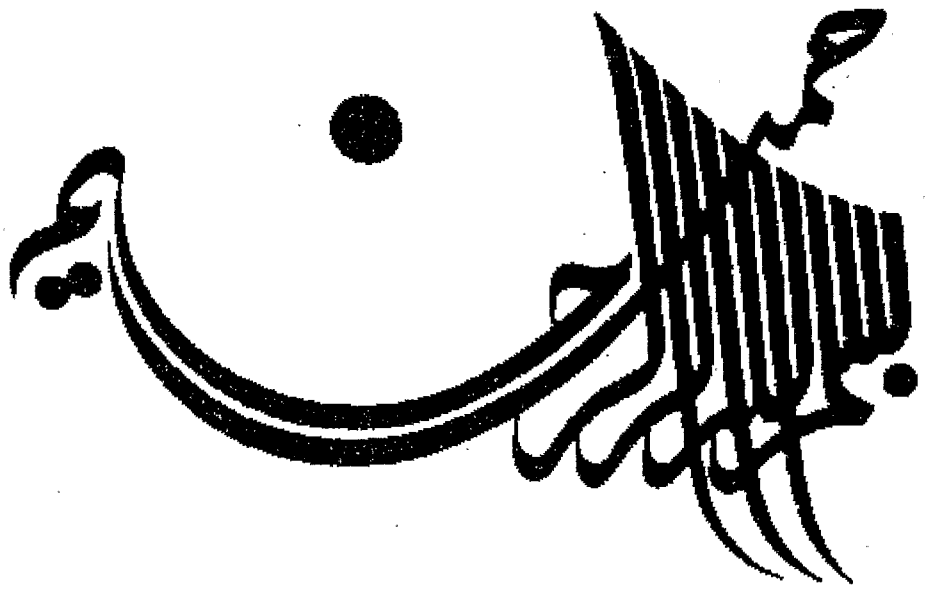

١٠٢٠١٨

۸۷/۱۱/۱۰۱۴۵۹
۸۷/۱۰/۱۰

دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

عنوان

مدل‌سازی ریاضی جعبه‌دنده در دو حالت سالم و دارای برخی عیوب و مقایسه نتایج با جعبه‌دنده واقعی

۱۳۸۷/۱۰/۰۵

استاد راهنما

دکتر مرتضی همایون صادقی

استاد مشاور

دکتر موسی رضائی

دانشجو

بهرنگ حسینی اقدم

شهریور ۱۳۸۷

۱۰۲۵۱۵

شایسته می‌دانم از استاد ارجمندم آقای دکتر مرتضی همایون صادقی که دانش همراه با اخلاق نیکوی ایشان همواره سبب دلگرمی و افزوده شدن بینش من در درک مفاهیم علمی شده است قدردانی نمایم.

از استاد گرانقدر و صبورم آقای دکتر موسی رضائی که روحیه کنجکاوی و موشکافی و پشتکار ایشان انگیزه مرا دوچندان نموده است، بسیار سپاسگزارم.

به تلاش استاد بزرگوارم آقای دکتر محمّد زهساز که کردار، منش خوب و راهنمائی ایشان موجب دلگرمی من در پژوهش علمی گردیده است، ارج می‌نهم.

از دوستان عزیزم سلمان، عزیز، وحید و مصطفی که همراه شفیقم در طول تحصیل و انجام پایان نامه بوده‌اند، تشکر می‌کنم.

