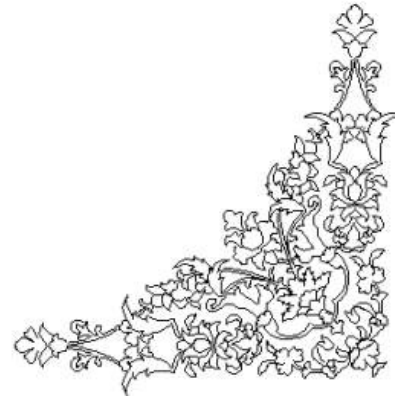
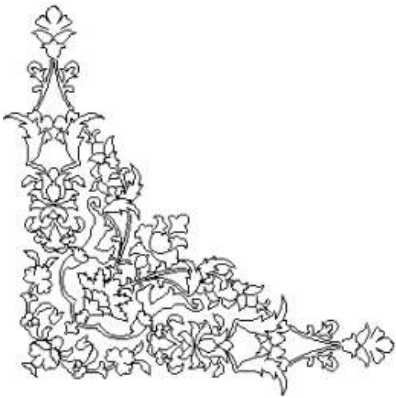
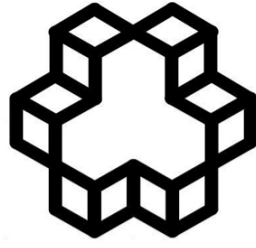


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد

# بررسی خستگی تماسی و خمشی چرخ دنده های

## ساده

استاد راهنما:

دکتر رحمت الله قاجار

نگارنده:

هادی اکبری

## تاییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

**بررسی خستگی تماسی و خمشی چرخ دنده های ساده**

توسط آقای هادی اکبری، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک، گرایش طراحی کاربردی، در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۳ مورد تأیید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما: دکتر رحمت الله قاجار امضاء

۲- استاد ممتحن: دکتر امیر شاهانی امضاء

۳- استاد ممتحن: دکتر علی اصغر جعفری امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر علی اصغر جعفری امضاء

## اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه:

بررسی خستگی تماسی و خمشی چرخ دنده های ساده

استاد راهنما: دکتر رحمت الله قاجار

تهیه کننده: هادی اکبری

شماره دانشجویی: ۸۷۰۲۳۴۴

اینجانب هادی اکبری، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده است و صحت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد. همچنین در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت نموده‌ام.

هادی اکبری

## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده می باشد. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً 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 می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## قسم به خدایی که

هر صبح در چشمانم میرقصد و آرام در گوشم زمزمه می کند که مرا باور دارد

و سکنده شبنم هایی که پیش از بیدار شدن خورشید به دنیایم آیند و به کلهایی که خوشتر از همه خاطره های زمین هستند

تقدیم به

قامت اثرای زنگی ام (پدرم)

که با سرو قامتت اش، استواری را به من می آموزد

و

گل معطر حیاتم (مادرم)

که با لطافت و آرامشش، همواره تسلائی خاطر پریشانم است

و

تنها تکیه گاه لحظه های نوییدی ام (همسرم)

که با صبرش، همه چیزش را با آتش باز به من می بخشد

بر خود لازم می دانم از استاد گرانقدرم که در هموار نمودن مشکلات ناخواسته ام به کمک شتافت،

قدردانی کنم.

همچنین از دو دوست عزیزم، مهندس حمید شوشتر و مهندس حامد سعیدی که با توضیحات

صبورانه خود، سنگ های علمی پیش رویم را از سر راهم کنار زدند تشکر می کنم و با سپاس از تمام

دانشجویان آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد که از کمک به بنده هیچ گونه مضایقه ای نکردند.

