دانشکده مکانیک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

گرایش سازه و بدنه خودرو

عنوان

# تحلیل خستگی بدنه یک خودروی سواری و اصلاح نقاط ضعف آن

اساتید راهنما

دکتر محمد شرعیات - دکتر شهرام آزادی

نگارش

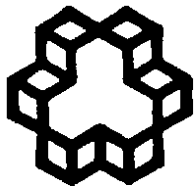
فرشاد زاهدی

**مرداد ماه ۸۸**

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم



دانشکده مهندسی مکانیک

تائیدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان **تحلیل خستگی بدنه یک خودروی سواری و اصلاح نقاط ضعف آن،** توسط آقای **فرشاد زاهدی،** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی‌ارشد در رشته **مهندسی مکانیک،** گرایش **سازه و بدنه خودرو،** مورد تایید قرار می‌دهند.

| | | |
|---|---|---|
| استاد راهنمای اول | دکتر محمد شرعیات | امضاء |
| استاد راهنمای دوم | دکتر شهرام آزادی | امضاء |
| استاد ممتحن | دکتر خلیلی | امضاء |
| استاد ممتحن | دکتر رضا کاظمی | امضاء |

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان‌نامه:

تحلیل خستگی بدنه یک خودروی سواری و اصلاح نقاط ضعف آن

**استاد راهنما:** دکتر محمد شرعیات، دکتر شهرام آزادی

**نام دانشجو**: فرشاد زاهدی

شماره دانشجویی: ۸۵۰۲۷۳۴

اینجانب فرشاد زاهدی دانشجوی دوره کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک گرایش سازه و بدنه خودرو دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده، مورد تایید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱ - حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی‌برداری بصورت کل پایان-نامه یا بخشی از آن، تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمنا، متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲ - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین، استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

# تقدیر و تشکر

انجام این پایان نامه بدون وجود اساتید ارجمندم، جناب آقای دکتر شهرام آزادی و جناب آقای دکتر محمد شرعیات که در تمام مراحل انجام آن زحمات بسیار زیادی کشیده‌اند، غیرممکن بود، بنابراین لازم است تا از هر دو بزرگوار کمال تشکر و قدردانی را به‌عمل آورم. همچنین، از جناب آقای مهندس محمد آزادی، که بدون کمک‌ها و راهنمایی‌های وی، به‌انجام رسانیدن این کار ناممکن بود، بسیار ممنونم. برای این سه عزیز و تمام کسانی که در راه پیشرفت ایران عزیز گام برمی‌دارند، آرزوی موفقیت‌های روزافزون از درگاه الهی دارم.

# چکیده

خستگی بدنه خودرو در اثر حرکت روی جاده از عوامل مهم تعیین‌کننده عمر کاری خودرو می‌باشد. بنابراین, در این پایان‌نامه در ابتدا توضیحاتی در مورد چگونگی مدلسازی و المان بندی و سپس در مورد تحلیل‌های مورد نیاز در مورد بدنه خودرو ارائه شده است. در ادامه روش‌های مختلف شبیه‌سازی جاده توضیح داده شده‌اند و جاده‌ای تولید شده است. در نهایت با استفاده از این شرایط مرزی و مدل المان‌بندی و صحت‌سنجی‌شده, عمر قطعات بدنه و شاسی خودرو در اثر حرکت بر روی جاده‌های مختلف با استفاده از دو نوع تئوری تخمین عمر متفاوت تخمین زده شده است. سپس, اصلاحاتی بر روی مدل صورت گرفته تا عمر خستگی و ضریب اطمینان آن افزایش یابد, البته در مورد این اصلاحات چند نمونه به عنوان مثال آورده شده است و از توضیح در مورد تمام اصلاحات خودداری شده است. همچنین, الگوریتمی به منظور تخمین عمر خستگی ارائه شده است و در نهایت مقایسه‌هایی بین تخمین عمر خستگی با استفاده از خودروی حامل بار و بدون بار و همچنین بین دو نوع جاده تولید شده متفاوت انجام گرفته است.