تقدیم به

مادرم نمونه بی نظیر مهربانی، صبر و دوست داشتن

پدرم پشتوانه و الگوی من در جستجوی حقیقت

نام خانوادگی دانشجو: حسینی اقدم نام: بهرنگ
عنوان پایان‌نامه: مدل‌سازی ریاضی جعبه‌دنده در دو حالت سالم و دارای بعضی عیوب و مقایسه نتایج با جعبه‌دنده واقعی
استاد راهنما: دکترمرتضی صادقی استاد مشاور: دکترموسی رضائی
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: تبریز دانشکده: فنی مهندسی مکانیک تاریخ فارغ‌التحصیلی: شهریور۸۷ تعداد صفحه:۱۴۵
کلید واژه‌ها: عیب‌یابی سیستم‌های چرخدنده‌ای، خطاهای چرخدنده‌ای، عیوب چرخدنده‌ای ، مدل‌سازی دینامیکی
چکیده: چرخدنده‌ها یکی از مهم‌ترین قطعات در بسیاری از ماشین‌آلات پیشرفته می‌باشند و عیب‌یابی سیستم‌های چرخدنده‌ای به عنوان یک تحقیق مهم و کاربردی همواره مورد توجه محققین و صنایع مختلف بوده است. عیب‌یابی قبل از شکست، می‌تواند از هزینه‌های تعمیر و نگهداری تا حد زیادی بکاهد. روش‌های مختلفی برای عیب‌یابی سیستم‌های چرخدنده‌ای(جعبه دنده‌ها) وجود دارد که یکی از آن‌ها روش عیب‌یابی ارتعاشی است. از مدل‌سازی دینامیکی ارتعاشات چرخدنده می‌توان به عنوان یک ابزار مفید برای افزایش آگاهی‌مان از مکانیزم‌های تولید ارتعاش در جعبه‌دنده‌ها و نیز بررسی رفتار دینامیکی جعبه‌دنده در حضور برخی از انواع عیوب چرخدنده‌ای،/استفاده کرد. در این روش مدل ریاضی ارتعاشات سیستم چرخدنده‌ای در دو حالت سالم و معیوب ایجاد می‌شود. سپس پاسخ دینامیکی مدل شبیه‌سازی شده با پاسخ سیستم واقعی مقایسه می‌گردد. هر قدر پاسخ دینامیکی مدل ارائه شده به رفتار دینامیکی سیستم واقعی نزدیک‌تر باشد، مدل دارای قابلیت بیش‌تری در روند عیب‌یابی خواهد بود. در این پایان‌نامه پس از بررسی مفهومی مدل‌های دینامیکی به کار برده شده توسط محققین مختلف، مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. مدل دینامیکی، شش درجه آزادی غیر خطی است و از دو چرخدنده ساده، یک جفت یاتاقان، دو شفت، و دو اینرسی که محرک اولیه و بار را نشان

می‌دهند، تشکیل می‌شود. در این مدل اثرات سفتی و میرایی درگیری متغیر با زمان، لقی، تحریک در اثر خطای چرخدنده‌ها و اصلاحات پروفیل در نظر گرفته شده است. همچنین اثرات خطای خروج از مرکز، خطای پروفیل و عیوب کندگی سطح دندانه و ترک ریشه دندانه به مدل دینامیکی اضافه می‌شود و سیستم چرخدنده‌ای معیوب شبیه‌سازی می‌گردد. در این پایان‌نامه روش تقریبی جدیدی برای به دست آوردن سفتی درگیری دندانه ترک‌دار ایجاد شد. این روش دارای دقت بسیار خوبی است و با استفاده از آن می‌توان سفتی درگیری دندانه را که دارای ترک در هر مقطعی بر روی پروفیل دندانه است، محاسبه نمود. هم‌چنین روش ماتریسی در شبیه‌سازی کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفت. مزیت این روش آن است که می‌توان عیوب مختلف چرخدنده‌ای مانند ترک، کندگی سطحی، سائیدگی و گودی سطح یک یا چند دندانه و دندانه شکسته را به آسانی مدل‌سازی نمود. برای ارتعاشات سیستم چرخدنده‌ای در حالت پایا، دستگاه معادلات غیرخطی به سه دستگاه خطی تبدیل می‌شود. پاسخ دینامیکی سیستم چرخدنده‌ای با حل دستگاه معادلات با روش خطی به دست آمد. زمان حل دستگاه معادلات در روش خطی بسیار کمتر از روش غیرخطی است که توسط اکثر محققین مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت پاسخ دینامیکی به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از تست تجربی و نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه می‌شود و درستی مدل ارائه شده اثبات می‌گردد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی به دست آمده از شبیه‌سازی کامپیوتری از لحاظ کمّی و کیفی شباهت زیادی به رفتار دینامیکی سیستم واقعی دارد، بنابراین می‌توان از این مدل دینامیکی به عنوان جایگزین مناسبی برای سیستم واقعی در فرایند عیب‌یابی استفاده کرد.