## چکیده

چرخ‌دنده یکی از مهم‌ترین اجزای مکانیکی مورد کاربرد در سیستم‌های صنعتی می‌باشد که اغلب به علت خستگی مکانیکی، آسیب دیده و کارایی مطلوب خود را از دست می‌دهد. خستگی مکانیکی موجب می‌گردد که چرخ‌دنده‌ها در باری کمتر از حد تسلیم، تخریب گردند. در نتیجه بایستی در حین طراحی چرخ‌دنده‌ها عمر کاری مورد نیاز آن‌ها نیز محاسبه گردد. شکست در ناحیه ریشه دنده و کچلی سطح دنده دو عامل از کارافتادگی دنده‌ها می‌باشند. شکست ریشه در اثر خستگی خمشی و کچلی ناشی از تنش‌های تماسی هرگز است که مقادیر این تنش در ناحیه تماس یک زوج دنده‌ای بیشینه می‌باشد. فرآیند خستگی به دو قسمت جوانه‌زنی و رشد ترک تقسیم می‌شود. برای تخمین عمر خستگی چرخ‌دنده‌ها از مدل‌های تنش‌پایه و کرنش‌پایه موجود استفاده می‌گردد. جهت تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی از ترکیب روش عددی با مدل‌های خستگی موجود استفاده می‌شود. مدل‌های مذکور به منظور تخمین عمر کاری چرخ‌دنده ساده ساخته شده از جنس فولاد  $42CrMo4$  مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ابتدا با استفاده از مقایسه میان عمر تخمینی مدل‌های خستگی و نتایج تجربی موجود، مناسب‌ترین مدل‌ها ارائه می‌گردد. سپس با کمک تعیین عمر خستگی ریشه دنده و سطح جانبی دنده، محل بحرانی جهت آغاز جوانه‌زنی ترک خستگی مشخص می‌گردد. در انتها کاهش عمر ناشی از بارگذاری خمشی دوطرفه که در چرخ‌دنده‌های هرزگرد ایجاد می‌گردد، تخمین زده می‌شود. همچنین تأثیر تغییر ابعاد و اصطکاک بر روی پروفیل و مقادیر تنش تمامی نقاط سطح جانبی دنده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: چرخ‌دنده ساده، خستگی، تخمین عمر، خستگی تماسی، خستگی خمشی، روش اجزاء

محدود

## فهرست عناوین

عنوان	صفحه
۱ مقدمه .....	۱
۱.۱ انواع از کارافتادگی مکانیکی .....	۲
۲.۱ مراحل بروز شکست خستگی .....	۳
۳.۱ جنبه‌های ریز/درشت ساختاری خستگی فلزات .....	۵
۴.۱ مکانیزم‌ها و خصوصیات ریزساختاری در پدیده خستگی .....	۶
۵.۱ مکانیزم‌های تخریب در پدیده خستگی .....	۱۲
۶.۱ پروفیل گستران در چرخ‌دنده‌ها .....	۱۳
۷.۱ تئوری هرتز .....	۱۸
۸.۱ پارامترهای حرکتی چرخ‌دنده .....	۲۰
۹.۱ تغییرات بار تماسی در طول یک سیکل کاری چرخ‌دنده ساده .....	۲۲
۱۰.۱ چرخ‌دنده‌های هرزگرد .....	۲۴
۱۱.۱ مروری بر ادبیات موضوع .....	۲۶
۱۲.۱ تعریف مسأله .....	۳۴
۲ مدل‌های خستگی .....	۳۶
۱.۲ مدل‌های تنش پایه .....	۳۷
۱.۱.۲ مدل فیندلی .....	۳۸
۲.۲ مدل‌های کرنش پایه .....	۴۰
۱.۲.۲ مدل مورو تصحیح شده (تنش میانگین مورو) .....	۴۴
۲.۲.۲ مدل اسمیت، واتسون و تایر .....	۴۶