## فهرست عناوین

صفحه


**۱ مقدمه و مروری بر تاریخچه ..... ۱**

۱.۱ مقدمه ..... ۲

۲.۱ مروری بر کارهای گذشته در زمینه خستگی ..... ۲

۱.۲.۱ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه خستگی قطعات خودرویی ..... ۷

۳.۱ ویژگی ها و برتری های پایان نامه کنونی ..... ۱۰

۴.۱ نگاهی به بخش های مختلف پایان نامه ..... ۱۲

**۲ مدلسازی اجزاء محدود ..... ۱۳**

۱.۲ مقدمه ..... ۱۴

۲.۲ روش اجزاء محدود ..... ۱۴

۳.۲ انواع المانها در نرم افزار Hypermesh ..... ۱۶

۱.۳.۲ المان پوسته (مرتبه دو) ..... ۱۶

۲.۳.۲ المان فنر ..... ۱۷

۳.۳.۲ المان جرم ..... ۱۷

۴.۳.۲ المان اتصال صلب ..... ۱۷

۴.۲ مدلسازی ..... ۱۷

۱.۴.۲ مدلسازی جوش ..... ۲۱

۲.۴.۲ مدلسازی بوش ها ..... ۲۲

۳.۴.۲ مدلسازی نگهدارنده ها ..... ۲۳

۴.۴.۲ اتصال تایرها ..... ۲۴

۵.۴.۲ مدلسازی لولاها ..... ۲۴

۵.۲ خواص و مواد بکاررفته در مدل ..... ۲۴

۶.۲ ابعاد مشبندی و کنترل مدل ..... ۲۵

**۳ تحلیل های مقدماتی ..... ۲۸**

۱.۳ مقدمه ..... ۲۹

۲.۳ آنالیزهای مدل المان محدود ..... ۲۹

۳.۳ تحلیل مودال و تصدیق مدل ..... ۳۰

۴.۳ تحلیل G-loading ..... ۳۱

۱.۴.۳ اعمال شتاب ۳g در راستای عمودی خودرو ..... ۳۱

۲.۴.۳ اعمال شتاب ۴g در راستای جانبی خودرو ..... ۳۳

۳.۴.۳ اعمال شتاب ۵g در راستای طولی خودرو ..... ۳۵

۵.۳ آنالیز خمش ۳۷
۶.۳ آنالیز پیچش ۳۸
۱.۶.۳ معایب مدل ۴۳
۲.۶.۳ تصحیح مدل ۴۴
۱.۲.۶.۳ تصحیح مود درب موتور ۴۴
۲.۲.۶.۳ تصحیح مودهای خمش و پیچش بدنه ۴۶
۳.۲.۶.۳ تصحیح مود خمش سقف ۴۷
۴.۲.۶.۳ تصحیح مود خمش درب عقب ۴۸
**۴ تحلیل های تنشی ۵۰**
۱.۴ مقدمه ۵۱
۲.۴ ارتعاشات تصادفی و ورودی های جاده ۵۱
۱.۲.۴ مقدمه ۵۱
۲.۲.۴ مفاهیم ۵۲
۳.۴ تحلیل های تنشی گذرا ۶۱
۱.۳.۴ تقسیم بندی مدل ۶۲
۲.۳.۴ نتایج تحلیل های تنشی ۶۳
**۵ خستگی ۶۵**
۱.۵ مقدمه ۶۶
۲.۵ مفاهیم اولیه خستگی ۶۶
۱.۲.۵ انواع خستگی ۶۷
۲.۲.۵ خستگی کم چرخه و پر چرخه ۶۸
۳.۲.۵ خستگی تک محوره و چند محوره ۶۸
۴.۲.۵ تخریب انباشته خستگی ۷۱
۱.۴.۲.۵ معیار خطی پالمگرن-ماینر ۷۲
۵.۲.۵ شمارش سیکل ها ۷۳
۱.۵.۲.۵ روش جریان باران ۷۳
۶.۲.۵ خستگی و بارگذاری چندمحوره ۷۴
۱.۶.۲.۵ معیارهای اسکالر ۷۵
۲.۶.۲.۵ معیارهای صفحه بحرانی ۷۶
۳.۵ خصوصیات خستگی مواد ۷۷
۴.۵ نتایج تحلیل های خستگی بر روی یک قطعه از خودرو ۷۸
۵.۵ نتایج تحلیل های خستگی بر روی کل خودرو ۸۰
۱.۵.۵ نتایج خستگی قسمت عقب بدنه خام خودرو ۸۰
۱.۱.۵.۵ اصلاح عمر خستگی در محل اتصال ستون به دیواره عقب ۸۱

