بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تاثیر اصلاح سر دندانه بر رفتار ارتعاشی چرخدنده‌های مخروطی

مؤلف:
حبیب اله مطهر

استاد راهنما:
دکتر فرهاد شیخ سامانی

استاد مشاور:
دکتر محمد علی حاج عباسی

دی ماه ۱۳۹۳

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی-شود.

دانشجو : حبیب اله مطهر

استاد راهنما : دکتر فرهاد شیخ سامانی

استاد مشاور : دکتر محمد علی حاج عباسی

داور ۱ : دکتر

داور ۲ : دکتر

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مرتضی زند رحیمی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

مادرم...

مـادر! درســتـایش دنیای پرمهرت، ترانه‌ای از اخلاص خواهم سـرود وگلدسـته‌ای از مهر برگردنت خواهم آویخت. شکوه عشق را در زمزمـه‌هـای مـادرانـه‌ات می‌یـابم وانگیزه خلقـت را از قلـب پرمهرت می‌خوانم. مادر! بوسـه بر دستان خسته تو جانم را زنده می‌کند و دیدار تو عشـق را در دلم به ارمغان می‌آورد. ایمانم از دعای توسـت وخدایم را از زبـان تو شـــناخته‌ام، عبادت را تو به من آموخته‌ای. مادر! ای الهه مهر، تو گلی خوشـبو از بهشت خدایی که گلخانه دلم از عطر تو سرشار است، از تبار فاطمه‌ای وگویی وجود تو را با مهر فاطمه ســرشــته‌اند پس همیشــه دعایم کن چرا که دعایت سرمایه فردای من است.

... مادر! به پاس آنچه به من داده‌ای،

به ستایش محبت‌های بی‌اندازه‌ات،

و به وسعت همه خوبی‌هایت

دوستت دارم...

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم از زحمات اســـتاد گرانقدر دکتر فرهاد شـــیخ ســـامانی در طول انجام پایانامه تشکر و قدردانی نمایم چرا که همواره در طول این مسیر مشوق و معلم من بوده‌اند و در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند.

همچنین از اســـتاد مشـــاور پایانامه جناب دکتر محمد علی حاج عباســـی به خاطر قبول این زحمت تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از دوستانم خوبم آقایان هادی دشتکی‌پور، مرتضـی فقیه، علی شهابی و امین غرقی که در طی این دوره مرا یاری نمودند و بهترین خاطرات را برایم رقم زدند، کمال تشـکر و قدردانی را دارم و امیدوارم در تمام مراحل زندگی موفق و سربلند باشند.

چکیده:

چرخدنده‌های مخروطی از جمله پرکاربردترین چرخدنده‌ها هستند که بروز ارتعاش و صدا در آنها اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مهمترین عوامل بروز ارتعاش در چرخدنده‌ها نوسان خطای انتقال استاتیک است. در این پژوهش با تمرکز بر این عامل سعی شده است که تاثیر این عامل تا حد ممکن کاهش یابد. چرخدنده به کمک روشی تقریبی به نام تردگولد مدل می‌شود. این روش می‌تواند دندانه‌ی جایگزین برای چرخدنده‌ی مخروطی دندانه مستقیم تولید نماید. سپس به کمک کد Helical Pair چرخدنده‌های ساده‌ی جایگزین ساخته شده و در نرم‌افزار مارک مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصل خطای انتقال استاتیک را شامل می‌شوند. سپس از ابزار بهینه‌سازی کد استفاده می‌شود تا با تغییر اصلاح سر و ریشه‌ی دندانه بتوان مقدار مطلوب کمترین تفاضل میان بیشینه و کمینه‌ی خطای انتقال استاتیک را بدست آورد. نتایج حاصل از این بخش در تحلیل رفتار دینامیک چرخدنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل مشابه دیگری بر مبنای کمینه نمودن مقدار دامنه پاسخ‌های زمانی چرخدنده مخروطی دندانه مستقیم مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج بخوبی نشان می‌دهد که در مدل اول با وجود کمتر بودن نوسان خطای انتقال استاتیک نسبت به مدل دوم، رفتار دینامیکی مدل دوم بهتر است. همچنین در تحلیل رفتار دینامیکی چرخدنده مطلوب به بررسی پدیده پرش، انشعاب و تحلیل نیرویی مدل‌های بدون اصلاح دندانه، اصلاح شده‌ی مدل اول و اصلاح شده‌ی مدل دوم پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: چرخدنده مخروطی دندانه مستقیم[۱]، خطای انتقال استاتیک[۲]، اصلاح سر و ریشه دندانه[۳]، انشعاب[۴]، رفتار دینامیکی[۵]، بهینه‌سازی[۶]