۴۸.....	مدل براون-میلر.....	۳.۲.۲
۵۲.....	مدل شیب عمومی کافین-مانسون.....	۴.۲.۲
۵۲.....	مدل شیب عمومی مورالیدهاران-مانسون.....	۵.۲.۲
<b>۵۴.....</b>	<b>تخمین عمر خستگی خمشی ریشه دنده.....</b>	<b>۳</b>
۵۵.....	نرم افزار اجزاء محدود آباکوس.....	۱.۳
۵۷.....	مدل سازی چرخ دنده در نرم افزار.....	۲.۳
۶۲.....	بررسی فرض کرنش صفحه‌ای.....	۳.۳
۶۷.....	بررسی همگرایی نتایج.....	۴.۳
۶۸.....	تعیین پروفیل عمر خستگی ریشه دنده.....	۵.۳
۷۳.....	عمر خستگی گذار از کم چرخه به پر چرخه.....	۶.۳
۷۵.....	تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی ریشه دنده تحت بار خمشی یک طرفه.....	۷.۳
۷۵.....	مدل فیندلی.....	۱.۷.۳
۷۷.....	مدل مورو با تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک.....	۲.۷.۳
۷۹.....	مدل مورو با تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک و پلاستیک.....	۳.۷.۳
۸۰.....	مدل SWT.....	۴.۷.۳
۸۱.....	مدل براون-میلر.....	۵.۷.۳
۸۲.....	مدل کافین-مانسون.....	۶.۷.۳
۸۳.....	مدل مانسون-مورالیدهاران.....	۷.۷.۳
<b>۸۴.....</b>	<b>تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی ریشه دنده تحت بار خمشی دوطرفه.....</b>	<b>۸.۳</b>
۸۴.....	مدل مورو با تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک.....	۱.۸.۳
۸۵.....	مدل SWT.....	۲.۸.۳
۸۶.....	مدل کافین-مانسون.....	۳.۸.۳

۴	بررسی و تخمین عمر خستگی تماسی سطح جانبی دنده	۸۸
۱.۴	مدل سازی چرخ دنده در نرم افزار اجزاء محدود	۸۹
۲.۴	بررسی همگرایی نتایج	۹۲
۳.۴	بررسی تئوری هر تیز	۹۲
۴.۴	توزیع تنش در ناحیه تماس دو دنده	۹۶
۵.۴	تخمین عمر جوانه زنی ترک خستگی سطح جانبی دنده تحت بار تماسی	۹۷
۱.۵.۴	مدل مورو با تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک	۹۸
۲.۵.۴	مدل کافین-مانسون	۹۹
۳.۵.۴	مدل SWT	۹۹
۶.۴	بررسی انواع نقاط سطح جانبی دنده	۱۰۰
۱.۶.۴	اثر هندسه بر تنش سطح جانبی	۱۰۰
۲.۶.۴	اثر نیروهای اصطکاکی بر تنش سطح جانبی	۱۰۶
۵	بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۱۱
۱.۵	مقایسه مدل های خستگی در حالت بارگذاری خمشی یک طرفه	۱۱۲
۲.۵	مقایسه عمر جوانه زنی ترک خستگی تحت بار تماسی و خمشی	۱۱۷
۳.۵	مقایسه مدل های خستگی در بارگذاری خمشی دوطرفه با بارگذاری یک طرفه	۱۱۹
۴.۵	پیشنهادات	۱۲۱
	منابع و مراجع	۱۲۳
	ضمیمه الف	۱۲۸
	ضمیمه ب	۱۳۲
	ضمیمه ج [۵۸]	۱۳۶

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱. شکست خستگی ناشی از خمش تک‌محوره پیچ. تخریب از شیار سطحی در نقطه A شروع و با انتشار در بیشتر سطح مقطع که بوسیله خطوط تیره و روشن ناحیه B نشان داده شده است رشد و در نهایت پیچ در ناحیه C دچار شکست سریع و ناگهانی می‌گردد. .... ۵
- شکل ۲-۱. شماتیک لغزش ناشی از (a) بار استاتیکی (b) بار متناوب (c) مراحل تدریجی آسیب خستگی بصورت ظاهر شدن جفت‌های بیرون‌زدگی/فرورفتگی ..... ۹
- شکل ۳-۱. تشدید لغزش در نیکل چندکریستالی خالص بر حسب تناوب بار اعمالی (a) بعد از  $10^4$  سیکل، لغزش کلی پدیدار می‌شود (b) بعد از  $5 \times 10^4$  سیکل، خطوط لغزش گسترش یافته‌اند (c) بعد از کارافتادگی در  $27 \times 10^4$  سیکل، خطوط لغزش تشدید شده‌اند اما در عین حال برخی نواحی عاری از لغزش محسوس می‌باشند. .... ۱۰
- شکل ۴-۱. شماتیک رشد ترک شامل مرحله I رشد ترک (مود برشی) و مرحله دوم رشد ترک (مود کششی) ..... ۱۲
- شکل ۵-۱. پارامترهای چرخ‌دنده ساده [2] ..... ۱۴
- شکل ۶-۱. شماتیک تغییر نقطه تماس دو چرخ‌دنده که منجر به تغییر شعاع تماس در آن‌ها می‌شود. .... ۱۵
- شکل ۷-۱. طریقه تولید پروفیل اینولوت ..... ۱۶
- شکل ۸-۱. تماس دو استوانه که منجر به سطح تماس مستطیلی می‌شود. .... ۱۸
- شکل ۹-۱. شماتیک توزیع فشار تماسی بر اساس تئوری هرتز ..... ۲۰
- شکل ۱۰-۱. شماتیک چرخ‌دنده ساده (a) در حالت استاندارد (b) در حالت منتقل شده ..... ۲۱
- شکل ۱۱-۱. تماس دنده‌های دو چرخ‌دنده (a) اولین نقطه تماس (b) تماس روی دایره گام (c) آخرین نقطه تماس [۱۴] ..... ۲۳
- شکل ۱۲-۱. تغییر تعداد دنده درگیر در چرخ‌دنده ساده ..... ۲۳
- شکل ۱۳-۱. تغییرات بار تماسی در طی یک سیکل کاری چرخ‌دنده ساده [۱۵] ..... ۲۴
- شکل ۱۴-۱. انواع کاربرد چرخ‌دنده ساده بصورت درگیر با یک دنده و بیش از یک دنده ..... ۲۴
- شکل ۱۵-۱. شماتیک بار اعمالی به سطح جانبی دنده در بارگذاری یک طرفه ..... ۲۵