۲.۱.۵.۵ اصلاح عمر خستگی درب عقب خودرو ۸۲
۳.۱.۵.۵ اصلاح عمر خستگی کفی خودرو ۸۵
۲.۵.۵ نتایج خستگی قسمت جلو بدنه خام خودرو ۸۸
۱.۲.۵.۵ اصلاح عمر خستگی چهارچوب شیشه جلو ۸۸
۳.۵.۵ نتایج خستگی قسمت میانی بدنه خام خودرو ۸۹
۱.۳.۵.۵ اصلاح عمر خستگی محل اتصال سقف به کابین عقب: ۹۰
۴.۵.۵ نتایج خستگی بر روی شاسی خودرو ۹۱
۶.۵ الگوریتم تحلیل خستگی خودرو ۹۲
۷.۵ بررسی اثر جاده های مختلف ۹۴
۸.۵ بررسی اثر تغییر جاده ۹۵
۹.۵ بررسی اثر در نظر گرفتن وزن بار ۹۶
**۷ نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۸**
**۸ منابع و مراجع ۱۰۱**

## فهرست اشکال

صفحه

شکل ۲-۱ - المان بندی قاب شاسی با ۴۵۹۴۵ المان پوسته ..... ۱۸
شکل ۲-۲ – المان بندی سپرهای جلو و عقب با ۹۵۲۰ المان پوسته ..... ۱۹
شکل ۲-۳ - مدل اجزاء محدود سر شاسی و طریقه اتصال قطعات سیستم تعلیق جلو به آن ..... ۱۹
شکل ۲-۴ - مدل اجزاء محدود انتهای شاسی و طریقه اتصال قطعات سیستم تعلیق عقب به آن ..... ۱۹
شکل ۲-۵ – المان بندی بدنه خام با ۲۲۱۳۳۹ المان پوسته ..... ۲۰
شکل ۲-۶ - مدل اجزاء محدود شاسی و بدنه ..... ۲۰
شکل ۲-۷ - مدل کامل اجزاء محدود خودرو ..... ۲۰
شکل ۲-۸ - اتصال گلگیر عقب از طریق المان RBE2 ..... ۲۱
شکل ۲-۹ - طریقه اتصال براکت ها به قاب شاسی ..... ۲۲
شکل ۲-۱۰ - طریقه اتصال بازوی کنترلی به براکت قاب شاسی ..... ۲۳
شکل ۲-۱۱ - نمایش وضعیت المان های مدل در نرم افزار Hypermesh ..... ۲۷
شکل ۳-۱ - کانتور جابجایی به ازای شتاب ۳g در راستای عمود ..... ۳۱
شکل ۳-۲ - کانتور تنش در براکت نگهدارنده موتور و براکت کمک فنر ..... ۳۲
شکل ۳-۳ - کانتور تنش به ازای شتاب ۳g بر روی شاسی ..... ۳۲
شکل ۳-۴ - کانتور تنش به ازای شتاب ۳g در راستای عمودی بر روی بدنه ..... ۳۲
شکل ۳-۵ - کانتور تنش در قسمت عقب خودروسمت چپ ..... ۳۲
شکل ۳-۶ - کانتور تنش در قسمت عقب خودروسمت راست ..... ۳۲
شکل ۳-۷ - کانتور جابجایی به ازای شتاب در راستای عرضی ..... ۳۳
شکل ۳-۸ - کانتور تنش به ازای شتاب ۴g بر روی شاسی ..... ۳۳
شکل ۳-۹ - کانتور تنش در براکت نگهدارنده موتور ..... ۳۳
شکل ۳-۱۰ - کانتور تنش در براکت نشیمنگاه فنر سمت راست جلو ..... ۳۴
شکل ۳-۱۱ - کانتور تنش در براکت تعلیق سمت چپ ..... ۳۴
شکل ۳-۱۲ - کانتور تنش به ازای شتاب ۴g در راستای جانبی بر روی بدنه ..... ۳۴
شکل ۳-۱۳ - کانتور تنش به ازای شتاب ۴g در راستای جانبی در تقویتی زیر کفی صندلی راننده ..... ۳۴
شکل ۳-۱۴ - کانتور تنش به ازای شتاب ۴g در راستای جانبی در تقویتی زیر کفی صندلی سمت راست ..... ۳۴
شکل ۳-۱۵ - کانتور جابجایی به ازای شتاب ۵g در راستای طولی خودرو ..... ۳۵
شکل ۳-۱۶ - کانتور تنش به ازای شتاب ۵g بر روی شاسی در راستای طولی ..... ۳۵
شکل ۳-۱۷ - کانتور تنش در براکت A-arm جلو ..... ۳۵
شکل ۳-۱۸ - کانتور تنش در براکت نشیمنگاه فنر سمت چپ جلو ..... ۳۶
شکل ۳-۱۹ - کانتور تنش در براکت نشیمنگاه فنر سمت راست جلو ..... ۳۶
شکل ۳-۲۰ - کانتور تنش به ازای شتاب ۵g در راستای طولی بر روی بدنه ..... ۳۶