---

۱ Straight bevel gear

۲ Static transmission error

۳ Tip and root relief

۴ Bifurcation

۵ Dynamic behavior

۶ Optimization

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

فهرست جداول..... ی
فهرست شکل‌ها..... ک

۱- فصل اول ۱

۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده ۲
۱-۳ بیان مسئله و هدف از انجام پژوهش ۴
۱-۴ معرفی فصول پایان نامه ۵

۲- فصل دوم ۶

۲-۱ چرخدنده مخروطی ۷
۲-۲ چرخدنده های مخروطی مارپیچ ۷
۲-۳ چرخدنده مخروطی دندانه مستقیم ۸
۲-۴ روابط حاکم برچرخدنده های مخروطی ۹
۲-۵ منحنی اینولوت ۱۱
۲-۶ چرخدنده مخروطی دندانه مستقیم ۱۳
۲-۷ نسبت تماس ۱۶
۲-۸ دندانه ۱۶
۲-۸-۱ مدل عمق استاندارد ۱۷
۲-۸-۲ عمق یکنواخت ۱۸
۲-۸-۳ شیب مضاعف ریشه ۱۸
۲-۸-۴ ضخامت دندانه چرخدنده مخروطی ساده ۱۹
۲-۹ تحلیل نیرویی ۲۰

۲-۱۰ جابجایی دندانه ۲۲
۲-۱۱ لقی محیطی ۲۴

۳- فصل سوم ۲۷

۳-۱ مقدمه ۲۸
۳-۲ خطای انتقال ۲۸
۳-۳ خطای انتقال استاتیک ۲۹
۳-۴ خطای انتقال سینماتیکی ۲۹
۳-۵ خطای انتقال دینامیکی ۲۹
۳-۶ اندازه گیری خطای انتقال ۳۰
۳-۷ محاسبه خطای انتقال ۳۱
۳-۸ اصلاح پروفیل دندانه ۳۲
۳-۸-۱ اصلاح به صورت خطی ۳۳
۳-۸-۲ اصلاح به صورت منحنی(سهمی) ۳۳
۳-۸-۳ اصلاح ترکیبی(خطی- سهموی) ۳۴

۴- فصل ۴ ..... ۳۶

۴-۱ مقدمه ۳۷
۴-۲ مدل‌سازی چرخدنده مخروطی ۳۷
۴-۳ بهینه‌سازی استاتیک ۴۵
۴-۴ اصلاح دینامیک ۴۹

۵- فصل ۵ ..... ۵۳

۵-۱ مقدمه ۵۴
۵-۲ مدل دینامیکی ۵۴
۵-۳ استفاده از مدل همراه با تقریب تردگولد ۵۵

۵-۴ اعتبار سنجی حلگر دینامیک ۶۱
۵-۵ ارزیابی فرض اساسی ۶۳
۵-۶ رفتار دینامیکی در سرعت کم ۶۴
۵-۷ ارزیابی بهینه سازی ۶۵
۵-۸ بررسی رفتار دو شاخگی ۷۱
۵-۹ تحلیل نیروی دینامیکی ۷۵

۶- فصل شش ۸۱
نتیجه گیری و پیشنهادات **..... ۸۱**

۶-۱ جمعبندی نتایج ۸۲
۶-۲ پیشنهادات ۸۴

۷- پیوست ۸۵

۱- طیف دامنه یا طیف توان ۸۵
۲- مربع متوسط ریشه ۸۶
۳- نرم افزار مارک ۸۷
۴- الگوریتم ژنتیک ۸۸

منابع ۹۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مشخصات و روابط حاکم بر چرخدنده‌ی مخروطی استاندارد[۲۱]..... ۱۵