- شکل ۱۶-۱. کشش و فشار در دو ریشه دنده تحت بار ..... ۲۵
- شکل ۱۷-۱. شماتیک بار اعمالی به سطح جانبی دنده در بارگذاری دو طرفه ..... ۲۶
- شکل ۱۸-۱. تأثیر زبری روی عمر خستگی خمشی چرخ‌دنده‌های ساده [۱۷] ..... ۲۷
- شکل ۱۹-۱. محل جوانه‌زنی ترک، مود و مسیر رشد ترک برای ضخامت‌های زه متفاوت [۲۰] ..... ۲۹
- شکل ۲۰-۱. عمر رشد ترک خستگی در دو حالت بارگذاری متحرک و بارگذاری ثابت [۲۲] ..... ۳۰
- شکل ۲۱-۱. مسیر رشد ترک در حالت (A) بارگذاری ثابت (B) بارگذاری متحرک [۲۲] ..... ۳۰
- شکل ۲۲-۱. شماتیک چرخ‌دنده در حالت (a) استاندارد (b) ضخامت بهبود یافته [۲۴] ..... ۳۱
- شکل ۲۳-۱. تنش موثر فون‌مایز در تماس روی گره (a) شماره ۳ (b) شماره ۹ [۱۱] ..... ۳۲
- شکل ۲۴-۱. تغییر تنش موثر فون‌مایز بر روی سطح جانبی دنده [۱۱] ..... ۳۲
- شکل ۲۵-۱. معادل‌سازی تماس دو دنده با استفاده از دو استوانه [۲۵] ..... ۳۳
- شکل ۲۶-۱. مدل‌سازی چرخ‌دنده مارپیچ در دو حالت (a) نسبت تماس بالا (b) استاندارد (شامل پروفیل اینولوت) [۲۷] ..... ۳۴
- شکل ۲۷-۱. بیشینه تنش اصلی ریشه دنده در اثر بار خمشی در دو حالت (a) نسبت تماس بالا (b) استاندارد (شامل پروفیل اینولوت) [۲۷] ..... ۳۴
- شکل ۱-۲. رابطه میان دامنه کرنش واقعی و عمر خستگی (فولاد SAE 1020 تحت نورد گرم) ..... ۴۱
- شکل ۲-۲. حلقه هیستریزس تنش واقعی-کرنش واقعی نمایش دهنده پنج مرحله بارگذاری و باربرداری ابتدایی نرم‌شوندگی سیکلیک مواد (شیب خط AB برابر با مدول الاستیسیته E می‌باشد) ..... ۴۲
- شکل ۳-۲. مدل تصحیح شده تنش میانگین مورو ..... ۴۵
- شکل ۴-۲. رشد ترک ناشی از تنش کششی ..... ۴۶
- شکل ۵-۲. مدل خستگی اسمیت، واتسون و تاپر [۳۶] ..... ۴۸
- شکل ۶-۲. تأثیر کرنش عمودی بر روی عمر خستگی [۷] ..... ۴۹
- شکل ۷-۲. ترک نوع A و نوع B ..... ۵۰
- شکل ۱-۳. روابط بین واحدهای مختلف در محصول Abaqus/CAE ..... ۵۷
- شکل ۲-۳. نمایی از مدل اولیه یک دنده در نرم‌افزار المان محدود ..... ۵۸