فهرست مطالب

بخش اوّل- مقدمه و بررسی منابع

۱-مقدمه ۲

۱-۱ عیب‌یابی سیستمهای چرخدندهای و نقش مدل‌سازی در عیبیابی این سیستمها ۲

۱-۲ تاریخچهٔ مدل‌سازی سیستم‌های چرخدنده‌ای ۳

بخش دوّم- مبانی وروش‌ها

۲- سیستمهای چرخدندهای ۱۱

۲-۱ خطاهای چرخدنده‌ای ۱۱

۲-۱-۱ خطاهای انفرادی ۱۱

۲-۱-۲ خطاهای ترکیبی ۱۲

۲-۲ عیوب چرخدنده ای و دلایل آن ۱۳

۲-۳ نویز در سیستمهای چرخدندهای ۱۵

۲-۴ نظریه اساسی خطای انتقال ۱۶

۲-۵ زیر برش و روش های جلوگیری از آن ۱۹

۲-۶ لقی در چرخدنده‌های ساده ۲۱

۲-۷ تصحیح پروفیل دندانهٔ چرخدنده‌های ساده ۲۳

۲-۸ چرخدنده های هلیکال ۳۰

۲-۹ نحوهٔ درگیری دندانه‌ها در چرخدنده‌های هلیکال ۳۱

۳- ایجاد مدل ریاضی ۳۲

۳-۱ مدل دینامیکی ۶ درجه آزادی غیرخطی ۳۲

۳-۱-۱ معادلات حاکم بر سیستم در حالت سالم ۳۳

۳-۱-۲ سفتی درگیری ۳۵

۳-۲ مدل سازی سیستم دینامیکی در حالت معیوب ۴۶

۳-۲-۱ مدل سازی خروج از مرکز چرخدنده‌ها ۴۷

۳-۲-۲ مدل سازی کندگی سطحی دندانه ۴۸

۳-۲-۳ مدل سازی خطای پروفیل دندانه ۵۱

۳-۲-۴ مدل سازی ترک دندانه ۵۵

۳-۳ حل دستگاه معادلات غیر خطی ۶۳

۳-۳-۱ تعیین مقادیر اولیه متغیرها ۷۰

بخش سوَم- نتایج و بحث

۴- بحث بر روی نتایج ۷۸

بخش چهارم- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵- نتیجه گیری ۱۰۴
۵-۱ خلاصه ۱۰۴
۵-۲ پیشنهاد برای کارهای آینده ۱۰۶

