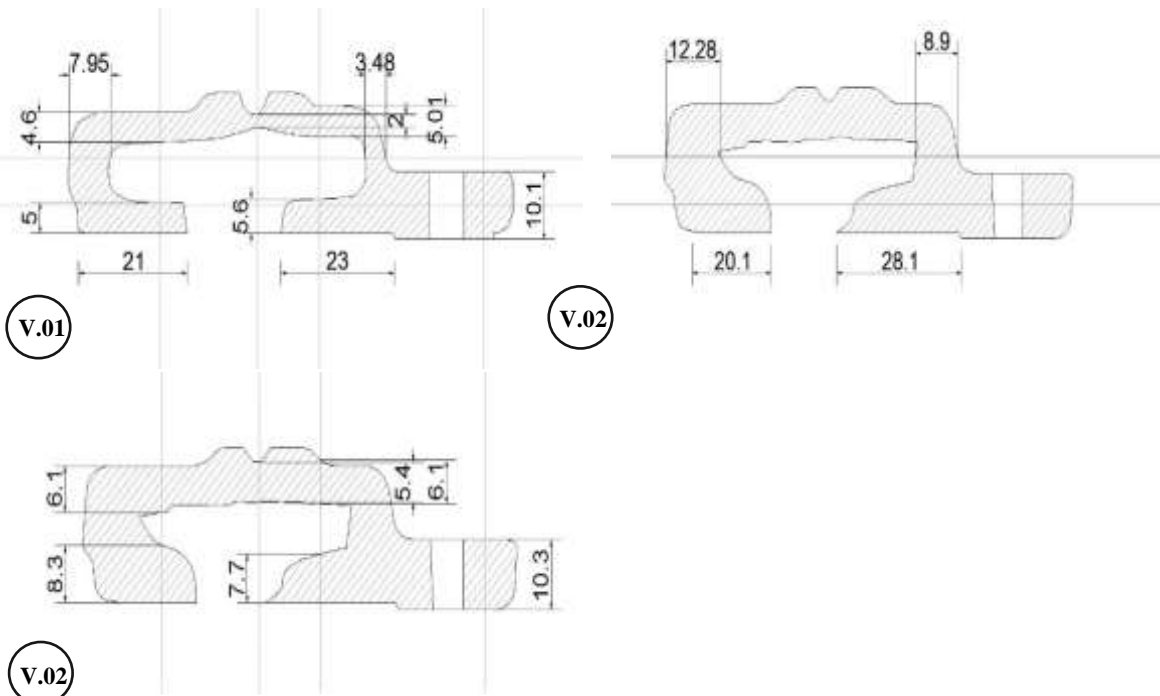
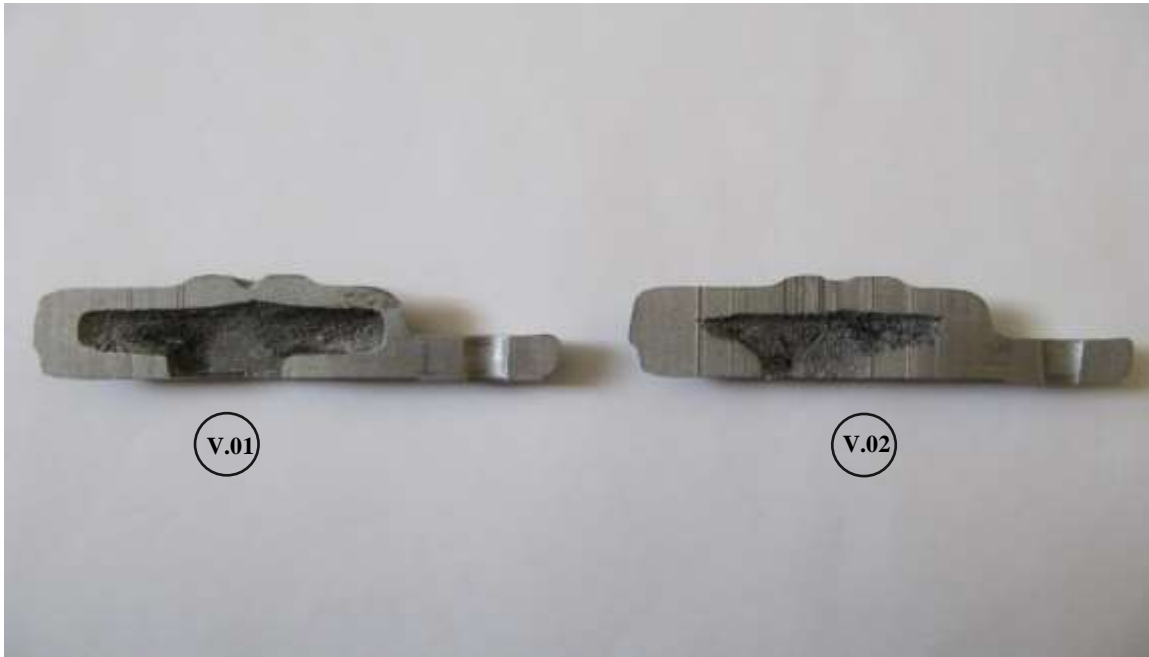


شکل ۴-۱۲: طراحی سه بعدی نمونه اول و نمونه اصلاح شده پس از نتایج آزمون رادیوگرافی

۴-۲-۳ مقایسه مدل های V.01 و V.02 با برش های یکسان

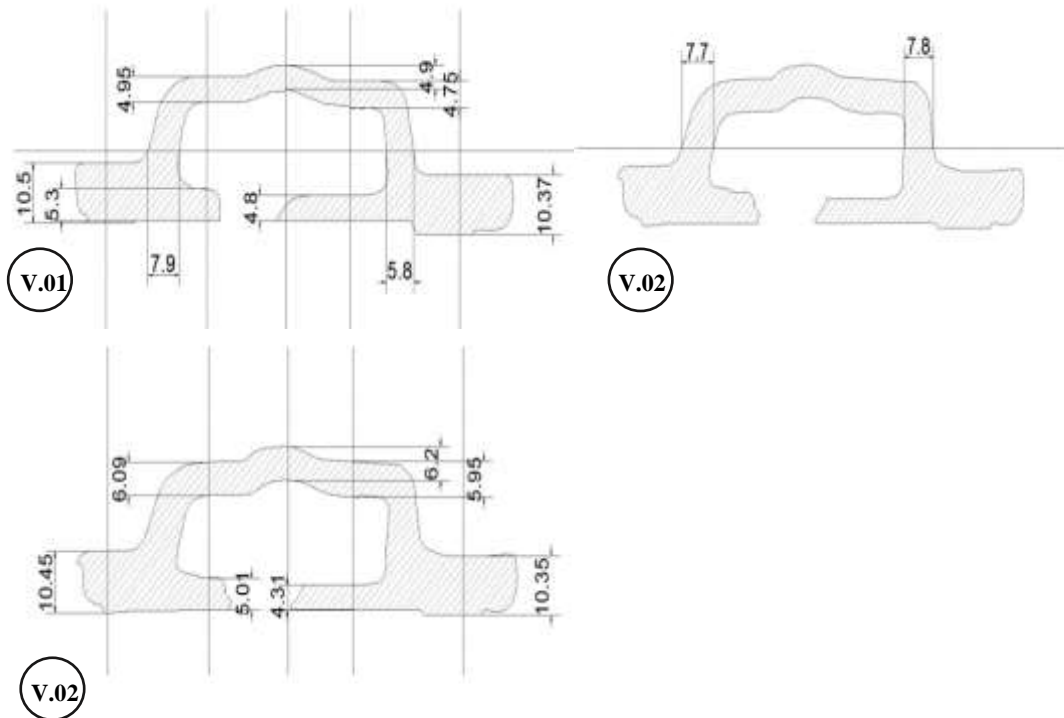
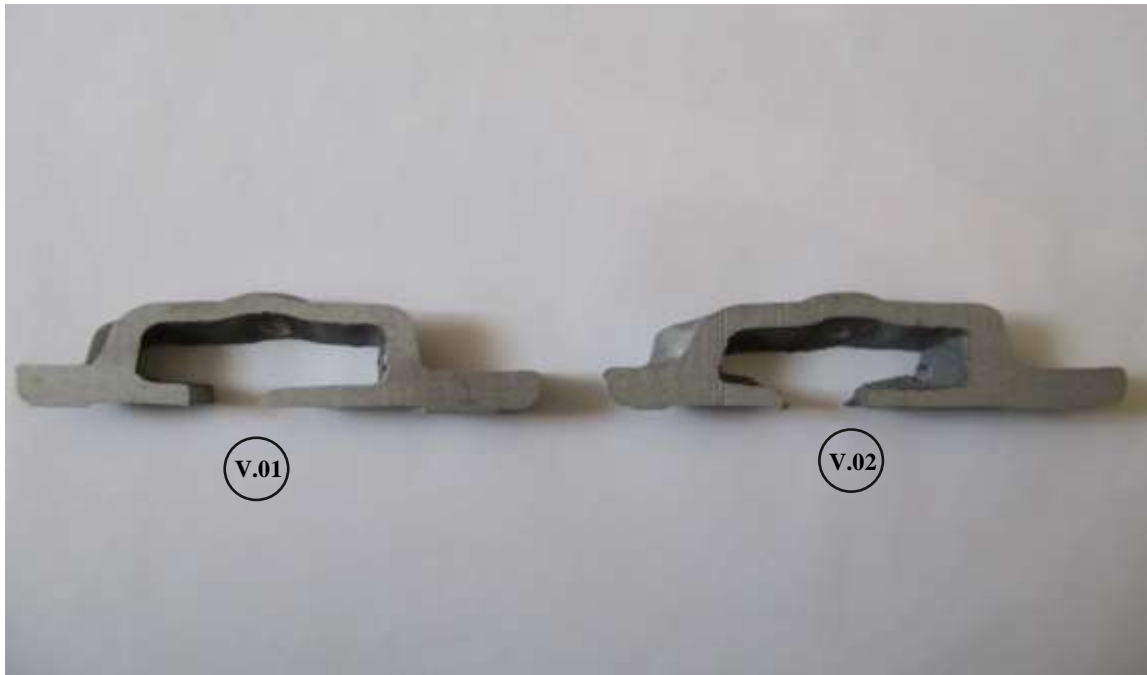
پس از ضخامت سنجی با دستگاه التراسونیک، نواحی بحرانی هر دو نمونه آزمایشگاهی را با استفاده از وایرکات مطابق شکل های ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ از چهار ناحیه مشابه برش داده شده است تا طراحی مدل سه بعدی با نمونه های آزمایشگاهی از مطابقت خوبی برخوردار باشد.