شکل ۳-۲۱ - کانتور تنش در قسمت عقب خودروسمت چپ..... ۳۶
شکل ۳-۲۲ - کانتور تنش در قسمت عقب خودروسمت راست..... ۳۶
شکل ۳-۲۳ - میزان جابجایی بدنه درآنالیز خمش..... ۳۷
شکل ۳-۲۴ - میزان جابجایی محل اعمال نیرو درآنالیز خمش..... ۳۷
شکل ۳-۲۵ - حل اعمال کوپل وشرایط مرزی محور عقب و زاویه پیچش ..... ۳۸
شکل ۳-۲۶ - چگونگی تغییر شکل بدنه پس از اعمال کوپل نیرو..... ۳۹
شکل ۳-۲۷ - بردارهای نشان داده شده،بردارهای جابجایی دو سر محور چرخ جلوبرحسب میلیمتر می باشند. ..... ۳۹
شکل ۳-۲۸ - نقشه فرکانسی خودروی S81 ارائه شده توسط شرکت ریکاردو ..... ۴۲
شکل ۳-۲۹- اولین مود مربوط به درب موتور در فرکانس ۱۲/۲۵ هرتز (قبل از اصلاح)..... ۴۵
شکل ۳-۳۰ - اولین مود خمش درب موتور با فرکانس ۳۰/۹۸۶ هرتز (پس از اصلاح)..... ۴۵
شکل ۳-۳۱ - اولین مود پیچش بدنه با فرکانس ۷/۳۴۸۲ هرتز (قبل از اصلاح)..... ۴۶
شکل ۳-۳۲ - اولین مود خمش بدنه و مود خمش سقف با فرکانس ۱۲/۳۹۲ هرتز (قبل از اصلاح)..... ۴۶
شکل ۳-۳۳ - اولین مود پیچش بدنه با فرکانس ۱۳/۱۹۳ هرتز (بعد از اصلاح)..... ۴۷
شکل ۳-۳۴ - اولین مود خمش بدنه با فرکانس ۱۳/۸۳۳ هرتز (بعد از اصلاح)..... ۴۷
شکل ۳-۳۵ - دومین مود خمش سقف با فرکانس ۱۹/۲۳۸ هرتز (قبل از اصلاح)..... ۴۷
شکل ۳-۳۶ - سومین مود خمش سقف با فرکانس ۲۲/۸۱۶ هرتز (قبل از اصلاح) ..... ۴۷
شکل ۳-۳۷ - سطح مقطع تیرهای تقویتی مورد استفاده..... ۴۸
شکل ۳-۳۸ - اولین مود خمش درب عقب با فرکانس ۲۰/۶۰۵ هرتز (قبل از اصلاح)..... ۴۹
شکل ۴-۱ - پروفیل ناهموار سطح..... ۵۲
شکل ۴-۲ - رابطه بین دامنه و طول موج پروفیل سطح..... ۵۳
شکل ۴-۳ - طیف فرکانس جداگانه تابع اتفاقی..... ۵۴
شکل ۴-۴ - تابع چگالی طیفی توان پیوسته..... ۵۵
شکل ۴-۵ - چگالی طیفی توان تابع فرکانسی مکانی برای جاده های متفاوت..... ۵۵
شکل ۴-۶ - دسته بندی زبری سطح جاده توسط ISO..... ۵۷
شکل ۴-۷ - منحنی ناصافی جاده نوع B بر حسب فاصله از یک نقطه مرجع..... ۵۹
شکل ۴-۸ - پروفیل ترکیب ناهمواری جاده های مختلف برای چرخ جلو سمت چپ..... ۶۱
شکل ۴-۹ - پروفیل ترکیب ناهمواری جاده های مختلف برای چرخ جلو سمت راست..... ۶۱
شکل ۴-۱۰ - نمای قطعات شاسی خودرو ..... ۶۲
شکل ۴-۱۱ - نمای قطعات قسمت جلوی خودرو ..... ۶۲
شکل ۴-۱۲ - نمای قطعات قسمت عقب خودرو..... ۶۳
شکل ۴-۱۳ - نمای قطعات قسمت عقب خودرو..... ۶۳
شکل ۵-۱ - بارگذاری متناسب..... ۶۹
شکل ۵-۲ - بارگذاری نامتناسب..... ۶۹
شکل ۵-۳ –قطعه پادغلتان خودرو..... ۷۹