- شکل ۳-۳. شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر روی مدل سه بعدی دنده ..... ۵۹
- شکل ۳-۴. مدل مش‌بندی شده سه بعدی دنده ..... ۵۹
- شکل ۳-۵. مقطع مدل سه بعدی مش‌بندی شده با کمترین زاویه موجود برای المان‌ها ..... ۶۰
- شکل ۳-۶. مقطع مدل سه بعدی مش‌بندی شده با بیشترین زاویه موجود برای المان‌ها ..... ۶۰
- شکل ۳-۷. حد پایین نسبت طول اضلاع در مش بکار رفته در مدل سه بعدی ..... ۶۱
- شکل ۳-۸. خطا و اخطار صفر برای مش‌بندی مورد استفاده ..... ۶۲
- شکل ۳-۹. مقایسه کلی کرنش‌ها در سه راستا ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰. مقایسه کرنش‌ها در عمق میانی مدل در سه راستا ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۱. مسیرهای بررسی فرضیه کرنش صفحه‌ای ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۲. نسبت کرنش‌های سه راستا برای نقاط مسیر شماره ۱ ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۳. نسبت کرنش‌های سه راستا برای نقاط مسیر شماره ۲ ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۴. نسبت کرنش‌های سه راستا برای نقاط مسیر شماره ۳ ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۵. نمایی از مدل دو بعدی یک دنده به همراه بارگذاری و شرایط مرزی در تحلیل استاتیکی اجزاء محدود ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۶. تنش اصلی بیشینه ریشه دنده بر حسب تغییر تعداد المان با شرایط بارگذاری ثابت ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۷. نمایی از مدل مورد استفاده به همراه مش به کار رفته در آن ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۸. مدل مش‌بندی شده ریشه یک دنده دو بعدی ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۹. مجموع خطاهای المانی موجود در مدل یک دنده ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۰. زاویه بین راستای تقارن دنده و مماس بر منحنی ریشه دنده ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۱. کانتور تنش اصلی بیشینه و تنش موثر فون‌مایز در دنده تحت بار  $800 \text{ (N/mm)}$  ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۲. پروفیل تنش اصلی بیشینه در ریشه یک دنده منفرد تحت بار استاتیکی وارد بر دایره گام بر حسب زاویه بین راستای تقارن دنده و مماس بر منحنی ریشه دنده به ازای بارگذاری‌های متفاوت ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۳. تغییر تنش اصلی بیشینه در نقطه بحرانی ریشه دنده بر حسب بار وارد بر دایره گام آن ..... ۷۲

- شکل ۳-۲۴. عمر جوانه‌زنی ترک خستگی با استفاده از مدل مورو بر حسب زاویه مماس بر ریشه دنده در بارگذاری‌های متفاوت ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۵. نقطه گذار کم‌چرخه به پرچرخه در عمر خستگی ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۶. رابطه میان عمر گذار و سختی در فولادها [۳۶] ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۷. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل فیندلی با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۷۶
- شکل ۳-۲۸. ضریب پرداخت سطحی بر حسب زبری سطح و تنش حد نهایی [۳۶] ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۹. نمودار شماتیک بارگذاری بر روی سطح جانبی دنده ..... ۷۸
- شکل ۳-۳۰. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل مورو بهبود یافته (تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک) با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۷۹
- شکل ۳-۳۱. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل مورو بهبود یافته (تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک و پلاستیک) با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۸۰
- شکل ۳-۳۲. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل SWT با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۸۱
- شکل ۳-۳۳. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل براون-میلر با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۸۲
- شکل ۳-۳۴. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل کافین-مانسون با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۸۳
- شکل ۳-۳۵. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک و عمر کل مدل مورالیدهاران-مانسون با نتایج تجربی برای چرخ‌دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۸۴
- شکل ۳-۳۶. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی مدل مورو بهبود یافته (تأثیر تنش میانگین در عمر کرنش الاستیک) برای چرخ‌دنده تحت خمش دو‌طرفه ..... ۸۵
- شکل ۳-۳۷. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی مدل SWT برای چرخ‌دنده تحت خمش دو‌طرفه ..... ۸۶
- شکل ۳-۳۸. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی مدل کافین-مانسون برای چرخ‌دنده تحت خمش دو‌طرفه ..... ۸۷