SECTION 1



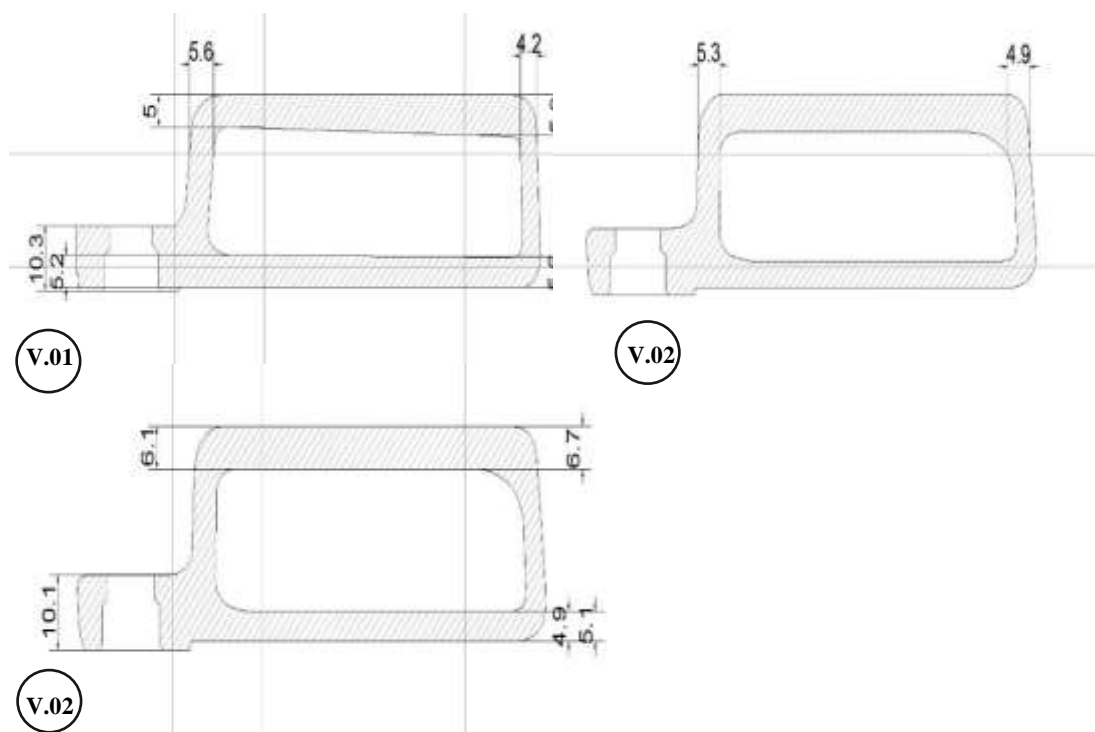
شکل ۴-۱۳: ناحیه برش خورده دوم در هر دو نمونه

SECTION 2



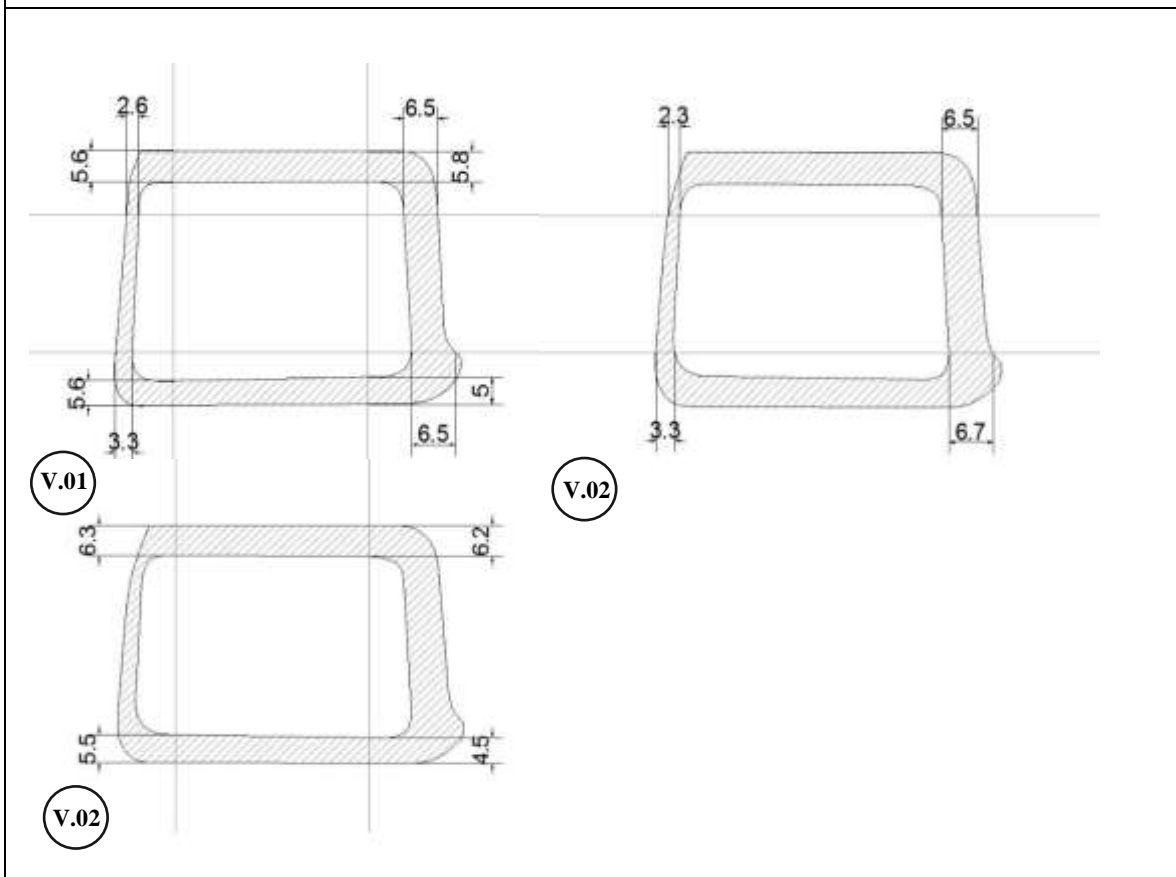
شکل ۴-۱۴: ناحیه برش خورده دوم در هر دو نمونه

SECTION 3



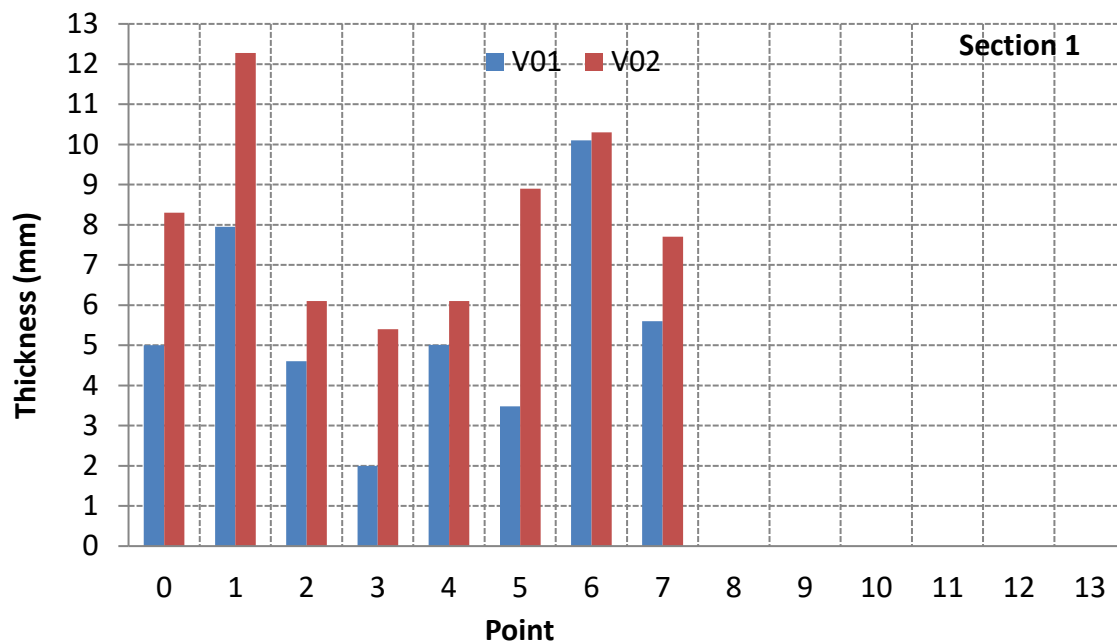
شکل ۴-۱۵: ناحیه برش خورده سوم در هر دو نمونه