شکل ۵-۴ - کانتور عمر خستگی قطعه پادغلتان در اثر جابجایی ۱۴۶ میلیمتر (راست) و ۷۲۳ میلیمتر (چپ)..... ۷۹
شکل ۵-۵ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) قسمت عقب بدنه خودرو..... ۸۱
شکل ۵-۶ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال ستون به کفی عقب..... ۸۱
شکل ۵-۷ - شکل المان ها قبل (راست) و بعد (چپ) از اصلاح..... ۸۲
شکل ۵-۸ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال ستون به کفی عقب بعد از اصلاح ۸۲
شکل ۵-۹ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) درب عقب قبل از اصلاح ..... ۸۳
شکل ۵-۱۰ - شکل اتصال درب عقب قبل از اصلاح..... ۸۳
شکل ۵-۱۱ - شکل اتصال عقب بعد از اصلاح..... ۸۴
شکل ۵-۱۲ - کانتور عمر خستگی درب عقب قبل از اصلاح اول ..... ۸۴
شکل ۵-۱۳ - نمای صفحه تقویتی درب عقب ..... ۸۵
شکل ۵-۱۴ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) درب عقب بعد از اصلاح دوم..... ۸۵
شکل ۵-۱۵ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) کفی خودرو قبل از اصلاح - جلو.....۸۶
شکل ۵-۱۶ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) کفی خودرو قبل از اصلاح - عقب .....۸۶
شکل ۵-۱۷ - حالت اولیه المان ها (راست) و صفحه تقویتی اضافه شده به کفی عقب خودرو (چپ)..... ۸۷
شکل ۵-۱۸ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) کفی خودرو بعد از اصلاح - جلو..... ۸۷
شکل ۵-۱۹ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) کفی خودرو بعد از اصلاح - عقب ..... ۸۷
شکل ۵-۲۰ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) قسمت جلوی بدنه خودرو..... ۸۸
شکل ۵-۲۱ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال شیشه به سقف قبل از اصلاح.... ۸۸
شکل ۵-۲۲ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال پنجره به سقف بعد از اصلاح ..... ۸۹
شکل ۵-۲۳ - کانتور عمر خستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) قسمت میانی بدنه خودرو..... ۸۹
شکل ۵-۲۴ - کانتور عمرخستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال سقف به کابین عقب قبل از اصلاح ..... ۹۰
شکل ۵-۲۵ - المان ها قبل (راست) و بعد (چپ) از اصلاح..... ۹۰
شکل ۵-۲۶ - کانتورعمرخستگی (راست) و ضریب اطمینان (چپ) محل اتصال سقف به کابین عقب بعد از اصلاح ۹۰
شکل ۵-۲۷ - کانتور ضریب اطمینان عمر خستگی بر روی شاسی خودرو..... ۹۱
شکل ۵-۲۸ - کانتور ضریب اطمینان بر روی شاسی خودرو - نمای از نزدیک ..... ۹۱
شکل ۵-۲۹ - الگوریتم تحلیل خستگی مدل کامل خودرو..... ۹۳
شکل ۵-۳۰ - ضریب اطمینان عمر خستگی در صورت حرکت روی جاده های نوع B وD (۱)..... ۹۴
شکل ۵-۳۱ - ضریب اطمینان عمر خستگی در صورت حرکت روی جاده های نوع B و D (۲)..... ۹۴
شکل ۵-۳۲ - نمودار جاده نوع F برای چهار چرخ..... ۹۵
شکل ۵-۳۳ - کانتور ضریب اطمینان قسمت عقب خودرو در اثر حرکت روی جاده جدید (راست) و جاده قدیمی (چپ)..... ۹۶
شکل ۵-۳۴ - کانتور ضریب اطمینان بدون در نظر گرفتن بار (راست) و با در نظر گرفتن بار (چپ)..... ۹۷

