بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دوره دکتری مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

تحلیل چاه غیرخطی انرژی برای کاهش غیرفعال ارتعاشات سامانه روتور

نام دانشجو:

سعید باب

استاد راهنما:

دکتر سیامک اسماعیل‌زاده خادم

آبان ۱۳۹۳

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سعید باب رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان تحلیل چاه غیر خطی انرژی برای کاهش غیر فعال ارتعاشات سامانه روتور** در تاریخ ۱۳۹۳/۸/۱۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر سیامك اسماعیل زاده خادم	استاد	
استاد ناظر	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا قضاوی خوراسگانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر فیروز بختیاری نژاد	استاد	
استاد ناظر	دکتر علی اصغر جعفری	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا قضاوی خوراسگانی	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب.....دانشجوی رشته..... ورودی سال تحصیلی.....

مقطع ..... دانشکده ..... متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....

تاریخ: .....

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال

در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار

خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و

مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب دانشجوی رشته مقطع

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دوره دکتری مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

تحلیل چاه غیرخطی انرژی برای کاهش غیرفعال ارتعاشات سامانه روتور

نام دانشجو:

سعید باب

استاد راهنما:

دکتر سیامک اسماعیل‌زاده خادم

آبان ۱۳۹۳

تقدیم

به روح پدربزرگم حاج محمود باب شهمیری

تشکر و قدردانی

با سپاس از عنایات خداوند که بار دیگر با لطف بیکرانش توانستم گامی هرچند کوچک در ادامه راه زندگی‌ام بردارم که بی تردید اگر لطفش نبود، سختی‌های راه ادامه آن را بس دشوار می‌نمود. در ابتدا بر خود لازم می‌دانم که از پدر و مادرم بخاطر حمایت‌های خالصانه و زحمات فراوان‌شان در طول زندگی‌ام، از همسرم بخاطر زحماتش و تحمل سختی‌ها و همچنین برادران و خواهرم تشکر و قدردانی کنم. از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر سیامک اسماعیل‌زاده خادم که در طول انجام این مطالعه پیوسته با صبر و حوصله فراوان مرا یاری نمودند،کمال تشکر و تقدیر را دارم. از دوستان خود بخصوص آقایان دکتر مجید شاهقلی، دکتر اصغر نجفی، مهندس مرتضی کارآموز، مهندس علی سلیمانی و خانم مهندس زهرا نیلی که در انجام این پروژه به بنده کمک کردند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این رساله برای اولین بار به بررسی کارائی چاه غیرخطی انرژی برای کاهش غیر فعال ارتعاشات سامانه روتور پرداخته شده است. منظور از سامانه روتور در اینجا بخش‌های متفاوت آن شامل بدنه روتور، پره و یاتاقان می‌باشد. بمنظور بررسی رفتار دینامیکی مجموعه، یک مدل پیچیده، کامل و غیرخطی برای سیستم روتوری در نظر گرفته شده است.

در بخش ابتدائی به بررسی دینامیک غیرخطی سیستم روتور و دیسک، با در نظر گرفتن اثرات پره پرداخته شده است. در واقع اثر دو حالت صلب و انعطاف‌پذیر بودن پره بر رفتار سیستم تعیین شده است. از روش همیلتون برای استخراج معادلات استفاده شده است و برای کاهش تعداد معادلات از تبدیل مختصات کلمن و مختلط استفاده شده است. برای انجام آنالیز تحلیلی در این بخش از روش اغتشاشی مرتبه چندگانه استفاده شده است. در انتها بصورت تحلیلی تعیین شده است که معیار در نظر گرفتن پره بصورت انعطاف‌پذیر، فاصله فرکانسی پره و روتور است.

در بخش بعدی اثر چاه غیرخطی انرژی روی کاهش ارتعاشات یک تیر چرخان به عنوان مدل ساده پره مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل تحلیلی از روش متوسط‌گیری مختلط استفاده شده است. رفتار سیستم با نصب جاذب در محل‌های متفاوت و رخداد انشعابات هاپ، زین اسبی و نیروی بحرانی برای رخداد نوسانات تخفیف یافته، مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین محدوده‌ای که پدیده نوسانات تخفیف یافته در سیستم رخ می‌دهد، معیار کارائی جاذب و طراحی بهینه آن بوده است. بر این اساس بهترین مکان و پارامترهای چاه غیرخطی انرژی بهینه بصورت تحلیلی تعیین شده است.