SECTION 4

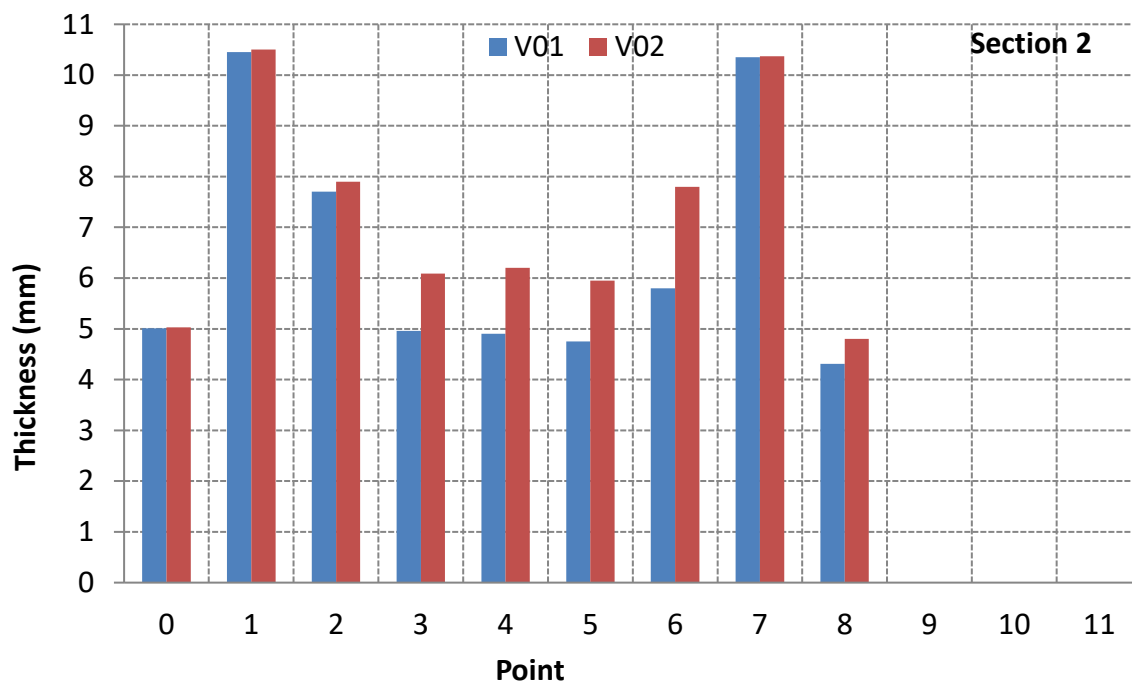


شکل ۴-۱۶: ناحیه برش خورده چهارم در هر دو نمونه

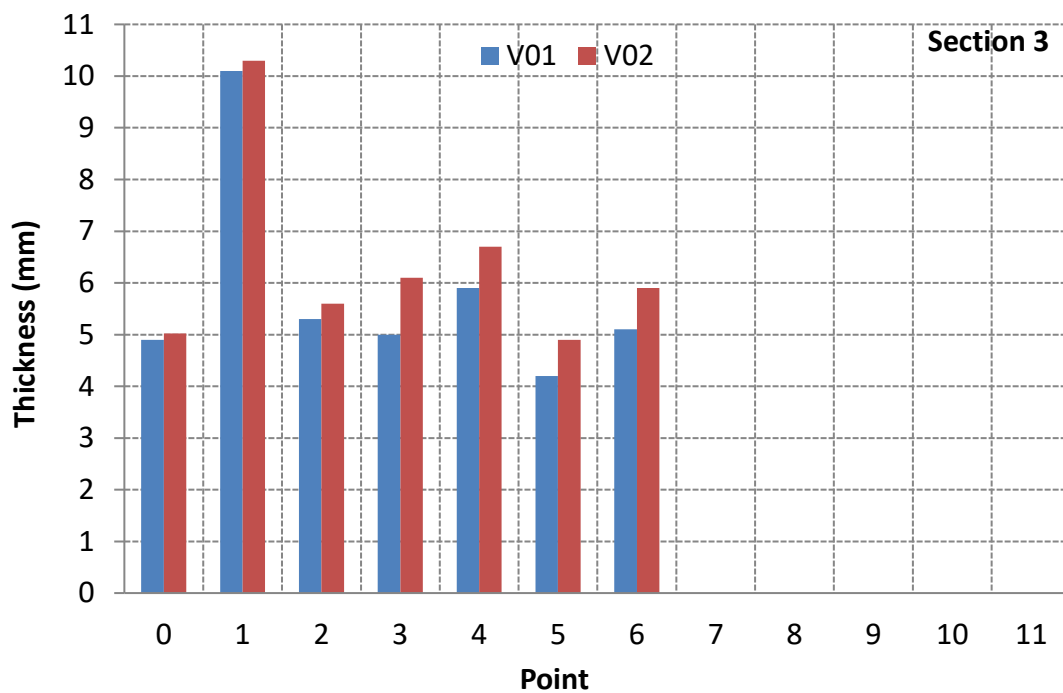
همچنین با بررسی صورت گرفته از قسمت های برش خورده در نواحی مشابه هر دو نمونه آزمایش، ضخامت های این نواحی اندازه گیری شد که در شکل ۴-۱۷ تا ۴-۲۰ ارائه شده است.



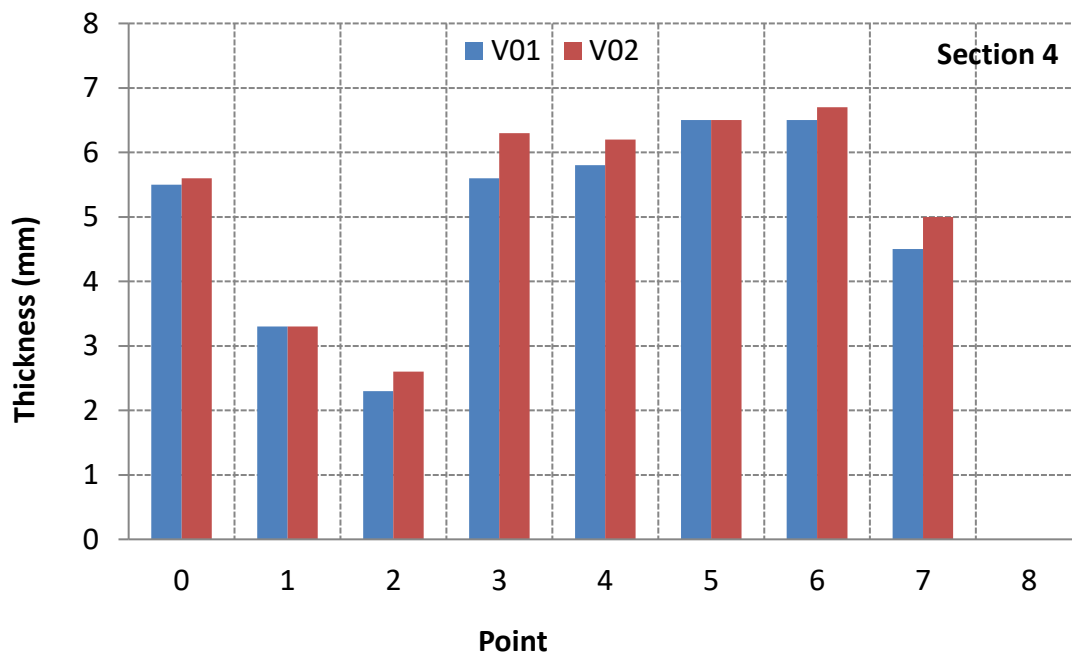
شکل ۴-۱۷: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده اول در هر دو نمونه



شکل ۴-۱۸: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده دوم در هر دو نمونه

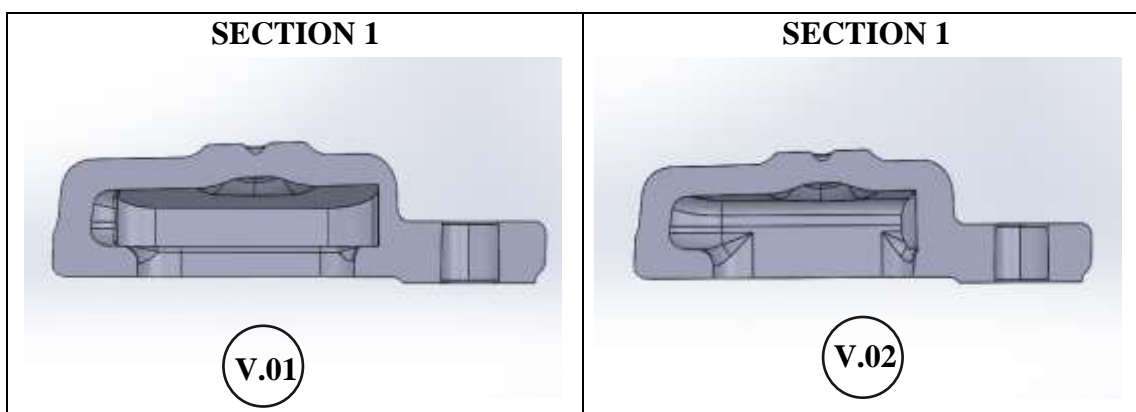


شکل ۴-۱۹: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده سوم در هر دو نمونه

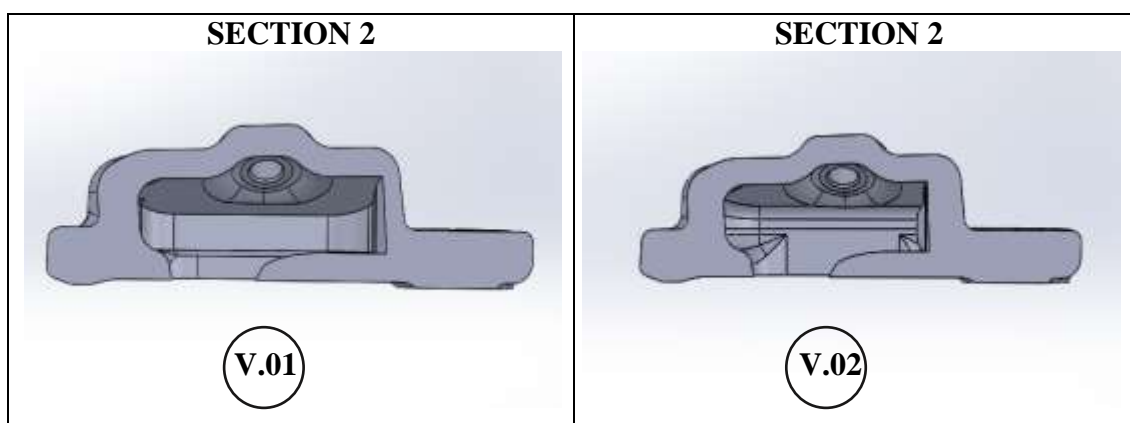


شکل ۴-۲۰: نمودار مقایسه ضخامت های نواحی مشابه برش خورده چهارم در هر دو نمونه

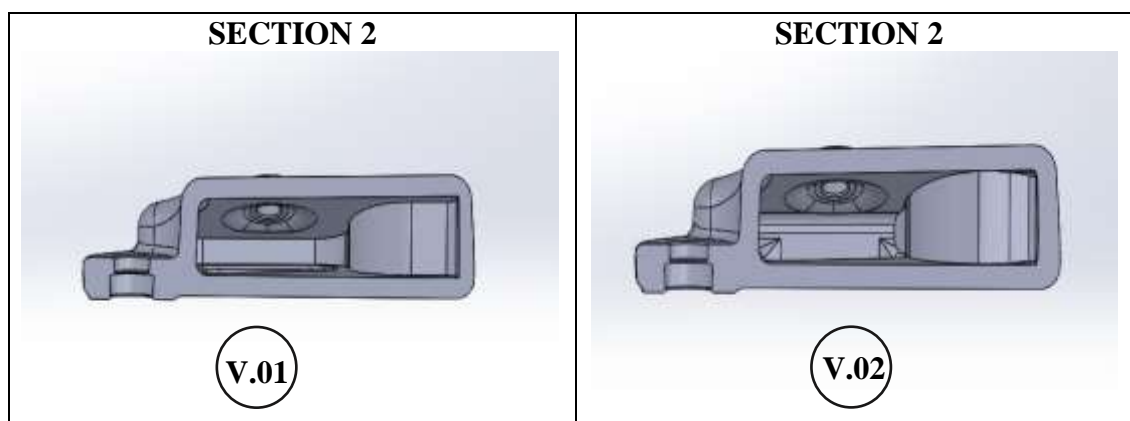
در نهایت از هر دو نمونه آزمایشگاهی، مدل سه بعدی طراحی شد که با نمونه های آزمایش شده از مطابقت نزدیکی برخوردار می باشد که در شکل های ۴-۲۱ تا ۴-۲۴ ارائه نشان داده شده است.