## فهرست جداول

صفحه

جدول ۲-۱ - نام قطعات بدنه و مقدار جرم آنها ۱۸
جدول ۲-۲ - اطلاعات کلی مدل ۲۴
جدول ۲-۳ - انواع مواد بکار رفته در مدل ۲۵
جدول ۲-۴ - لیست کنترلرهای المان در نرم افزار Hypermesh ۲۷
جدول ۳-۱ - ده فرکانس طبیعی اول خودرو در حالت آزاد-آزاد ۳۰
جدول ۳-۲ – فرکانس های طبیعی و شکل مودهای مربوطه در بازه صفر تا ۵۰ هرتز ۴۰
ادامه جدول ۳-۳ – فرکانس های طبیعی و شکل مودهای مربوطه در بازه صفر تا ۵۰ هرتز ۴۱
ادامه جدول ۳-۴ – فرکانس های طبیعی و شکل مودهای مربوطه در بازه صفر تا ۵۰ هرتز ۴۲
جدول ۳-۵ - مقادیر بهینه پارامترهای سقف خودرو ۴۸
جدول ۴-۱ - مقادیر $C_{sp}$ و N توابع چگالی طیفی سطوح مختلف ۵۶
جدول ۴-۲ - محدوده تغییرات و میانگین هندسی (درجه ناهمواری) برای جاده های مختلف ۵۷
جدول ۵-۱ - مشخصات خستگی مواد ۷۸

فصل اول

# ۱ مقدمه و مروری بر تاریخچه

## ۱.۱ مقدمه

لغت Fatigue از واژه لاتین Fatigue که به معنای خسته‌شدن می‌باشد گرفته شده است. این اصطلاح در مهندسی به شکست و ازهم‌پاشیدگی در مواد در اثر بارهای سیکلی شامل بارهای مکانیکی، حرارتی و ... اطلاق می‌شود. پیشرفت‌های زیادی در ۱۰۰ سال اخیر در تحلیل خستگی صورت گرفته است. شکست خستگی یکی از مهم‌ترین حالت‌های شکست در اجزاء مکانیکی می‌باشد از جمله در محورهای خودرو و چرخ‌های قطار. شکست خستگی به طور مشخص قابلیت اطمینان و زمان پایداری سیستم را کاهش داده و باعث خسارت‌های مادی و انسانی می‌شود.