- شکل ۴-۱. معادل‌سازی دو دنده در حال تماس با دو استوانه ..... ۸۹
- شکل ۴-۲. شبیه‌سازی دو دنده در حال تماس با کمک دو استوانه ..... ۹۰
- شکل ۴-۳. مدل مش‌بندی شده دو نیم استوانه در حال تماس ..... ۹۱
- شکل ۴-۴. المان‌های مورد استفاده در نزدیکی سطح تماس ..... ۹۱
- شکل ۴-۵. همگرایی تنش تماسی با تغییر تعداد المان ..... ۹۲
- شکل ۴-۶. مقایسه تنش‌های عمودی و برشی زیر مرکز تماس ( $x=0$ ) براساس تئوری هرتز و تحلیل عددی ..... ۹۴
- شکل ۴-۷. مقایسه بیشینه فشار تماسی در سطح تماس دو استوانه با استفاده از تئوری هرتز و تحلیل عددی ..... ۹۵
- شکل ۴-۸. مقایسه توزیع تنش تماسی در سطح تماس دو استوانه براساس تئوری هرتز و تحلیل عددی ..... ۹۵
- شکل ۴-۹. توزیع تنش برشی بدون بعد ( $\tau_{xy} / P_{max}$ ) بر حسب طول سطح تماس بدون بعد ( $t/b$ ) در عمق‌های بدون بعد ناحیه تماس ( $y/b$ ) ..... ۹۶
- شکل ۴-۱۰. توزیع تنش اصلی بیشینه بدون بعد ( $\sigma_1 / P_{max}$ ) بر حسب طول سطح تماس بدون بعد ( $t/b$ ) در عمق‌های متفاوت و بدون بعد ناحیه تماس ( $y/b$ ) ..... ۹۷
- شکل ۴-۱۱. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی تحت بار تماسی براساس مدل مورو بهبود یافته ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۲. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی تحت بار تماسی براساس مدل کافین-مانسون ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۳. تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی تحت بار تماسی براساس مدل SWT ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۴. شماتیک دو چرخ‌دنده در حال تماس ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵. تأثیر شعاع انحناء موثر بر توزیع تنش برشی روی سطح تماس دو استوانه ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۶. تأثیر تغییر شعاع موثر در ( $a$ ) تنش برشی بیشینه ( $b$ ) محل تنش برشی بیشینه ( $c$ ) تنش اصلی بیشینه در محل تنش برشی بیشینه ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۷. تأثیر تغییر شعاع انحناء موثر  $R^*$  روی توزیع تنش اصلی بیشینه سطح تماس دو استوانه ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۸. تأثیر ضریب اصطکاک بر توزیع مقدار تنش اصلی بیشینه در سطح تماس دو دنده ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۹. توزیع تنش برشی در سطح تماس دو دنده با ضرایب اصطکاک متفاوت ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۰. کانتور تنش برشی  $S_{12}$  برای ضرایب متفاوت اصطکاک ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۱. تأثیر ضریب اصطکاک بر توزیع تنش برشی در زیر سطح تماس ..... ۱۰۹