جدول ۴-۱: مشخصات هندسی چرخدنده مخروطی ساده..... ۳۹

جدول ۴-۲: مشخصات چرخدنده‌های ساده معادل..... ۴۰

جدول ۴-۳: نتایج عددی حاصل برای دامنه و قطر برداشت سر و ریشه در حالت اصلاح استاتیک. ۴۸

جدول ۴-۴: مشخصات هندسی بدست آمده از اصلاح پروفیل دندانه به صورت دینامیک..... ۵۰

جدول ۴-۵ : مقایسه مقادیر متوسط سری فوریه گسسته خطای انتقال دینامیک برای سه قطاع. ۵۱

جدول ۴-۶: تفاضل ماکزیمم و مینیمم خطای انتقال استاتیک برای سه مدل..... ۵۲

جدول ۵-۱: مشخصات هندسی چرخدنده آزمایش شده توسط[۳۶]..... ۶۲

جدول ۵-۲ : درصد انحراف خطای انتقال دینامیک نسبت قطاع وسط..... ۶۴

جدول ۵-۳: درصد تغییرات خطای دینامیک مربوط به شکل ۵-۱۰..... ۶۹

جدول ۵-۴ : درصد تاثیر اصلاح پروفیل دندانه در حالت اصلاح دینامیک ۷۰

جدول ۵-۵ :مقایسه ضریب گشتاور دینامیکی مش برای سه مدل در نسبت فرکانسی ۱/۰۰۷. ..... ۸۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ :چرخدنده مخروطی مارپیچ..... ۸
شکل ۲-۲: مقایسه چرخدنده‌های مخروطی الف) مخروطی ساده ب) مخروطی مارپیچ ج) مخروطی با زاویه صفر..... ۸
شکل ۲-۳ :چرخدنده مخروطی ساده. ۹
شکل ۲-۴ : مخروط‌های مماس در چرخدنده‌های مخروطی..... ۹
شکل ۲-۵: نمایش مشخصات دندانه..... ۱۱
شکل ۲-۶: رسم منحنی اینولوت..... ۱۲
شکل ۲-۷ : مشخصات هندسی برای بدست آوردن مختصات منحنی اینولوت..... ۱۲
شکل ۲-۸: جایگزین کردن چرخدنده مخروطی ساده با چرخدنده ساده..... ۱۴
شکل ۲-۹: مشخصات توصیفی دندانه‌ی چرخدنده‌ی مخروطی ساده ۱۷
شکل ۲-۱۰: مدل چرخدنده مخروطی ساده، عمق استاندارد ۱۸
شکل ۲-۱۱: مدل چرخدنده مخروطی ساده، عمق ثابت..... ۱۸
شکل ۲-۱۲: مدل چرخدنده مخروطی ساده، شیب مضاعف ریشه..... ۱۹
شکل ۲-۱۳: نیروها روی چرخدنده مخروطی ساده ۲۰
شکل ۲-۱۴: بردار نیروهای وارد بر سطح دندانه چرخدنده مخروطی ساده ۲۱
شکل ۲-۱۵: جابجایی دندانه در امتداد نیروی نرمال سطح..... ۲۳
شکل ۲-۱۶: نمای بک‌لش میان دندانه‌ها..... ۲۵
شکل ۲-۱۷: ارتباط لقی و فاصله‌ی مرکزی چرخدنده‌ها..... ۲۶
شکل ۳-۱: نمونه‌ای از دستگاه اندازه‌گیری خطای انتقال دینامیک..... ۳۰
شکل ۳-۲: شماتیک دستگاه اندازه گیری خطای انتقال..... ۳۰
شکل ۳-۳: نمایش اصلاح پروفیل به صورت خطی و سهموی..... ۳۴
شکل ۳-۴: چهار پارامتر اساسی در اصلاح پروفیل دندانه..... ۳۵
شکل ۴-۱: انطباق چرخدنده ساده مجازی بر چرخدنده مخروطی دندانه مستقیم..... ۳۷