بخش پنجم- منابع

منابع ۱۰۹

ضمیمه

برنامه کامپیوتری و توضیحات مربوطه

فهرست جداول

جدول **شماره صفحه**

جدول ۴-۱ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی کامپیوتری ۷۸

جدول ۴-۲ مقادیر مربوط به ابعاد کندگی سطح در شبیه‌سازی کامپیوتری ۷۸

جدول ۴-۳ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی کامپیوتری ۸۲

جدول ۴-۴ مقادیر مربوط به ابعاد ترک ریشه دندانه در شبیه‌سازی کامپیوتری ۸۳

جدول ۴-۵ خطا و عیوب در شبیه‌سازی کامپیوتری ۸۳

فهرست شکل‌ها

شکل	صفحه
شکل ۲-۱ Tip relief دندانهٔ چرخندهٔ ساده	۲۰
شکل۲-۲ Tip relief, Root relief برای دندانهٔ چرخندهٔ ساده	۲۱
شکل۲-۳ لقی در چرخنده ساده	۲۳
شکل ۲-۴ تداخل در چرخنده‌های ساده	۲۵
شکل ۲-۵ Undercut در چرخنده‌های ساده	۲۶
شکل ۲-۶ نحوه تصحیح پروفیل چرخنده	۲۷
شکل۲-۷ شکل دندانه در حالت معمولی و برای ضریب تصحیح مثبت	۲۹
شکل۲-۸ تأثیر تصحیح پروفیل بر روی شکل دندانه	۳۰
شکل۲-۹ ایده شکل گیری چرخنده هلیکال	۳۱
شکل۲-۱۰ نحوه درگیری چرخنده‌های هلیکال	۳۲
شکل ۳-۱ مدل ۶ درجه آزادی غیرخطی	۳۴
شکل۳-۲ دو جفت دندانه در حین درگیری	۳۶
شکل ۳-۳ پروفیل اینولوت دندانه یک چرخندهٔ ساده	۳۹
شکل ۳-۴ هندسهٔ درگیری دو چرخندهٔ ساده	۴۱
شکل۳-۵ چگونگی درگیری دندانه‌ها	۴۱
شکل ۳-۶ مراحل درگیری دندانه‌ها و تعداد جفت دندانه‌های درگیر	۴۳
شکل ۳-۷ سفتی درگیری برای ضریب تصحیح مثبت	۴۵