سپس با هدف کاهش دامنه ارتعاشات جانبی روتور به بررسی رفتار ارتعاشی روتوری که چاه‌های غیرخطی انرژی به آن متصل است، پرداخته شده است. معادلات سیستم با استفاده از روش همیلتون استخراج شده است و برای کاهش تعداد معادلات از تبدیل‌های مختصات مودال و مختلط استفاده شده است. استفاده از روش متوسط‌گیری مختلط، غیرممکن بوده است و از روش بدیع ترکیبی مرتبه چندگانه و توازن هارمونیک برای حل تحلیلی استفاده شده است. در این بخش نیز براساس معیار بیشترین محدوده رخداد پدیده نوسانات تخفیف یافته، چاه بهینه بصورت تحلیلی طراحی شده است.

در بخش بعدی کارائی چاه‌های غیرخطی انرژی نصب شده روی یاتاقان‌های ژورنال در کاهش ارتعاشات سیستم روتور- یاتاقان مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات سیستم در دو حالت با وجود چاه غیرخطی انرژی و بدون آن، با استفاده از روابط نیوتن استخراج شده است. برای مدل‌سازی لایه روغن از معادله رینولدز و فرض یاتاقان کوتاه استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، با هدف کاهش

جذر میانگین ارتعاشات روتور در محدوده سرعت کاری، پارامترهای چاه بهینه غیرخطی انرژی استخراج شده است. در فصل انتهائی به بررسی کارائی چاه‌های غیرخطی انرژی نصب شده روی دیسک و یاتاقان‌های ژورنال، در کاهش ارتعاشات مجموعه روتور پیوسته، دیسک و پره، با دو تکیه‌گاه یاتاقان ژورنال پرداخته شده است. در این قسمت نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، با هدف کاهش جذر میانگین ارتعاشات مجموعه در محدوده سرعت کاری، پارامترهای بهینه چاه‌های غیرخطی انرژی استخراج شده است. برای بررسی خواص ارتعاشی سیستم و تعیین خواص تناوبی، غیرتناوبی یا آشوبناک بودن، نمودارهای پاسخ زمانی، دیاگرام انشعاب، نگاشت پوانکاره، مدار دینامیکی و پاسخ فرکانسی ارتعاشات روتور، پره‌ها و یاتاقان استفاده شده است. با مقایسه بین پاسخ فرکانسی روتور با و بدون وجود چاه غیرخطی انرژی بهینه، کارائی بهینه آن مشخص شده است. در انتها پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده است.

کلید واژه:روتور، چاه انرژی غیرخطی، یاتاقان ژورنال، پاسخ مدوله قوی، تبدیل مختصات مودال، روش متوسط‌گیری مختلط و الگوریتم ژنتیک