شکل ۴-۲: چگونگی انطباق تولید چرخدنده ساده‌ی مجازی..... ۳۸
شکل ۴-۳ : مقایسه جابجایی محیطی برای سه مقطع در حالت بدون اصلاح پروفیل..... ۴۰
شکل ۴-۴: چرخدنده‌ی میانی، تماس در گام یک، پنج، نه، پانزده..... ۴۱
شکل ۴-۵ : نمایش خطای انتقال صلب نسبت به پروفیل اینولوت تئوری..... ۴۲
شکل ۴-۶: مقایسه خطای انتقال استاتیک خطی سه چرخدنده‌ی ساده..... ۴۳
شکل ۴-۷ : سختی خطی سه قطاع در محدوده درگیری دندانه‌ها..... ۴۵
شکل ۴-۸ : محدوده انتخاب در الگوریتم برای اصلاح سر و اصلاح ریشه..... ۴۶
شکل ۴-۹: خطای انتقال استاتیک محیطی بعد از اصلاح استاتیک..... ۴۸
شکل ۴-۱۰: مقایسه‌ی خطای انتقال صلب محیطی برای سه جفت چرخدنده..... ۴۹
شکل ۴-۱۱: رفتار خطای انتقال استاتیک زاویه‌ای برای مدل اصلاح شده‌ی دینامیک..... ۵۱
شکل ۴-۱۲: انحراف از حالت اینولوت تئوریک، قطاع سوم..... ۵۲
شکل ۵-۱: نمای ساده از برش دو چرخدنده مخروطی..... ۵۴
شکل ۵-۲: نمایش سه بعدی از تعامل پینیون و چرخدنده..... ۵۵
شکل ۵-۳: تابع تکه‌ای جابجایی زاویه‌ای..... ۵۸
شکل ۵-۴: شماتیک لقی زاویه‌ای بک‌لش..... ۵۸
شکل ۵-۵: سختی سه جفت چرخدنده ساده معادل بدون اصلاح..... ۵۹
شکل ۵-۶: بزرگنمایی خطای انتقال صلب..... ۶۰
شکل ۵-۷: نمودار فاز به منظور اعتبار سنجی کد متلب با کد فرترن..... ۶۱
شکل ۵-۸: مقایسه نتایج تجربی [۴] و نتایج عددی برای چرخدنده نمونه..... ۶۳
شکل ۵-۹ : مقایسه نتایج تحلیل دینامیک سه قطاع چرخدنده..... ۶۴
شکل ۵-۱۰ : منحنی پاسخ نسبت به زمان بی‌بعد در نسبت فرکانسی ۰/۰۰۱..... ۶۵
شکل ۵-۱۱: نمودار میانگین مربعات ریشه خطای انتقال دینامیک..... ۶۷
شکل ۵-۱۲: نمودار پاسخ فرکانسی الف)سیستم خطی. ب)سیستم نرم شونده ج)سیستم سخت شونده..... ۶۸
شکل ۵-۱۳: ضرایب هارمونیک کسینوسی تابع سختی در حالت بدون اصلاح دندانه و اصلاح استاتیک..... ۶۹
شکل ۵-۱۴:پدیده‌ی انشعاب در حالت بدون اصلاح دندانه- الف) در حرکت پسرو ب)حرکت پیشرو..... ۷۲

شکل ۵-۱۵: الف) نمودار طیف دامنه فوریه ب)پاسخ زمانی خطای انتقال دینامیک ۷۳
شکل ۵-۱۶: نمودار انشعاب برای مدل اصلاح شده‌ی استاتیک، حرکت پسرو ۷۴
شکل ۵-۱۷: نمودار انشعاب برای مدل اصلاح شده‌ی دینامیک، حرکت پسرو..... ۷۵
شکل ۵-۱۸: شروع و پایان ناحیه‌ی از دست دادن تماس..... ۷۶
شکل ۵-۱۹: رفتار گشتاور ذخیره مش، بدون اصلاح در نسبت فرکانسی ۱/۰۰۷..... ۷۷
شـکل ۵-۲۰ : رفتار گشـتاور مش در طول پریودهای آخر در نسـبت فرکانسـی ۰/۶۵۴۸، مدل بدون اصلاح دندانه..... ۷۸
شکل ۵-۲۱: گشتاورذخیره مش برای حالت اصلاح استاتیک دندانه. نسبت فرکانس ۱/۰۰۷..... ۷۹
شکل ۵-۲۲: گشتاورذخیره مش برای حالت اصلاح دینامیک دندانه. نسبت فرکانس ۱/۰۰۷..... ۷۹
شکل ۷-۱: مثالی از طیف انرژی و نمودار فاز..... ۸۶
شکل ۷-۲: روند حل مساله در الگوریتم ژنتیک..... ۸۸