- شکل ۴-۲۲. تأثیر ضریب اصطکاک بر توزیع مقدار تنش اصلی بیشینه در زیر سطح تماس ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱. مقایسه تخمین عمر کل ترک خستگی تحت بار خمشی یک‌طرفه با نتایج تجربی ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۲. نمودار عمر-عمر جهت مقایسه میان عمر تخمینی و تجربی ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳. قدر مطلق اختلاف عمر تخمینی مدل‌های خستگی و نتایج تجربی بر حسب تنش اصلی بیشینه ریشه دنده تحت خمش یک‌طرفه ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۴. تغییرات "نسبت عمر تخمین زده شده به عمر تجربی" (به کمک انواع مدل‌های خستگی) ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۵. اختلاف عمر میانگین بین مدل‌های خستگی و نتایج تجربی برای انواع مدل‌های خستگی ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۶. نسبت عمر تخمینی به عمر تجربی میانگین برای انواع مدل‌های خستگی ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۷. مقایسه عمر جوانه‌زنی ترک خستگی دو ناحیه ریشه دنده و سطح جانبی دنده با استفاده از انواع مدل‌های خستگی ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۸. نسبت عمر جوانه‌زنی ترک خستگی تماسی به خمشی برای بارگذاری‌های متفاوت ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۹. مقایسه تخمین عمر جوانه‌زنی ترک خستگی ریشه دنده تحت بار خمشی یک‌طرفه و دوطرفه ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۰. درصد کاهش عمر جوانه‌زنی ترک خستگی تحت بار دوطرفه نسبت به بار یک‌طرفه ..... ۱۲۱



## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱. عمر جوانه‌زنی ترک خستگی خمشی با استفاده از مدل مورو برای ضخامت‌های زه، عملیات‌ها و پرداخت سطحی متفاوت [۲۰].....	۲۸
جدول ۲-۱. مقایسه عمر کچلی سطح دنده در دو چرخ‌دنده استاندارد و بهبود یافته [۲۴].....	۳۱
جدول ۳-۱. خصوصیات هندسی و ثوابت خستگی چرخ‌دنده مورد بررسی.....	۳۵
جدول ۱-۳. خصوصیات هندسی المان بکار رفته در مدل دو بعدی.....	۶۹
جدول ۲-۳. مقدار بار وارده به ازای عمق واحد (N/mm).....	۷۰
جدول ۳-۳. پارامتر آسیب‌فیندلی بر حسب بار اعمالی (N/mm) به سطح جانبی دنده.....	۷۶
جدول ۴-۳. تنش اصلی بیشینه ریشه دنده برای انواع بارگذاری، تحت بار خمشی یک‌طرفه.....	۷۸
جدول ۵-۳. پارامتر آسیب مدل براون-میلر در بارگذاری خمشی یک‌طرفه.....	۸۱
جدول ۶-۳. تنش اصلی بیشینه ریشه دنده برای انواع بارگذاری، تحت بار خمشی دو‌طرفه.....	۸۵
جدول ۱-۴. خصوصیات المان‌های مورد استفاده در نزدیکی سطح تماس.....	۹۱
جدول ۲-۴. نصف طول سطح تماس و بیشینه فشار تماسی در سطح تماس دو دنده به ازای بارگذاری‌های متفاوت براساس تئوری هرترز.....	۹۳
جدول ۳-۴. مقدار تنش اصلی بیشینه به ازای بارگذاری‌های متفاوت.....	۹۴
جدول ۴-۴. تنش برشی بیشینه و قدر مطلق تنش اصلی بیشینه متناظر با آن به ازای بارگذاری‌های متفاوت.....	۹۸
جدول ۵-۴. بازه تغییرات شعاع موثر بر حسب (mm) در کل سطح جانبی دنده.....	۱۰۳
جدول ۶-۴. تأثیر ضریب اصطکاک بر بیشینه و کمینه تنش برشی و عمق آن‌ها.....	۱۰۹
جدول ۷-۴. تأثیر ضریب اصطکاک بر عمر خستگی تماسی.....	۱۱۰

انواع از کارافتادگی مکانیکی

مراحل بروز شکست خستگی

جنبه‌های ریز/درشت ساختاری خستگی فلزات

مکانیزم‌ها و خصوصیات ریزساختاری در پدیده خستگی

مکانیزم‌های تخریب در پدیده خستگی

پروفیل گستران در چرخ‌دنده‌ها

تئوری هرتز

پارامترهای نوع حرکت چرخ‌دنده

تغییرات بار تماسی در طول یک سیکل کاری چرخ‌دنده ساده

چرخ‌دنده‌های هرزگرد

مروری بر ادبیات موضوع

تعریف مساله

## ۱.۱ انواع ازکارافتادگی مکانیکی

انواع موده‌های از کار افتادگی مکانیکی محتمل فلزات بصورت زیر می‌باشد:

- ✓ تغییر شکل بیش از اندازه؛ الاستیک، تسلیم و یا شروع تغییر شکل پلاستیک
- ✓ شکست نرم؛ تغییر شکل پلاستیک قابل توجه و جذب زیاد انرژی
- ✓ شکست ترد؛ تغییر شکل پلاستیک کم و جذب انرژی محدود
- ✓ ضربه یا بارگذاری دینامیکی؛ تغییر شکل بیش از اندازه یا شکست
- ✓ خزش<sup>۱</sup>؛ تغییر شکل بیش از اندازه یا شکست
- ✓ رها سازی<sup>۲</sup>؛ ضایعات ناشی از تنش پسماند یا بار خارجی
- ✓ شوک حرارتی؛ ترک دار شدن و/یا شکست
- ✓ سایش<sup>۳</sup>؛ مکانیزم‌های زیاد از کار افتادگی
- ✓ خمش؛ الاستیک یا پلاستیک
- ✓ خوردگی شیمیایی<sup>۴</sup>، تردی ناشی از هیدروژن، پرتوافکنی نوترونی<sup>۵</sup>
- ✓ ترک برداشتن ناشی از خوردگی تنشی<sup>۶</sup> (ترک دار شدن ناشی از محیط)
- ✓ جنبه‌های ظاهری و از شکل افتادگی (زیبایی شناختی)<sup>۷</sup>
- ✓ خستگی؛ بارگذاری تکرارشونده
- جوانه‌زنی ترک خستگی

<sup>1</sup> Creep

<sup>2</sup> Relaxation

<sup>3</sup> Wear

<sup>4</sup> Corrosion

<sup>۵</sup> این موارد شامل موده‌های از کار افتادگی مکانیکی نمی‌باشند اما اغلب اثر متقابلی با جنبه‌های مکانیکی دارند.

<sup>6</sup> Stress Corrosion Cracking

<sup>۷</sup> این مورد شامل موده‌های از کار افتادگی مکانیکی نمی‌باشد اما اغلب اثر متقابلی با جنبه‌های مکانیکی دارد.

- رشد ترک خستگی
- بازه بارگذاری ثابت یا متغیر
- بارگذاری تک محوره/چند محوره
- خستگی ناشی از خوردگی
- خستگی سایشی<sup>۱</sup>
- خستگی خزشی
- ❖ دما ثابت
- ❖ مکانیکی-حرارتی
- ترکیب تمامی حالات از کارافتادگی خستگی

با توجه به آخرین نوع از کارافتادگی‌های مکانیکی فوق می‌توان گفت که حداقل نیمی از کارافتادگی‌های مکانیکی ناشی از خستگی می‌باشند. درصد دقیقی که بیانگر میزان از کارافتادگی خستگی باشد در دست نیست اما تقریباً ۵۰ تا ۹۰ درصد کلیه واماندگی‌های مکانیکی ناشی از خستگی می‌باشند [۱].

## ۲.۱ مراحل بروز شکست خستگی

در بسیاری از آزمایش‌های منحنی تنش-کرنش یک ماده، بارگذاری بصورت شبه استاتیکی می‌باشد. در بارگذاری استاتیکی واماندگی قطعه ناشی از ازدیاد بار می‌باشد و بارگذاری تنها یکبار اتفاق می‌افتد. اغلب بارگذاری‌های واقعی بصورت استاتیکی می‌باشند. اما در حالتی که بار بصورت دینامیکی به ماده وارد شود<sup>۲</sup> امکان از کارافتادگی خستگی در سازه وجود خواهد داشت. از کارافتادگی خستگی، ظاهری مانند شکست ترد دارد که در آن سطح شکست صاف و عمود بر محور تنش بوده و پدیده گلوبی شدن<sup>۳</sup> در قطعه رخ نمی‌دهد. اما خصیصه‌های شکست خستگی با شکست ترد در بارگذاری استاتیکی کاملاً متفاوت است.

شکست خستگی شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از:

<sup>۱</sup> Fretting Fatigue

<sup>۲</sup> در بارگذاری دینامیکی بار بصورت متغیر با زمان به ماده وارد می‌شود (بار بین سطوح مختلفی نوسان کند).

<sup>۳</sup> Necking