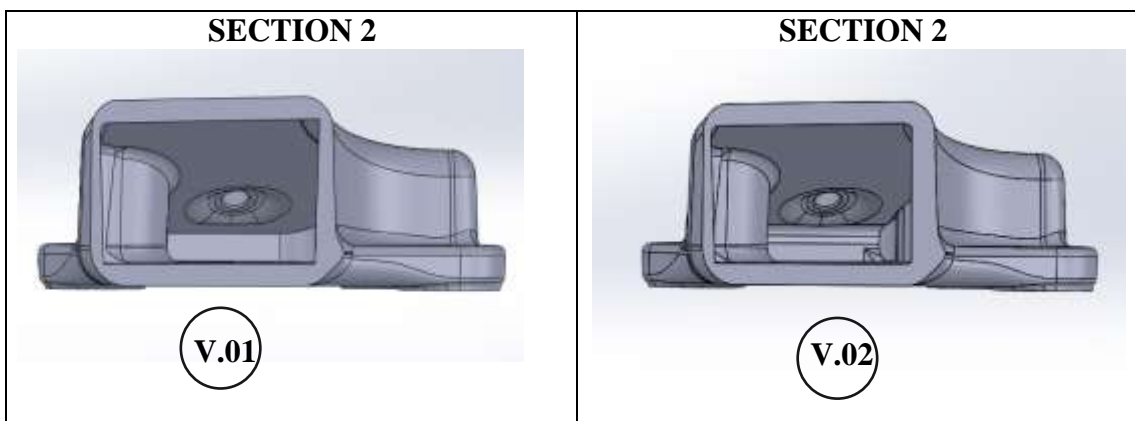
شکل ۴-۲۱: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه اول



شکل ۴-۲۲: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه دوم



شکل ۴-۲۳: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه سوم



شکل ۴-۲۴: طراحی سه بعدی نهایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و مقایسه آن در ناحیه چهارم

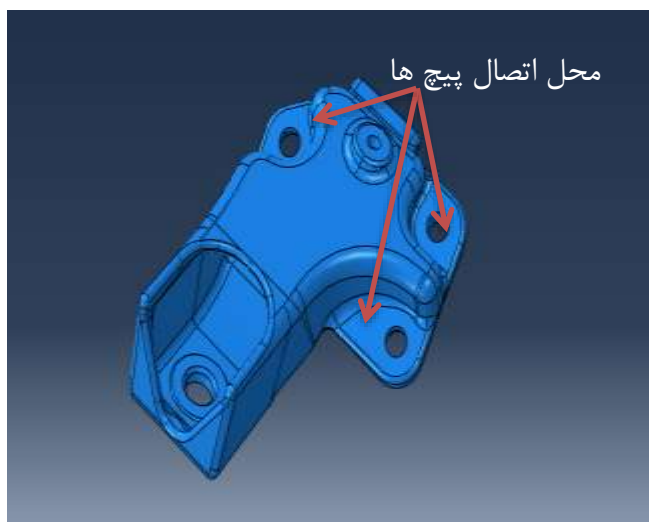
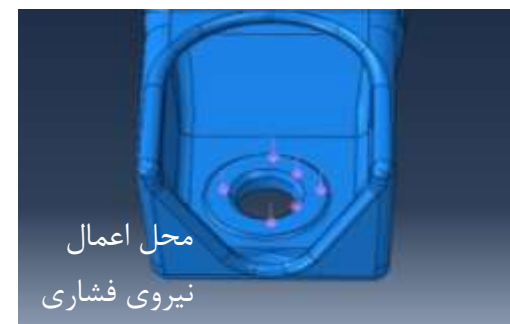
۴-۳ مدل سازی و تحلیل عددی دسته موتور

به منظور شناسایی نواحی بحرانی ابتدا به شبیه سازی استاتیکی با استفاده از نرم افزار ABAQUSE می پردازیم. در این شبیه سازی دسته موتور آلومینیومی از جنس A-S7G03Y33 Type 2، پیچ های اتصال و تکیه گاه دسته موتور از جنس 13CrMo9-10 به صورت همسانگرد فرض شده است و تمامی درجات آزادی تکیه گاه دسته موتور گرفته شده و هم چنین به منظور اعمال نیروی هم بندی به پیچ ها، انتهای پیچ ثابت در نظر گرفته شده است. در این تحلیل اثر متقابل سطوح زیر گل پیچ ها با دسته موتور و سطوح نشیمن دسته موتور با تکیه گاه به صورت تماس سطح به سطح تعیین شده است مدل اصطکاک بکار رفته شده در این شبیه سازی از نوع پنالتی بوده و ضریب اصطکاک ۰.۱ تعریف شده است. خواص مکانیکی دسته موتور، پیچ ها، تکیه گاه دسته موتور در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: خصوصیات مکانیکی قطعات در حل استاتیکی

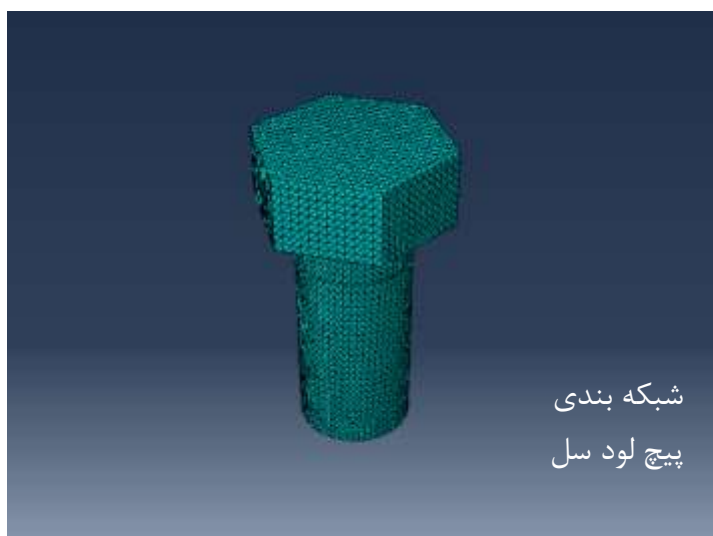
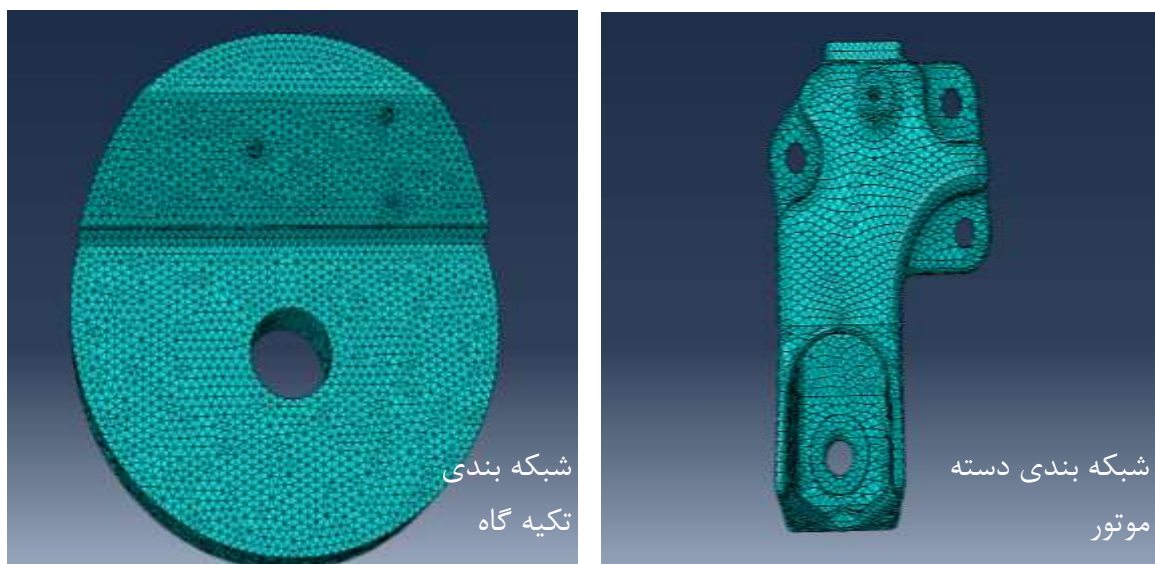
استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	
۴۶۰	۲۵۰	۰/۳	۲۰۰	۷۸۵۰	پیچ لود سل M14 (فولادی)
۴۶۰	۲۵۰	۰/۳	۲۰۰	۷۸۵۰	تکیه گاه دسته موتور (فولادی)
۲۷۰	۱۹۰	۰/۳	۷۱	۲۷۷۰	دسته موتور (آلومینیومی)

در هندسه مساله به جای مدل کردن رزوه های پیچ از سطح مقطع تحت تنش پیچ استفاده شد. تمامی قطعات در موقعیت مناسبی نسبت به هم قرار گرفته تا هندسه کلی شکل یابد. مدل تمامی قطعات از نوع شکل پذیر است. محل بارگذاری، محل اتصال پیچ ها با دسته موتور، نیروی پیش بار پیچ لود سل و هندسه کلی در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۵: محل بارگذاری، محل اتصال پیچ ها با دسته موتور، نیروی پیش بار پیچ لود سل و هندسه کلی در شبیه سازی دسته موتور

در این شبیه سازی، مسئله در دوگام حل می‌شود. با توجه به نوع فرایند و تغییر شکل کم ماده از حل گر استاندارد استفاده شد. زمان حل مسأله ۱ تعریف شده است. برای شبکه بندی از المان C3D4 که المانی پیوسته، سه بعدی، چهار گره استفاده شد که در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است.