فهرست علایم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری
مدول	m
گام قطری	p
شعاع دایره ادندوم	r_a
شعاع دایره دیدندم	r_f
قطر دایره گام	d
ادندوم	h_a
ضریب پواسون	ν
مدول الاستسیته	E
خطای انتقال	TE
زاویه شروع اصلاح سر دندانه	ε_t
زاویه شروع اصلاح پای دندانه	ε_r
قطر شروع برداشت سر	$d_{re.t}$
قطر برداشت از ریشه	$d_{re.r}$
خطای انتقال استاتیک	STE
خطای انتقال الاستیک	ESTE
خطای انتقال صلب	RSTE
گشتاور بدون بعد معادل	$\overline{T}_g$
ممان اینرسی معادل چرخدنده	I_{eq}
جابجایی زاویه‌ای پینیون	θ_1
جابجایی زاویه‌ای چرخدنده	θ_2
گشتاور ورودی در پینیون	T_1
گشتاور مقاوم در چرخدنده	T_2
میرایی ویسکوز معادل	C_m
خطای انتقال صلب زاویه‌ای	e_θ

سختی معادل برای جفت‌های درگیر	k_m
خطای انتقال دینامیک زاویه‌ای	λ_θ
تابع جابجایی ذخیره فنر	f
لقی زاویه‌ای	θ_b

۱-فصل اول

مقدمه، مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱ مقدمه

زمانی که نیاز به انتقال قدرت میان شافت‌های غیر موازی باشد از چرخدنده‌های مخروطی استفاده می‌شود. چرخدنده‌های مخروطی کاربرد زیادی در سیستم‌های انتقال قدرت نظیر دیفرانسیل خودرو و گیربکس بالگردها دارند لذا شناخت و بهبود عملکرد این نوع چرخدنده اهمیت ویژه‌ای دارد. بر همین اساس تحقیقات زیادی در زمینه‌ی طراحی و بهینه‌سازی این نوع چرخدنده انجام پذیرفته است.

۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

مانند سایر چرخدنده‌ها وجود صدا و ارتعاش در حین کارکرد از مواردی است که همواره توجه محققین و صنعت‌گران را در جهت حل این مساله به خود جلب نموده است. تانسنت و همکاران [۱] با انجام آزمایشات تجربی به بررسی تاثیر اصلاح سر دندانه بر بهبود عملکرد چرخدنده‌ها پرداخته‌اند. توکلی و هویزر [۲] در تحقیقی جامع و به کمک برنامه کامپیوتری خود میزان سختی و خطای انتقال چرخدنده ساده را بدست آوردند. ایشان با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مقادیر مناسب و بهینه را برای اصلاح پروفیل دندانه پیشنهاد نمودند. سیانگ لین و همکاران [۳] در پژوهشی به بررسی تاثیر نیروهای دینامیکی وارد بر چرخدنده ساده پرداخته و با اصلاح پروفیل دندانه به صورت خطی و سهموی توانستند میزان تغییرات خطا در انتقال را در نمونه‌ی مورد بررسی کاهش دهند.کهرمان و بلنکنشیپ [۴] درآزمایشات تجربی، با در نظر گرفتن چند حالت اصلاح سر دندانه به بررسی تاثیر تغییرات گشتاور بر پاسخ‌های دینامیکی چرخدنده‌های ساده پرداختند. سنتوکو [۵] به تاثیرتغییر الاستسیته شافت بر تغییرات خطا در انتقال در چرخدنده‌های مخروطی دندانه مستقیم پرداخت و نتایج حاصل را با حالت بدون در نظر گرفتن این تاثیر مقایسه نمود. بنوری[۶] با کمک الگوریتم ژنتیک سعی در بدست آوردن روشی کلی برای اصلاح پروفیل دندانه کردند و در نتیجه مقادیر بهینه‌ای برای اصلاح سر و ریشه دندانه ارائه نموده‌اند. فاجیونی و همکاران [۷] روش بهینه‌سازی جامعی بر مبنای کاهش ارتعاشات چرخدنده به کمک اصلاح پروفیل دندانه بر روی چرخدنده ساده ارائه نمودند. ایشان با تقسیم گشتاور نامی به سه قسمت متفاوت و اصلاح سر و ریشه دندانه مقدار مناسب اصلاح دندانه و گشتاور بهینه را اندازه‌گیری نمودند. ریگور[۸] در رساله‌ی دکترای خود روشی بهینه برای طراحی پروفیل دندانه با در نظر گرفتن کاستن خطای انتقال استاتیک به عنوان مرجع ارتعاش سیستم پرداخت. در زمنیه‌ی چرخدنده‌های مخروطی هم آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های تئوری زیادی انجام گرفته است. تراوچی و همکاران [۹] با