شکل ۳-۸ سفتی درگیری، ضریب تصحیح صفر ۴۶

شکل ۳-۹ سفتی درگیری، ضریب تصحیح منفی ۴۶

شکل۳-۱۰ خروج از مرکز چرخدنده ۴۷

شکل ۳-۱۱ پالس سینوسی متناوب میرا ۴۸

شکل ۳-۱۲ نقاط مختلف درگیری دو چرخدنده ۵۰

شکل ۳-۱۳ تابع سفتی برای چرخدنده‌ها ۵۲

شکل ۳-۱۵ معادل‌سازی ترک در تیر با مقطع مستطیلی ۵۶

شکل ۳-۱۶ دندانه چرخدنده سالم ۵۷

شکل۳-۱۷ ترک روی پروفیل در فاصلهٔ شعاعی r ۵۹

شکل۳-۱۸ مدل‌سازی ترک ریشه دندانه ۵۹

شکل۳-۱۹ نحوهٔ اعمال تغییرات سفتی برای لحاظ کردن ترک ۶۰

شکل ۳-۲۰ نتایج حاصل از روش المان محدود برای سفتی درگیری دندانه ترک‌دار ۶۱

شکل ۴-۱ شکل شماتیک سیستم چرخدنده‌ای ۷۸

شکل ۴-۲ مقایسه شتاب با نتایج موجود در ادبیات فن، حالت سالم ۸۰

شکل ۴-۳ مقایسه شتاب با نتایج موجود در ادبیات فن، شماره عیب ۲, ۸۱

شکل۴-۴ مقایسه شتاب با نتایج موجود در ادبیات فن، شماره عیب ۸۲

شکل ۴-۵ شتاب نقطه گامی پینیون، حالت سالم ۸۴

شکل ۴-۵ شتاب نقطه گامی پینیون، حالت سالم ۸۵

شکل ۴-۶ شتاب نقطه گامی پینیون، دارای خطا ۸۶

شکل ۴-۷ شتاب نقطه گامی پینیون، حالت معیوب ۸۶

شکل ۴-۸ شتاب نقطه گامی چرخدنده، حالت سالم ۸۷

شکل ۴-۹ شتاب نقطه گامی چرخدنده، دارای خطا ۸۷
شکل ۴-۱۰ شتاب نقطه گامی چرخدنده، دارای خطا ۸۸
شکل ۴- ۱۱ شتاب یاتاقان پینییون، حالت سالم ۸۹
شکل ۴- ۱۲ شتاب یاتاقان پینیون، دارای خطا ۹۰
شکل ۴- ۱۳ شتاب یاتاقان پینیون اندازه‌گیری شده، دارای خطا ۹۰
شکل ۴- ۱۴ شتاب یاتاقان پینیون، دارای خطا ۹۱
شکل ۴- ۱۵ شتاب یاتاقان پینیون اندازه‌گیری شده، دارای خطا ۹۱
شکل ۴- ۱۶ شتاب یاتاقان پینیون، حالت معیوب ۹۲
شکل ۴- ۱۷ شتاب یاتاقان پینیون اندازه‌گیری شده، معیوب ۹۲
شکل ۴- ۱۸ شتاب یاتاقان چرخدنده، حالت سالم ۹۳
شکل ۴- ۱۹ شتاب یاتاقان چرخدنده،دارای خطا ۹۴
شکل ۴- ۲۰ شتاب یاتاقان چرخدنده، حالت سالم ۹۴
شکل ۴-۲۱ شتاب یاتاقان پینیون و جزئیات آن، حالت سالم ۹۵
شکل ۴-۲۲ شتاب یاتاقان پینیون، دارای خطا ۹۶
شکل ۴-۲۳ شتاب یاتاقان پینیون اندازه‌گیری شده، دارای خطا ۹۶
شکل ۴-۲۴ خطای انتقال، حالت سالم ۹۷
شکل ۴-۲۵ خطای انتقال، دارای خطا ۹۸
شکل ۴-۲۶ خطای انتقال، حالت معیوب ۹۸
شکل ۴-۲۷ نیروی درگیری دندانه، حالت سالم ۹۹
شکل ۴-۲۸ نیروی درگیری دندانه، دارای خطا ۱۰۰
شکل ۴-۲۹ نیروی درگیری دندانه، معیوب ۱۰۰
شکل ۴-۳۰ Spectrum شتاب اندازه‌گیری شده یاتاقان پینیون، حالت معیوب ۱۰۲
شکل ۴-۳۱ Spectrum شتاب یاتاقان پینیون، حالت معیوب ۱۰۲

فهرست علائم

علائم مورد استفاده	شماره صفحه
a پارامتر تابع خطای پروفیل	۵۱
a عمق ترک	۵۵
b عرض تیر	۵۵
b پهنای عیب در جهت پروفیل دندانه	۴۹
C_1 و C_2 ضرایب میرایی ویسکوز یاتاقان‌های پینیون و چرخدنده	۳۴
c_b, c_a میرایی درگیری جفت دندانه اول و دوم	۵۱
C_m میرایی درگیری دندانه‌ها	۳۴
c_{t1} و c_{t2} ضرایب میرایی ویسکوز پینیون و چرخدنده	۳۴
CR نسبت تماس	۴۴
d کسر زمانی درگیری دو جفت دندانه	۵۲
e مقدار ماکسیموم خطای پروفیل دندانه	۵۱
e_1 حداکثر مقدار خطای پروفیل در هر دورهٔ درگیری	۵۲
e_1 خروج از مرکز پینیون	۴۷
e_2 خروج از مرکز چرخدنده	۴۷
$E(a;e;q)$ مقدار تابع خطای پروفیل	۵۱
f پهنای عیب در جهت سطح دندانه	۵۱
f پهنای دندانه‌ی یک چرخدنده‌ی ساده	۳۷
f_f خطای پروفیل	۱۱
f_g خطای دایرهٔ مبنا	۱۲
f_{pb} خطای گامی مبنا	۱۲
f_{pt} خطای گامی مجاور	۱۲
f_r خروج از مرکز شعاعی	۱۲
f_s خطای ضخامت دندانه	۱۲
f_β خطای راستای دندانه	۱۲
F_0 نیروی درگیری دینامیکی	۳۷