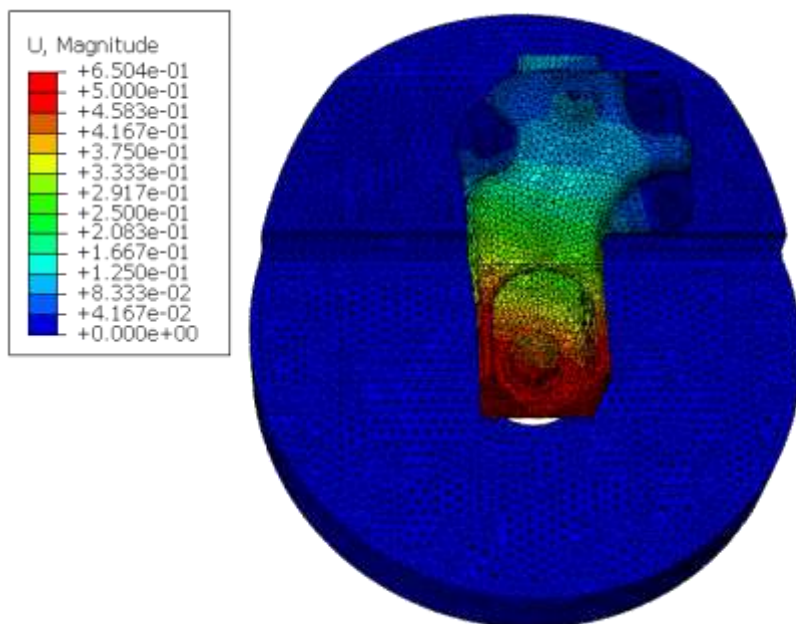
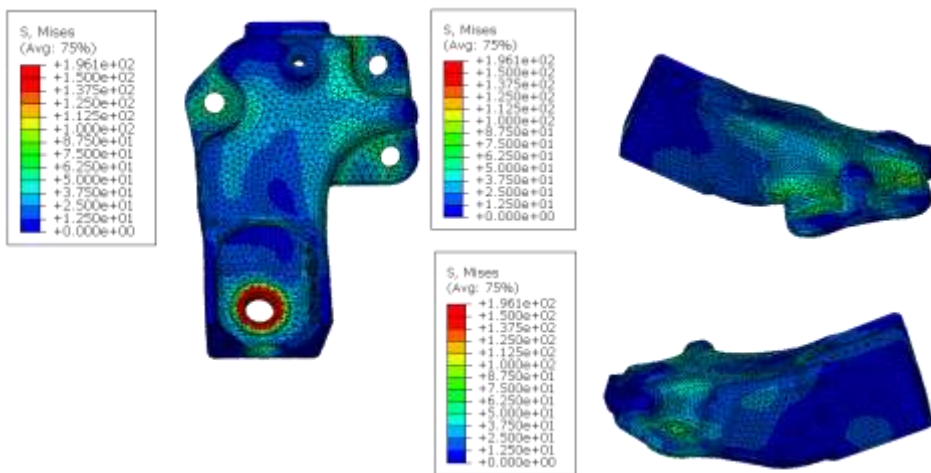


شکل ۴-۲۶: شبکه بندی پیچ لود سل، تکیه گاه دسته موتور، دسته موتور

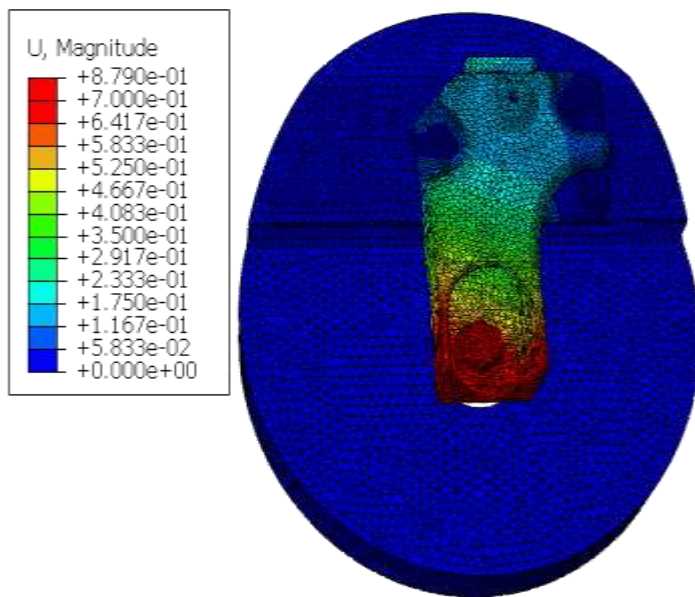
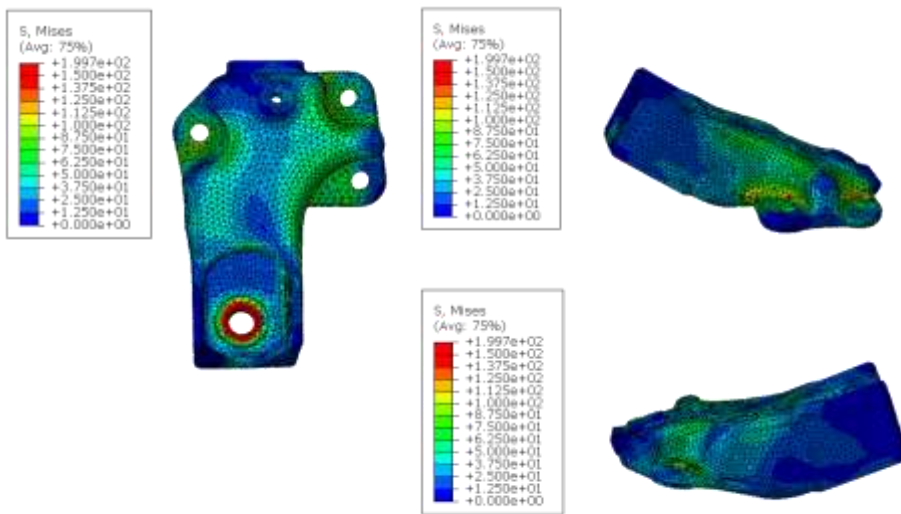
به دلیل ماهیت استاتیکی حل و تغییرات کم جابجایی نسبت به نیروی کل اگر تعداد المان ها بیشتر شود تاثیر چندانی در نتایج ندارد از این رو زمان حل افزایش می یابد. در این شبیه سازی نیروی پیش بار در پیچ لود سل ۳۴۰۰۰ نیوتن و نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن و نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن به دسته موتور در نظر گرفته شد.

۴-۳-۱ صحه گذاری روش المان محدود با استفاده از حل استاتیک

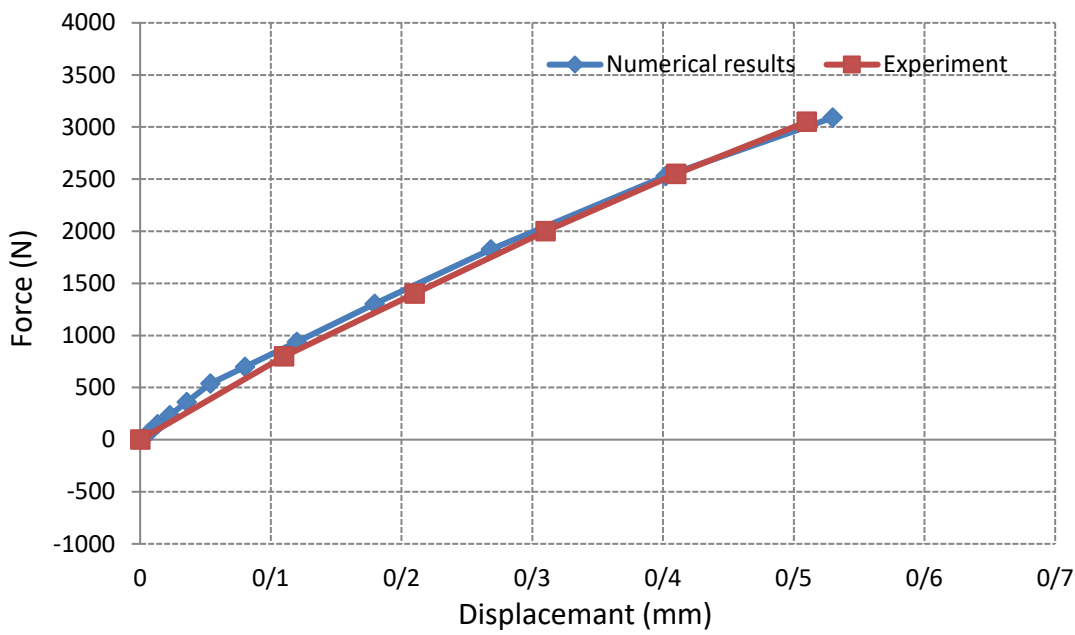
در نهایت براساس نتایج بدست آمده از حل استاتیکی که در شکل های ۴-۲۷ تا ۴-۳۰ نشان داده شده است مشخص شد که حل عددی از مطابقت نزدیکی با نتایج تجربی برخوردار می باشد. در جدول ۴-۲ به مقایسه نتایج اشاره شده است.