طراحی و ساخت دستگاه تست چرخدنده مخروطی ساده، سعی در بدست آوردن نیروهای دینامیکی در ریشه دندانه و تحلیل میزان خمش دندانه داشتند. اودا و همکاران [۱۰، ۱۱، ۱۲] در گزارش‌هایی پیوسته به جستجوی تنش‌های ریشه، مقاومت خستگی و نیروهای دینامیکی در چرخدنده‌ی مخروطی ساده به کمک ابزارهای تجربی پرداختند. همچنین ساتو و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر نسبت تماس و اصلاح پروفیل دندانه بر چرخدنده مخروطی پرداختند. تحقیقات تئوریک نیز به دنبال تحقیقات تجربی کم و بیش در این زمینه انجام پذیرفته است. نالوتین [۱۴] در تحقیقی مدل المان محدود یک دندانه چرخدنده‌ی مخروطی را ایجاد نموده و به بررسی میزان تنش در ریشه در نقاط مختلف پرداخته است. وی همچنین نتایج تئوریک خود را با نتایج تجربی سایر پژوهش‌ها مقایسه نموده است. الخولی و همکاران [۱۵] به کمک تقریب تردگولد[۱] و با کمک نتایج تحلیلی به بررسی تغییر نیروها و تنش‌ها در عرض دندانه چرخدنده مخروطی ساده پرداخته و نتایج خود را با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه نموده‌اند. مارمبدو [۱۶] در پژوهشی به کمک نرم افزارهای برنامه نویسی محیطی گرافیکی فراهم نموده که به وسیله‌ی آن می‌توان چرخدنده مخروطی ساده را طراحی نمود. این برنامه با کد معروف کلیکس در ارتباط است و می‌تواند در تحلیل اجزای محدود کمک نماید. توزیع تنش، توزیع نیرو روی دندانه و خطای انتقال استاتیک از جمله نتایج بدست آمده از این پژوهش است.

بررسی تئوریک دینامیک این چرخدنده را می‌توان با تحلیل‌های صورت گرفته توسط کری و همکاران [۱۷] معرفی نمود. ایشان مدلی از چرخدنده‌های مخروطی ساده را ایجاد نموده و با تخمین تابع سختی متناوب برای آن، رفتار دینامیک این نوع چرخدنده را در حالت سالم و حالت معیوب تجزیه تحلیل نمودند. تشابه نسبی این نوع چرخدنده با چرخدنده مخروطی مارپیچ نیز نتایج قابل توجهی بوجود آورده‌اند که در تحلیل چرخدنده مخروطی ساده کمک شایانی می‌کنند. چانگ‌ژیان [۱۸] در مقاله‌ای مدلی هفت درجه آزادی برای ارتعاش چرخدنده‌ی مخروطی مارپیچ ارائه نمود و با حل عددی معادلات بدست آمده نتایج تحلیل ارتعاشی متفاوتی را نظیر اغتشاش در چرخدنده ارائه نمود. یی‌نونگ و همکاران [۱۹] همچنین مدل دینامیکی چرخدنده مخروطی مارپیچ را با درجات آزادی مختلف شامل جابجایی شافت‌ها، خمش و پیچش دندانه ارائه نمودند. بهرامی و همکاران [۲۰] با تقسیم دندانه چرخدنده مخروطی ساده به چندین چرخدنده ساده به بررسی تنش‌های هرتز در عرض دندانه پرداخته و نتایج خود را با نتایج نرم‌افزار المان محدود مقایسه

[۱] Tredgold Approximation

کرده‌اند.