F_{EC} نیروی ایجاد شده توسط خروج از مرکزیت	۵۱
F_{PE} نیروی تحریک در اثر خطای پروفیل	۵۳
h ارتفاع مقطع تیر	۵۵
i نسبت کاهش	۵۰
I ممان اینرسی	۵۷
I_D، I_1، I_2 ، I_L ممان اینرسی جرمی محرک اصلی، پینیون، چرخدنده و بار	۳۴
I_{e2} و I_{e1} اینرسی‌های معادل چرخدنده و یاتاقان	۳۷
j_n لقی نرمال	۲۱
j_t لقی محیطی	۲۱
k ارتفاع پالس ناشی از کندگی سطع دندانه	۴۹
k_1 و k_2 سفتی یاتاقان پینیون و چرخدنده	۳۴
k_a k_b سفتی‌های درگیری جفت دندانه‌ی اول و دوم در حال درگیری	۵۱
k_d فاکتور دینامیکی	۵۴
k_h سفتی هرتزین بر واحد پهنا	۳۵
$k_i(r)$ سفتی بر واحد عرض	۳۵
k_m سفتی درگیری متغیر با زمان	۳۴
k_{t1} و k_{t2} سفتی پیچشی شفت‌های پینیون و چرخدنده	۳۴
K_{CDT2} و K_{CDT1} سفتی درگیری دندانه ترک‌دار، دو جفت دندانه	۶۰
K_{CST} سفتی درگیری دندانه ترک‌دار، یک جفت دندانه	۶۰
$K_{ct}(r)$ سفتی دندانه ترک‌دار در فاصله شعاعی r	۵۸
$K_{ht}(r)$ سفتی دندانه سالم	۵۸
K_{DT} ، K_{ST} به ترتیب سفتی درگیری برای یک و دو جفت دندانه	۵۳
K_θ ضریب فنریت فنر پیچشی معادل ترک	۵۶
l_i یک مقدار تصادفی در خطای پروفیل	۵۱
m مدول چرخدنده	۳۵
m_1 و m_2 جرم پینیون و چرخدنده	۳۴
m_e جرم معادل اینرسی‌های پینیون و چرخدنده	۳۷

N_i تعداد دندانه‌های چرخدنده ۳۶

q ضریب تغییرات خطای پروفیل ۵۱

r فاصله‌ی شعاعی نقطه روی پروفیل دندانه از مرکز چرخدنده ۳۷

r_f شعاع دایرهٔ ریشه دندانه ۵۸

r_p شعاع دایرهٔ مبنا ۳۹

R نیز فاصله محل اعمال نیرو تا مقطع ترک‌دار ۵۸

R شعاع دایره‌ی گام ۳۵

R_1 و R_2 شعاع دایره‌ی مبنای پینیون و چرخدنده ۳۴

t_{DT} مدت زمان درگیری دو جفت دندانه ۴۵

t_{ST} مدت زمان درگیری یک جفت دندانه ۴۵

T دورهٔ درگیری ۴۵

T گشتاور ایجاد شده نسبت به مقطع دارای ترک دندانه ۵۷

T_D و T_L گشتاور محرک و بار ۳۴

v سرعت خطی در نطقهٔ گامی چرخدنده ۵۰

v_a سرعت نسبی در نقطه‌ی معیوب ۴۹

x ضریب تصحیح ادندوم چرخدنده ۲۷

x_i متغیرهای حالت ۷۱

X_i ضریب تصحیح ادندوم چرخدنده i ۳۵

y_1 و y_2 جابجایی خطی پینیون و چرخدنده ۳۴

z تعداد دندانه‌های چرخدنده ۴۶

z_1 تعداد دندانه‌های پینیون ۵۲

φ زاویه فشار چرخدنده	۲۵
α زاویه بین نقطه شروع و نقطه آنی تماس بر روی خط اثر	۳۸
θ زاویه‌ی چرخش شفت	۳۹
θ گام زاویه‌ای چرخدنده	۴۵
θ_D ، θ_1 ، θ_2 ، θ_L جابجایی زاویه‌ای محرک، پینیون، چرخدنده، و بار	۳۵
ζ نسبت میرایی	۵۰
ω_0 فرکانس پالس تولید شده	۵۰
δ_1 تغییر شکل خمشی دندانه سالم در فاصله شعاعی r	۵۸
δ_2 تغییر شکل دندانه ترک‌دار در اثر وجود فنر پیچشی K_θ	۵۸
β زاویه ترک دندانه با افق	۵۹
Δt پهنای پالس ایجاد شده توسط کندگی سطح دندانه	۵۰

بخش اول
مقدّمه و
بررسی منابع

در این بخش پیشینه‌ی پژوهش در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های چرخدنده‌ای، دلایل نیاز به انجام تحقیق در این زمینه و مواردی که نیاز به تحقیق بیشتری دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، اهداف و محدوده بررسی‌ها در این پایان‌نامه ذکر می‌گردد.