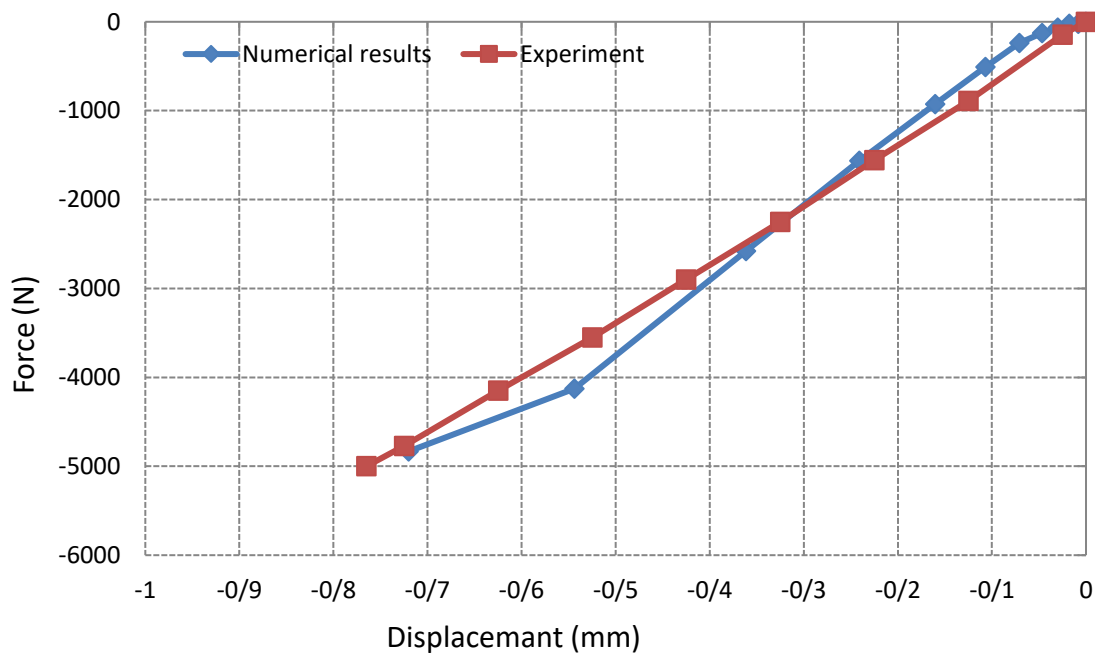
شکل ۴-۲۷: کانتورهای تنش و جابجایی در حل عددی استاتیکی با نیروی کششی، ۳۰۰۰ نیوتن و نیروی پیش بار پیچ لود سل معادل، ۳۴۰۰۰ نیوتن



شکل ۴-۲۸: کانتورهای تنش و جابجایی در حل عددی استاتیکی با نیروی فشاری، ۵۰۰۰ نیوتن و نیروی پیش بار پیچ لود سل معادل، ۳۴۰۰۰ نیوتن



شکل ۴-۲۹: نمودار مقایسه نتایج نیرو بر حسب جابجایی نمونه (V.01T14) در آزمون تجربی و حل عددی در نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن



شکل ۴-۳۰: نمودار مقایسه نتایج نیرو بر حسب جابجایی نمونه (V.01T14) در آزمون تجربی و حل عددی در نیروی فشاری ۵۰۰۰ نیوتن

جدول ۴-۲: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمون تجربی نمونه V.01T14

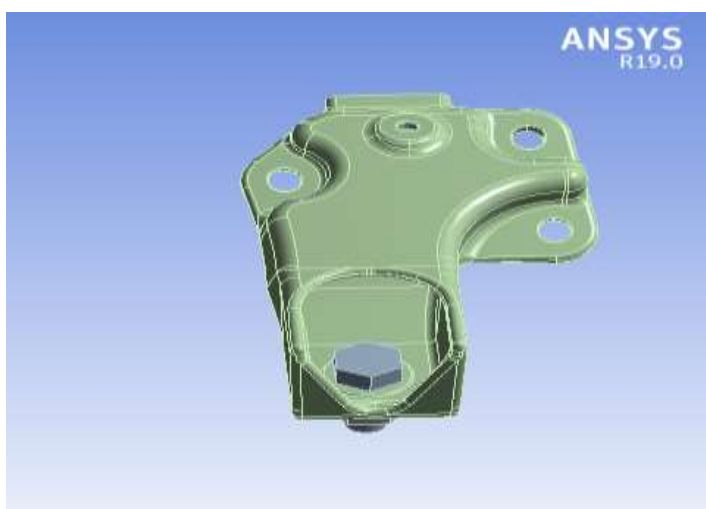
نیروی فشارشی ۵۰۰۰ نیوتن		نیروی کششی ۳۰۰۰ نیوتن		V.01T14
تفاوت	تغییر مکان	تفاوت	تغییر مکان	
-	-۰/۷۴	-	۰/۵	تجربی
- ٪۲	-۰/۷۲	٪۴	۰/۵۲	عددی

۴-۴ بررسی رفتار خستگی در دسته موتور

پس از مشخص شدن نواحی بحرانی توسط حل عددی و مطابقت نزدیک نتایج با داده های آزمایشگاه به منظور شبیه سازی عمر خستگی پرچرخه دسته موتور از نرم افزار ANSYS برای رسیدن به این هدف استفاده شد. در حل عددی خستگی پر چرخه به منظور کاهش زمان حل تنها دسته موتور آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین به منظور مطابقت نزدیک نتایج با آزمون تجربی، از نقطه اثر پیچ لود سل در این شبیه سازی تعریف شد. که در شکل ۴-۳۱ نمای کلی از قطعات نشان داده شده است. خصوصیات مکانیکی قطعات در جدول ۴-۳ نشان داده شده است.

جدول ۴-۳: خصوصیات مکانیکی قطعات در حل عددی خستگی

چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	
۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۳	۲۵۰	۴۶۰	پیچ لود سل M14 (فولادی)
۲۷۷۰	۷۱	۰/۳	۱۹۰	۲۷۰	دسته موتور (آلومینیومی)



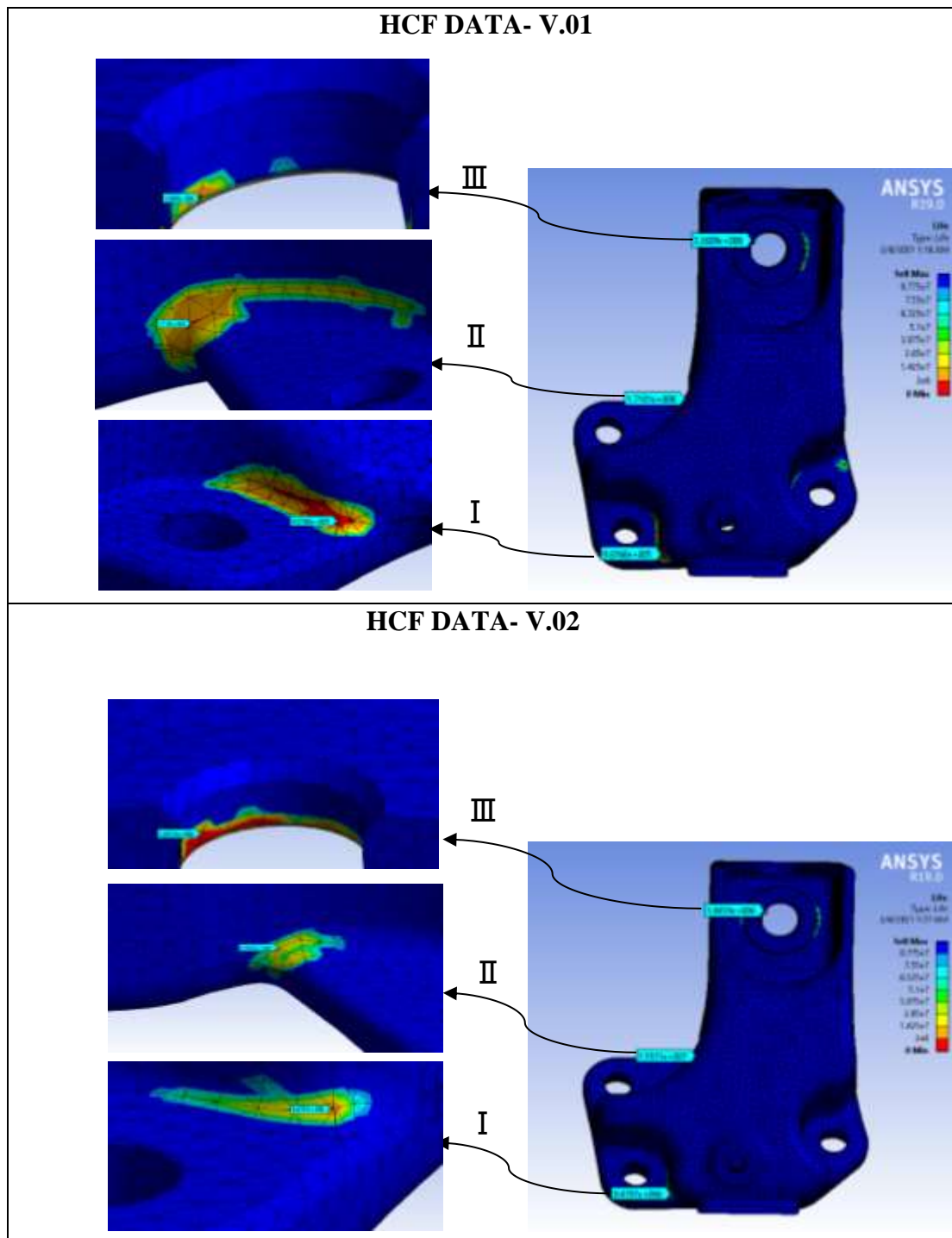
شکل ۴-۳۱: حالت کلی اتصال قطعات به یکدیگر در حل عددی خستگی دسته موتور

در حل عددی خستگی تمامی درجات آزادی نشیمن دسته موتور گرفته شده است و همچنین اثر متقابل سطوح دسته موتور و پیچ لود سل همانند حل استاتیکی تعریف شده است. برای شبکه بندی دسته موتور از مدل Tetrahedrons و برای پیچ لود سل از مدل Multizone استفاده شد. نیروی بیش بار پیچ لود سل معادل ۳۴۰۰۰ نیوتن تعریف شده است و همچنین با توجه به میانگین مقاومت بدست آمده از آزمون تجربی، نیروی دینامیکی معادل ۳۲۵۰ نیوتن در نقطه اثر پیچ لود سل اعمال شد. که در شکل ۴-۳۲ نیروهای تعریف شده نشان داده شده است.



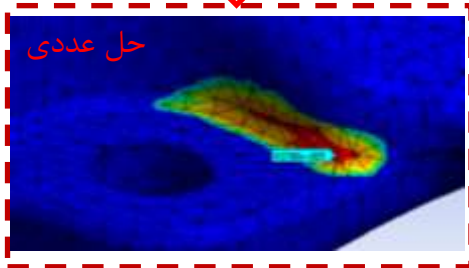
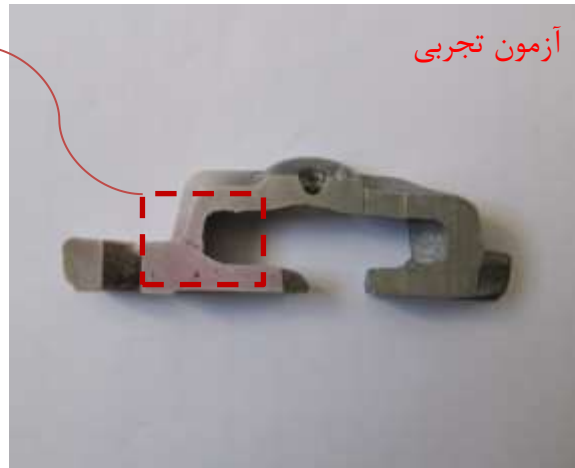
شکل ۴-۳۲: محل اعمال نیروی بیش بار پیچ لود سل و نیروی دینامیکی اعمال شده به دسته موتور

پس از بررسی نتایج بدست آمده از حل عددی که در شکل ۳۳-۴ نشان داده شده است مشخص گردید که نتایج بدست آمده از آزمون تجربی با حل عددی از مطابقت نزدیکی برخوردار است که در شکل ۳۴-۴ تا ۳۶-۴ نشان داده شده است.