## ۲.۱ مروری بر کارهای گذشته در زمینه خستگی

شروع بحث خستگی با تحقیق آلبرت[۱]، مهندس معدن اهل آلمان، در سال ۱۸۳۷، با ارائه گزارشی توسط وی در مورد شکست نقاله‌های معدنی در اثر کار به مدت طولانی شروع می‌شود. همچنین، وی اولین کسی است که بر روی یک قطعه واقعی آزمایش خستگی انجام داده است. در ادامه رانکین، که بیشتر در زمینه ترمودینامیک فعالیت کرده، تحقیقاتی بر روی عمر خستگی محور قطار انجام داد. فعالیت بعدی در زمینه خستگی توسط یک مهندس فرانسوی به نام مورین در سال ۱۸۵۳ با انتشار یک کتاب با استفاده از گزارش دو مهندس انجام گرفت. این دو مهندس تحقیقاتی بر روی کالسکه‌های پست انجام دادند و با استفاده از نتایج بدست آورده، اولین بار طراحی "عمر محدود" را ارائه کردند.

اما لغت خستگی اولین بار توسط بریت ویت انگلیسی در سال ۱۸۵۴ به کار برده شد. وی در مقاله خود مثال‌های زیادی از اجزای شکسته‌شده در اثر خستگی مانند پمپ‌های آب، محور پروانه کشتی، میل-لنگ‌ها، اهرم‌ها، جرثقیل‌ها و... ارائه کرد و همچنین تنش‌های قابل‌قبول بر روی قطعاتی که تحت بارگذاری خستگی هستند را توضیح داد.

اما، سوانح بوجود آمده در این محدوده زمانی باعث شد تا مساله خستگی بیش از پیش مدنظر قرار گیرد. از این دست حوادث می‌توان به شکسته شدن محور لوکوموتیو در سال ۱۸۴۲ در ورسای اشاره کرد که در این سانحه ۶۰ نفر کشته شدند.

در فاصله سال‌های ۱۸۴۰ تا ۱۸۶۰ برای اولین بار با ایجاد ترک روی ریل‌های راه‌آهن در آلمان تحقیقاتی روی خستگی صورت گرفت. در این سال‌ها وهلر[۲]برای اولین بار به رسم نمودارهای تنش-عمر پرداخت که چگونگی تغییرات عمر با تغییرات دامنه بارگذاری را نشان می‌داد و مفهوم حد خستگی را برای اولین بار ارائه کرد. وی برای اولین بار با استفاده از وسیله اندازه‌گیری تغییرطول، که توسط خود وی ابداع شده بود، تحقیقی گسترده برروی عمر اکسل‌های راه‌آهن در سال‌های ۱۸۵۸ و ۱۸۶۰ انجام داد. وی در تحقیق خود ابتدا بزرگترین تغییر شکل بوجودآمده در اکسل و در نتیجه نیروی بوجودآورنده این تغییر شکل در یک سفر را اندازه‌گیری می‌کند. سپس با استفاده از این اطلاعات تنش‌های خمشی و برشی موجود در محور را محاسبه می‌نماید و با مقایسه این مقدار با نیروی خمشی بوجودآمده در اثر بارگذاری استاتیکی محور به یک فاکتور ۱/۳۳ دست می‌یابد که امروزه به نام ضریب تاثیر نامیده می‌شود. در ادامه وی پیشنهادی در زمینه طراحی عمر محدود قطعات با در نظر گرفتن احتمالات ارائه می‌دهد.