۱- مقدمه

در این بخش پیشینه‌ی پژوهش در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های چرخدنده‌ای، دلایل نیاز به انجام تحقیق در این زمینه و مواردی که نیاز به تحقیق بیشتری دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، اهداف و محدوده بررسی‌ها در این پایان‌نامه ذکر می‌گردد.

۱-۱ عیب‌یابی سیستم‌های چرخدنده‌ای و نقش مدل‌سازی در عیب‌یابی این سیستم‌ها

کاهش تولید، خرابی تجهیزات و گسترش ماشین‌آلات در صنعت موجب تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی عیب‌یابی (تشخیص عیب) شده است. اندازه‌گیری‌های دقیق و تکنیک‌های پردازش سیگنال که قادر به ردیابی عیوب جزئی و کوچک هستند، فهم نحوه‌ی ایجاد عیوب و تشخیص به هنگام عیوب در ماشین‌آلات می‌تواند پیشرفت قابل ملاحظه‌ای را در وضعیت اقتصادی کارخانجات ایجاد کند و هزینه‌های عملکرد و تعمیر و نگهداری را کاهش و ایمنی را افزایش دهد. از آن‌جایی که جعبه‌دنده در اکثریت قریب به اتفاق ماشین‌آلات صنعتی به کار رفته است و یکی از مهم‌ترین اجزا این ماشین‌آلات را تشکیل می‌دهد، عیب‌یابی جعبه‌دنده به عنوان یک تحقیق مهم و کاربردی همواره مورد علاقه‌ی بسیاری از صنایع بوده است. این صنایع می‌تواند شامل نیروگاه‌های برق، کارخانجات پتروشیمی، هلیکوپتر و خودرو باشد. عیب‌یابی به معنای شناسایی وضعیت جعبه‌دنده بر اساس نشانه-های عیب می‌باشد. عیب‌یابی نیاز به مهارت در تشخیص عیب با استفاده از نشانه‌ها دارد. ارتعاشات ایجاد شده بوسیله‌ی جعبه‌دنده‌ها دارای ساختار پیچیده‌ای است اما اطلاعات زیادی را در اختیار ما می‌گذارد و می‌توان گفت که ارتعاش، نشانه‌ای (سیگنالی) از وضعیت جعبه‌دنده است. به منظور عیب-یابی جعبه‌دنده ابتدا سیگنال‌های ارتعاشی جعبه‌دنده در وضعیت‌های مختلف دریافت می‌گردد سپس با استفاده از عملیات ریاضی معینی سیگنال‌ها پردازش می‌شوند و مورد تحلیل و بررسی قرار می-گیرند. در نهایت، روش خاصی برای یافتن عیب در جعبه‌دنده ارائه می‌گردد. در حال حاضر روش‌هایی

وجود دارند که با استفاده از آنها می‌توان تعدادی از عیوب را به وسیله‌ی سیگنال‌های جعبه‌دنده تشخیص داد. از مدل‌سازی دینامیکی ارتعاشات چرخدنده می‌توان برای افزایش آگاهی‌مان از مکانیزم-های تولید ارتعاش در جعبه‌دنده‌ها و نیز رفتار دینامیکی جعبه‌دنده در حضور برخی از انواع عیوب چرخدنده‌ای، استفاده کرد. یعنی عیوب را می‌توان با استفاده از یک سری المان‌های به خصوصی وارد مدل دینامیکی سیستم چرخدنده‌ای نمود و پاسخ دینامیکی سیستم را مورد بررسی قرار داد و از طریق مقایسه‌ی پاسخ سیستم شبیه‌سازی شده با سیستم واقعی که دارای چنین عیوبی است، روش-هایی را برای تشخیص بهتر عیب در سیستم چرخدنده‌ای ارائه نمود. بدین معنا که می‌توان سیگنال‌های به دست آمده از جعبه‌دنده واقعی را با نمونه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی آن به وسیله‌ی کامپیوتر مقایسه کرد و در صورت تطابق یا نزدیکی سیگنال‌ها به هم‌دیگر می‌توان از این مدل ریاضی برای بررسی‌های بیش‌تر و گسترده‌تر استفاده کرد. با داشتن مدل دینامیکی جعبه‌دنده، می‌توان قبل از طراحی جعبه‌دنده، پاسخ دینامیکی آن را با تغییر دادن پارامترهای مختلف سیستم بررسی کرد تا بهترین پاسخ را به دست آورد. بنابراین مدل‌سازی دینامیکی برای طراحی جعبه‌دنده نیز به کار می‌رود.