۱-۳ بیان مسئله و هدف از انجام پژوهش

در این پژوهش با نگرش شناسایی و بهینه‌سازی ابتدا چرخدنده مخروطی و ویژگی‌های هندسی آن مورد شناسایی قرار می‌گیرد. از آنجایی که امکانات موجود بیشتر در زمینه‌ی چرخدنده‌های ساده طراحی و استفاده شده است، بایستی تغییراتی در ابزارهای طراحی و تحلیل موجود اعمال می‌شد. به همین منظور با استفاده از تقریب تردگولد که عموماً در طراحی چرخدنده‌های مخروطی دندانه مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل چرخدنده مخروطی تقریب زده می‌شود. در واقع با یک تشابه‌سازی از چرخدنده‌ی مخروطی، چند چرخدنده‌ی ساده بدست می‌آید که در ادامه‌ی کار کمک شایانی می‌نمایند.

یکی از پارامترهای اساسی در بهبود عملکرد چرخدنده‌ها کاهش ارتعاش و صدا در سیستم‌های چرخدنده‌ای است. نوساناتی که در سختی و خطای انتقال استاتیک وجود دارد یکی از دلایل بروز ارتعاش و صدا شناخته شده است.

مدل چرخدنده‌ی مخروطی دندانه مستقیم انتخاب و سپس به کمک تقریب انجام شده به چرخدنده‌های ساده مورد نظر تقسیم می‌شود. برای بدست آوردن تغییرات سختی و خطای انتقال استاتیک آن از نرم افزار المان محدود مارک (پیوست ۳) استفاده می‌شود. خروجی تابع متغیر سختی است که از آن در تحلیل دینامیک چرخدنده استفاده می‌شود. برای بهبود رفتار ارتعاشی چرخدنده بایستی میزان اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع خطای استاتیک به حداقل ممکن برسد. این کار با اصلاح سر و ریشه دندانه قابل انجام است. به همین منظور از کد بهینه‌ساز که از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کند برای دستیابی به مناسب‌ترین پاسخ استفاده می‌شود. تابع بهینه ساز مقادیر مناسب اصلاح سر و ریشه را به عنوان خروجی نشان می‌دهد. به کمک نرم‌افزار مارک تابع سختی وخطای انتقال استاتیک برای مدل‌های بهینه محاسبه می‌شود. برای بررسی تاثیر این اصلاحات بر ارتعاش چرخدنده مدل دینامیکی آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد که تاثیر اصلاح دندانه بر ارتعاش چرخدنده بررسی شود.

۱-۴ معرفی فصول پایان نامه

فصـــل دوم بـه معرفی چرخدنده مخروطی و پارامترهای اســاســـی در طراحی فیزیکی آن می‌پردازد. لزوم شـناخت و استفاده صحیح از این پارامترها و روابط می‌تواند درک بهتری از این نوع چرخدنده را بوجود آورد.

فصل سوم متشکل از توصیف المان‌هایی نظیر انواع خطای انتقال و چگونگی محاسبه‌ی آن‌ها و همچنین ابزارهای آزمایشگاهی است. انواع اصلاح پروفیل دندانه معرفی شده و بررسی می‌شود.

در فصل چهارم به مدل‌سازی چرخدنده‌ی مخروطی و استفاده از روشی تقریبی برای تعمیم آن به مدل‌های سـاده پرداخته شـده اسـت. سـپس مدل‌های مورد نظر مورد ارزیابی بهینه‌ی اسـتاتیک قرار گرفته و نتایج آن تا این مرحله مورد ســنجش قرار می‌گیرد. روشـــی ابتکاری برای ارزیابی نوع دیگری از بهینه سـازی با تابع هدفی متفاوت قسـمت پایانی این فصـل خواهد بود. در این روش تابع هدف تغییر نموده و به کمک شبیه‌ساز دینامیکی تابع هدف جدیدی ارزیابی می‌شود.

فصل پنجم نتایج بدست آمده برای اصلاح دندانه را در پاسخ‌های دینامیک بررسی می کند. سـه مدل بدون اصـلاح دندانه، مدل اصلاح استاتیک و مدل اصلاح دینامیک در این فصل مورد نظر قرار می‌گیرند.

فصـل شـشـم به جمعبندی از نتایج و ارائه پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی اختصاص داده شده است.