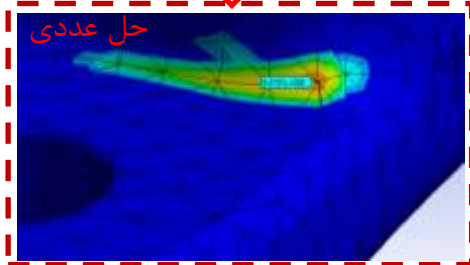


شکل ۳۳-۴: نتایج حل عددی خستگی پر چرخه دسته موتور

HCF DATA- V.01

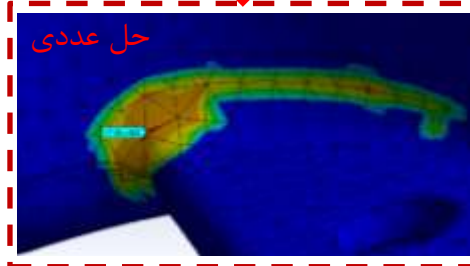


HCF DATA- V.02

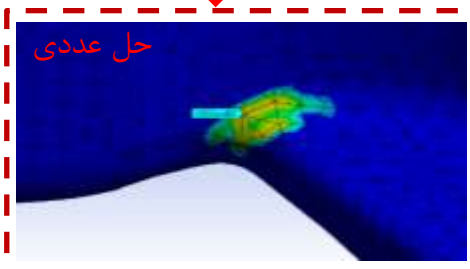


شکل ۴-۳۴: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پرچرخه دسته موتور در ناحیه اول (I)

HCF DATA- V.01

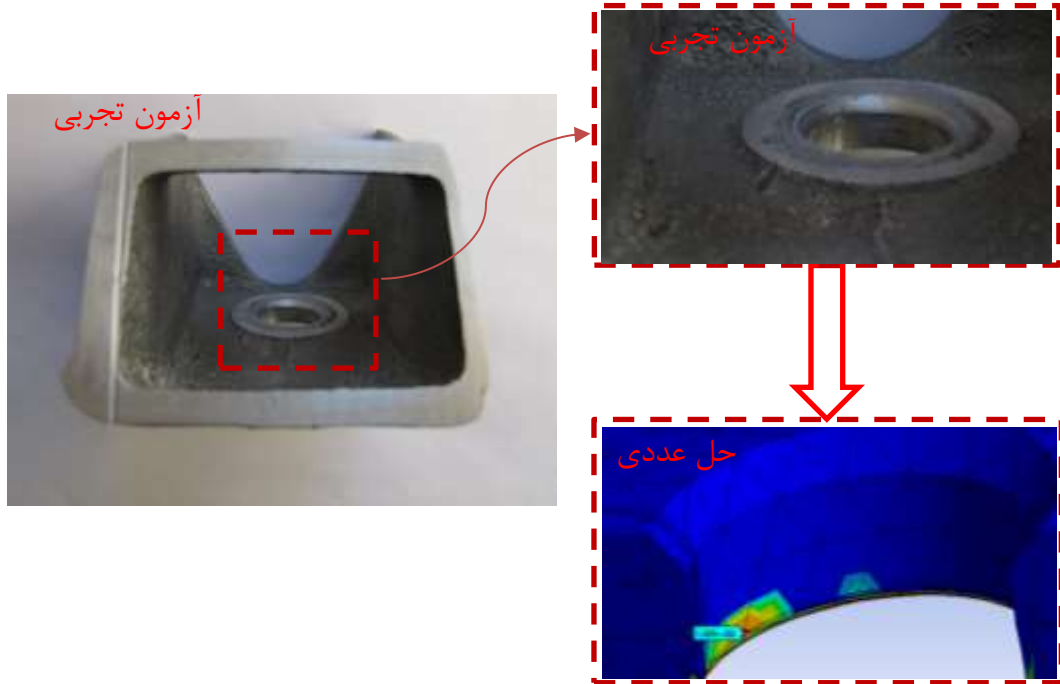


HCF DATA- V.02

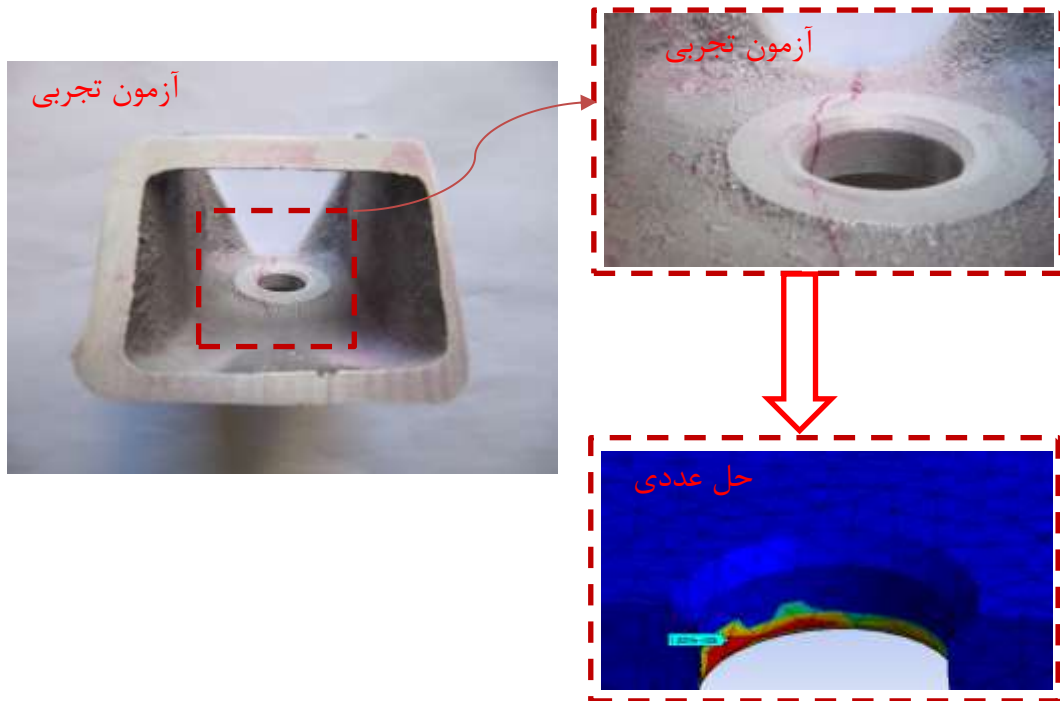


شکل ۴-۳۵: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پر چرخه دسته موتور در ناحیه دوم (II)

HCF DATA- V.01



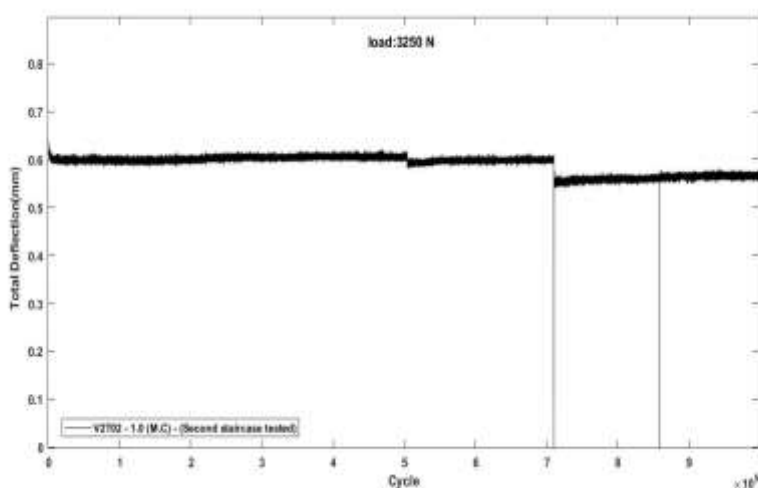
HCF DATA- V.02



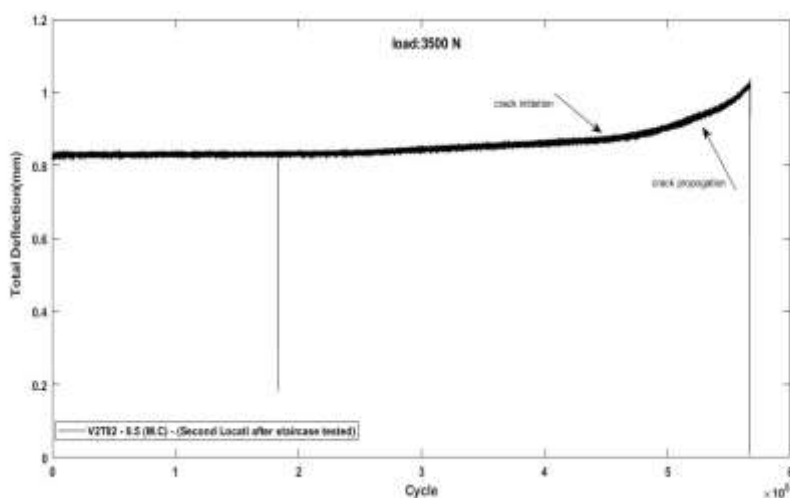
شکل ۴-۳۶: مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تجربی خستگی پر چرخه دسته موتور در ناحیه سوم (III)