۱-۲ تاریخچهٔ مدل‌سازی سیستم‌های چرخدنده‌ای

مدل‌سازی دینامیکی ارتعاش چرخدنده‌ها ابزار مفیدی برای مطالعه‌ی پاسخ ارتعاشی سیستم چرخدنده‌ای تحت شرایط مختلف پارامترهای چرخدنده‌ای و شرایط کارکرد می‌باشد. اولین مدل‌های ارتعاشی برای دینامیک چرخدنده‌ای در دهه‌ی ۱۹۵۰ ارائه شد. هر چند که موضوع بارهای وارد شده به چرخدنده به قرن هجدم برمی‌گردد. یک بررسی مفهومی مدل‌های ریاضی که در دینامیک چرخدنده‌ای استفاده شده بوسیله‌ی اوزگون و هاوسر قبل از سال ۱۹۸۶ ارائه شده و انتشار یافته است [1]. در این بررسی، روی مدل‌های دینامیکی چرخدنده بدون عیوب، بحث شده است. این مدل‌ها را می‌توان در چند دسته، طبقه‌بندی نمود:

۱) مدل‌های فاکتور دینامیکی ساده

این مدل‌ها اغلب مطالعات اولیه‌ای را شامل می‌گردد که برای تعیین فاکتور دینـامیکی، کـه در فرمول ((تنش ریشه‌ی دندانه)) به کار می‌رود، انجام می‌شود.

۲) مدل‌هایی که شامل سفتی دندانه‌ها هستند.

در این مدل‌ها سفتی دندانه به عنوان تنها المان ذخیره کننده‌ی انـرژی پتانـسیل در سیـستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳) مدل‌های دینامیکی سیستم چرخدنده‌ای

این مدل‌ها اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند و می‌توانند شامل ارتعاش پیچـشی شـفت، سـفتی خمشی شفت، سفتی خمشی دندانده‌های چرخدنده، سفتی یاتاقان و ...، باشد.

مدل‌های یک و چند درجه آزادی زیادی برای بررسی دینامیک چرخدنده‌ای ارائه شده است. در اکثر مقالات، مدل به کار رفته دارای یک یا دو درجه آزادی است که در آن‌ها ارتعاشات پیچشی در نظر گرفته شده است. برای این مدل‌ها در حالات نسبتاً ساده می‌توان حل تحلیلی به دست آورد، که از مزایای این روش حل می‌توان به سرعت، دقت در محاسبهٔ پاسخ دینامیکی و ارزیابی معادلات سیستم‌های چرخدنده‌ای که دارای اثر غیرخطی از نوع لقی هستند، اشاره نمود. نمونه‌هایی از این روش حل را می‌توان در [2-4] پیدا کرد. اوزگون [5] یک مدل ۶ درجه آزادی غیرخطی نیمه-معین[1] با سفتی درگیری متغیر با زمان برای تحلیل دینامیکی چرخدنده‌های ساده ایجاد و اثر کوپلینگ ارتعاش پیچشی-عرضی را بر روی دینامیک چرخدنده‌ها مطالعه نمود. وی در مدل غیرخطی پیشنهادی خود که جزو مدل‌های چند درجه آزادی بدون عیب دندانه می‌باشد، چندین عامل مانند سفتی و میرایی درگیری متغیر با زمان، جدایی دندانه‌ها، لقی[2]، ضربه‌های یک و دو-طرفه[3]، خطاهای مختلف چرخدنده‌ها و اصلاح پروفیل را در نظر گرفت. نمونه‌هایی از مدل‌های چند درجه آزادی را می توان

[1] Semi definite
[1] Backlash
[2] Single and double-sided impact