وهلر همچنین اولین آزمایش خستگی در اثر بارهای خمشی دورانی را ارائه نمود. با توجه به اینکه وی این نتایج را با استفاده از دستگاه آزمایشی که خود ساخته بود و فرکانس کاری بسیار پایینی داشت گرفته بود، نتایج در سال ۱۸۶۰ منتشر شد و در نهایت در سال ۱۸۷۰ وی گزارش نهایی خود را ارائه داد که به قانون وهلر مشهور است و بیان می‌دارد که: مواد در اثر اعمال بارهای تکراری، که کوچکتر از مقاومت استاتیکی هستند، شکسته خواهند شد. دامنه بارهای اعمالی برای از بین بردن پیوستگی مواد کافی هستند. بیشترین تنش اعمال شده نقش تعیین کننده‌ای دارد، به طوری که هرچه این تنش بالاتر باشد، دامنه تنش مورد نیاز برای شکست قطعه کوچکتر خواهد بود. همانطور که دیده می‌شود، وی در قانون خود عنوان می-کند که دامنه تنش از اهمیت زیادی در شکست قطعات ایفا می‌کند، اما تنش میانگین کششی نیز نقش مهمی دارد.

در ادامه وی تحقیقاتی روی ضریب اطمینان و عمر محدود انجام داد. در سال ۱۸۷۰ وهلر همچنین گزارشی دیگر در مورد اندازه، طراحی و ماده مورد استفاده در قطعات قطار انجام داد. وهلر در این تحقیق حتی به بحث در مورد رشد ترک خستگی در قطعه پرداخت که در زمان خود کار بسیار بزرگی بود. البته وی نتایج خود را به صورت جداولی ارائه کرده بود، اما باسکویین در سال ۱۹۱۰ این جداول را به صورت نمودارهای لگاریتمی ارائه کرد و در سال ۱۹۳۶ این نمودارها به نام "نمودار وهلر" مشهور شدند که همچنان مورد استفاده هستند. در دهه ۱۹۲۰ گاوف[۳] نیز تحقیقات زیادی روی فرایند خستگی انجام داد.

محقق بعدی که در زمینه خستگی تحقیقات گسترده‌ای انجام داد باوشینگر، پروفسور مکانیک دانشگاه پلی تکنیک مونیخ، است که اولین بار مفهوم کاهش حد الاستیک در اثر سیکل‌های بارگذاری تکراری را بیان نمود و به نام "اثر باوشینگر" مشهور است و اساس تئوری کافین-مانسون می‌باشد که در دهه ۱۹۵۰ ارائه شد و همچنین در محدود خستگی کم‌چرخه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عنوان خستگی همراه با خوردگی اولین بار توسط های انگلیسی در سال ۱۹۱۷ مطرح و در سال ۱۹۲۹ آزمایش‌های بسیاری توسط مک‌آدام انگلیسی بر روی همین موضوع انجام گرفت که هم اکنون به عنوان مرجع مورد استفاده است.

تام اولین کسی بود که در سال ۱۹۲۷ کرسی متالوژی در آلمان را در دانشگاه دارمستاد آلمان عهده‌دار بود. وی همچنین نظریه‌ای در مورد خستگی ارائه کرد که به صورت زیر مطرح شده بود: به منظور دستیابی به عمر بالای خستگی، طراحی مناسب قطعه بسیار مهم‌تر از انتخاب مناسب ماده برای قطعه می-باشد. بنابر نظریه او مقاومت خستگی به مقدار و نوع بار و همچنین ماده و مخصوصا شکل قطعه بستگی دارد.

مفهوم ضریب تمرکز تنش خستگی اولین بار توسط تام مطرح شد؛ ضریبی که با استفاده از آن می-توان نمونه بدون ترک را به نمونه ترک‌دار مرتبط نمود. تام یکی از تاثیرگذارترین دانشمندانی است که در زمینه علم خستگی فعالیت کرده و علم کنونی خستگی تا حد زیادی مدیون زحمات وی است. وی در فاصله سالهای ۱۹۲۲ تا ۱۹۵۶، ۵۲۴ مقاله مختلف در زمینه علم خستگی تولید و منتشر کرده است.