۴-۵ مطالعه رشد ترک

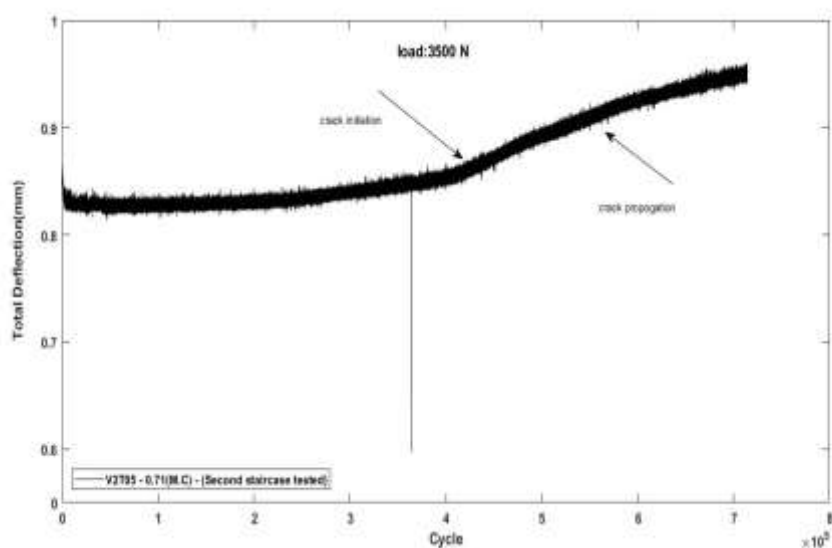
رشد ترک خستگی پدیده ای است که در آن ترک در هر سیکل بار گذاری به میزان بسیار کمی رشد می نماید. آزمایش های خستگی به دو نوع آزمایش های شکست خستگی و آزمایش های رشد ترک خستگی تقسیم می شوند. در آزمایش های رشد ترک خستگی، مقدار رشد ترک برحسب بار گذاری و نهایتاً عمر کاری قطعه ترک دار مورد بررسی قرار می گیرد. در آزمایش های رشد ترک خستگی، به طور مستقیم از کمیت های مکانیک شکست، مانند فاکتور شدت تنش استفاده شده و رشد آرام ترک تا محدوده بحرانی مورد نظر قرار می گیرد. با توجه به آزمایشات تجربی صورت گرفته میزان تغییرات جابجایی نمونه ها در هر چرخه بار گذاری مشخص گردید با بررسی صورت گرفته شده آستانه پیدایش ترک مشخص شد که در شکل ۴-۳۷ تا ۴-۳۹ آستانه پیدایش ترک تا شکست قطعه در نمونه های ثانویه T05 و T02 نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۷: نمودار رفتار نمونه ثانویه T02 قبل از رشد ترک خستگی با نیروی ۳۲۵۰ نیوتن



شکل ۴-۳۸: نمودار رفتار نمونه ثانویه T02 همراه با رشد ترک خستگی با نیروی ۳۵۰۰ نیوتن



شکل ۴-۳۹: نمودار رفتار نمونه ثانویه T05 همراه با رشد ترک خستگی با نیروی ۳۵۰۰ نیوتن

۴-۶ نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه تجربی و عددی خستگی دسته موتور پرداخته شد که نتایج بدست آمده از حل تجربی نشان داد که پارامترهای ساخت در نتایج آزمون تجربی نقش مهمی را ایفا میکند. همانگونه که در فصل های قبل بیان شد، با توجه به آن که در خستگی پرچرخه با مقادیر کم تنش و محدوده بارگذاری الاستیک سروکار داریم، ولی در مقیاس میکرو رفتار ماده همراه با آسیب است و تحلیل مسائل الاستیک-پلاستیک همراه با آسیب، یک فرآیند کاملاً غیر خطی است. نرم افزار انسیس یکی از نرم افزارهایی است که در این زمینه از توانایی بالایی برخوردار بوده است. لذا در حل عددی با استفاده از نرم افزار انسیس به شبیه سازی خستگی دسته موتور آلومینیومی پرداخته شد که نتایج بدست آمده از حل عددی با آزمون تجربی از مطابقت خوبی برخوردار است.

- [1] W. N. Findley, "Fatigue of metals under combinations of stresses," vol. 79, pp. 1337-1348, 1957.
- [2] W. Findley and W. Mitchell, "Two Machines for Combined Bending and Torsion Fatigue," Proceedings, SESA, vol. 11, no. 1, pp. 203-212, 1953.
- [3] S. P. Bhat and M. E. Fine, "Fatigue crack nucleation in iron and a high strength low alloy steel," Materials Science and Engineering: A, vol. 314, pp. 90-96, 2001.
- [4] V. Dattoma, S. Giancane, R. Nobile, and F. Panella, "Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model," International Journal of Fatigue, vol. 28, no. 2, pp. 89-95, 2006.
- [5] X. Hong, G. Xiao, W. Haoyu, L. Xing, and W. Sixing, "Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE," Advances in Mechanical Engineering, vol. 10, no. 3, 1-12, 2018.
- [6] Y. Murakami, M. S. Ferdous, and C. Makabe, "Low cycle fatigue damage and critical crack length affecting loss of fracture ductility," International Journal of Fatigue, vol. 82, no. 1, pp. 89-97, 2016.
- [7] T. Chen, C. Huang, L. Hu, and X. Song, "Experimental study on mixed-mode fatigue behavior of center cracked steel plates repaired with CFRP materials," Thin-Walled Structures, vol. 135, pp. 486-493, 2019.
- [8] S. O'Connor, D. Nowell, and K. Dragnevski, "Measurement of fatigue crack deformation on the macro-and micro-scale: Uniform and non-uniform loading," International Journal of Fatigue, vol. 89, pp. 66-76, 2016.
- [9] S. Ifergane et al., "The effect of manufacturing processes on the fatigue lifetime of aeronautical bolts," Engineering Failure Analysis, vol. 8, no. 3, pp. 227-235, 2001.
- [10] J. Lemaitre, A course on damage mechanics. laboratory of mechanic Cachant, France: Springe-Verlag, 1992.
- [11] R. Desmorat, A. Kane, M. Seyedi, and J. P. Sermage, "Two scale damage model and related numerical issues for thermo-mechanical high cycle fatigue," European Journal of Mechanics-A/Solids, vol. 26, pp. 909-935, 2007.
- [۱۲] م. مشایخی، "گسترش سه بعدی آسیب در مواد شکل پذیر". پایان نامه ارشد، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
- [13] J. Lemaitre and R. Desmorat, "Engineering damage mechanics, ductile, creep, fatigue and brittle failures," Cachan, France: Springer, 2004.
- [14] S. Suresh, "Fatigue of materials." New York: Cambridge university, 1991.
- [15] W. W. Gerberich, S. Harvey, D. Kramer, and J. Hoehn, "Low and high cycle fatigue—a continuum supported by AFM observations," Acta materialia, vol. 46, no. 14, pp. 5007-5021, 1998.
- [۱۶] ریچارد دابلویو هرتربرگ، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی. ترجمه علی اکبر اکرامی، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۲.
- [17] J. Lemaitre and J.-L. Chaboche, Mechanics of solid materials. Cambridge university press, 1994.

- [18] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, Shigley's mechanical engineering design. New York: McGraw-Hill (in English), 2011.
- [19] A. Carpinteri and M. Paggi, "Are the Paris' law parameters dependent on each other?," *Frattura ed Integrita Strutturale*, vol. 1, no. 2, pp. 10-16, 2007.
- [20] A. Fatemi and L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials," *International journal of fatigue*, vol. 20, no. 1, pp. 9-34, 1998.
- [21] G. Sines and G. Ohgi, "Fatigue criteria under combined stresses or strains," *Trans. ASME, J. Engineering Mater. Technol.*, vol. 103, pp. 82-90, April 1981.
- [22] D. J. Finney, *Probit analysis*, Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, 1971.
- [23] W. J. Dixon and A. M. Mood, "A method for obtaining and analyzing sensitivity data," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 43, pp. 109-126, 1948.
- [24] W. J. Dixon, "The Up-and-Down Method for Small Samples," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 60, pp. 967-978, 1965.
- [25] R. E. Little, *Manual on Statistical Planning and Analysis*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1975.
- [26] R. Little, Estimating the median fatigue limit for very small up-and-down quantal response tests and for S-N data with runouts. American Society for Testing and Materials, Philadelphia: Heller, R.A. (Ed.), *Probabilistic Aspects of Fatigue*, 1972.
- [27] R. Pollak, A. Palazotto, and T. Nicholas, "A simulation-based investigation of the staircase method for fatigue strength testing," *Mechanics of Materials*, vol. 38, no. 12, pp. 1170-1181, 2006.
- [28] J. Neter, M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and W. Wasserman, *Applied linear statistical models*. Irwin, Chicago, 1996.
- [29] K. A. Brownlee, J. L. Hodges, and M. Rosenblatt, "The Up-and-Down Method with Small Samples," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 48, pp. 262-277, 1953.
- [۳۰] س. وحید حسینی. م. باقر نظری، "صحه گذاری و تخمین عمر خستگی دسته موور خودرو پژو بر اساس استاندارد و شبیه سازی عددی " . طرح پژوهشی ارتباط با صنعت، ۹۷-۲۷۲ مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۱۹.
- [31] R. Marchand, A. Alarcon Cot, standard: PSA, 2005/01/28.

Abstract

The engine mounting bracket is connected to the engine on one side and to the vehicle body on the other side. Engine mounting bracket should be designed to absorb vibrations that generated from the body to the motor and vice versa. In addition, engine mounting bracket should withstand weight of the engine, the dynamic and vibrational loads caused by movement of the vehicle on the road. Therefore, engine mounting brackets are generally designed to have a sufficient fatigue life within a defined range of cyclic forces. Although in large range of load caused by accident, this part should be break to minimize the side effect.

This thesis investigated the high cycle fatigue life of an aluminum engine mounting bracket. Firstly, a finite element model was set up to evaluate this part especially in critical point under static loads. Results show that under the tensile force of 3000 N, FE model can predict experimental deflection of engine mounting bracket with 4% error. In addition, the variation of compressive experimental results in 5000 N with FE model is less than 2%. Secondly, the fatigue life of the part was estimated under cyclic loads using numerical methods. Result show that the original engine mounting bracket did not have enough strength under fatigue loads. So, root cause analysis was done on failed parts using combination of numerical methods and experimental inspection.

Numerical analysis of fatigue life prediction had good agreement with experimental results and predicted the critical points and part sensitivity correctly. Experimental inspection of original and improved parts showed that increase of fillet radius, local increase in the thickness of the part in the critical area had significant effect on fatigue life of engine mounting bracket. Also, removal method of casting burs in separation area of casting mold was modified that can increase of fatigue life in engine mounting bracket. Finally, the fatigue crack propagation was investigated using experimental methods monitoring of part stiffness under fatigue test.

Keywords: Engine mounting bracket, Manufacturing parameters, High cycle fatigue, Finite element methods, Fatigue crack propagation.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

Master Thesis in Mechanical Engineering

High Cycle Fatigue Life Prediction of Aluminum Base Engine Mounting and Investigation of Manufacturing Parameters on Fatigue Crack Growth Rate

By: Hossein Khalajzadeh

Supervisors:

Dr. Alireza Shaterzadeh
Dr. Seyyed Vahid Hosseini

February 2021