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱- مقدمه ۱۷

۱-۱- مروری بر دینامیک روتور ۱۷

۱-۱-۱- تاریخچه ۱۷

۱-۱-۲- دینامیک روتور ۱۹

۱-۱-۲-۱- تقسیم بندی روتورها ۱۹

۱-۱-۲-۲- مدل‌سازی روتورها ۱۹

۱-۱-۲-۳- مدلسازی گسسته روتورها ۲۰

۱-۱-۲-۴- مدل‌سازی روتورها به‌صورت پیوسته ۲۰

۱-۱-۲-۵- نابالانسی روتورها ۲۰

۱-۱-۳- عوامل غیرخطی یک سیستم ۲۱

۱-۲- مروری بر مباحث چاه انرژی غیرخطی ۲۲

۱-۲-۱- مبانی و مکانیزم‌ها ۲۳

۱-۲-۲- دسته‌بندی چاه‌هایانرژی غیرخطی ۲۵

۱-۲-۲-۱- متصل به زمین و غیرمتصل به زمین ۲۵

۱-۲-۲-۲- یک درجه آزادی و چند درجه آزادی ۲۶

۱-۲-۲-۳- هموار و غیر هموار ۲۶

۱-۲-۲-۴- میرایی خطی و غیرخطی ۲۷

۱-۲-۳- رژیم نوسانات تخفیف یافته ۲۷

۱-۳- مروری بر مقالات و کارهای انجام شده ۲۹

۱-۴- موضوع و هدف رساله ۴۹

فصل ۲- بررسی دینامیک غیرخطی سیستم روتور- دیسک با توجه به اثر پره‌ها ۵۱

۲-۱- استخراج انرژی‌ها ۵۱

۲-۱-۱- انرژی جنبشی روتور ۵۱

۲-۱-۲- انرژی جنبشی دیسک ۵۵

۲-۱-۳- انرژی کرنشی شفت چرخان ۵۵

۲-۱-۴- انرژی جنبشی و پتانسیل تیرهای چرخان (پره‌ها) ۵۷

۲-۱-۵- میزان استهلاک در اجزای متفاوت ۵۸

۲-۲- اثر کوتاه‌شدگی روتور ۵۹

۲-۳- استخراج معادلات ۶۰

۲-۴- تبدیل مختصات ۶۲

۲-۵- بی بعد سازی معادلات ۶۳

۲-۶- اعمال روش گالرکین ۶۴

۲-۷- تحلیل قسمت‌های خطی معادلات ۶۵
۲-۸- روش مرتبه‌های چندگانه ۷۲
۲-۸-۱- اعمال روش مرتبه‌های چندگانه ۷۲
۲-۹- سیستم پره، دیسک و روتور با فرض پره صلب ۷۶
۲-۹-۱- استخراج معادلات با فرض صلب بودن پره‌ها ۷۶
۲-۹-۲- تحلیل پایداری و انشعاب سیستم ۷۸
۲-۱۰- حل عددی ۷۹
۲-۱۱- نتایج روش مرتبه چندگانه و نتایج عددی ۸۰
۲-۱۲- نتیجه‌گیری ۸۶

فصل ۳- آنالیز چاه غیرخطی انرژی روی تیر چرخان ۸۹
۳-۱- استخراج معادلات ۸۹
۳-۲- حل تحلیلی ۹۳
۳-۲-۱- تحلیل پایداری پاسخ‌ها و انشعابات ۹۳
۳-۲-۲- آنالیز رخداد پاسخ مدوله قوی(SMRs) ۹۹
۳-۳- حل عددی ۱۰۶
۳-۴- نتایج حل تحلیلی و نتایج عددی ۱۰۷
۳-۵- مقایسه جاذب غیرخطی بهینه با جاذب خطی بهینه ۱۲۶
۳-۶- نتیجه‌گیری ۱۲۹

فصل ۴- آنالیز چاه غیرخطی انرژی روی دیسک روتور ۱۳۲
۴-۱- استخراج معادلات ۱۳۲
۴-۲- تبدیل مختصات ۱۳۴
۴-۳- حل تحلیلی ۱۳۹
۴-۳-۱- مقدمه ۱۳۹
۴-۳-۲- روش ترکیبی مرتبه چندگانه و توازن هارمونیک برای تحلیل پایداری پاسخ‌ها و انشعابات ۱۴۱
۴-۳-۳- آنالیز رخداد پاسخ مدوله قوی(SMR) ۱۴۶
۴-۴- حل عددی ۱۵۱
۴-۵- نتایج حل تحلیلی و نتایج عددی ۱۵۱
۴-۶- نتیجه‌گیری ۱۶۳

فصل ۵- آنالیز چاه‌های غیرخطی انرژی روی یاتاقان‌های ژورنال سیستم روتور- یاتاقان ۱۶۶
۵-۱- استخراج معادلات ۱۶۶
۵-۱-۱- نیروی لایه روغن ۱۶۹
۵-۱-۲- بی‌بعد سازی معادلات ۱۷۰
۵-۲- حل عددی ۱۷۲
۵-۳- نتایج عددی سیستم روتور، یاتاقان ۱۷۲

۵-۴- بهینه‌سازی ۱۷۸
۵-۵- نتایج عددی سیستم روتور، یاتاقان و چاه غیرخطی انرژی بهینه ۱۸۲
۵-۶- نتیجه‌گیری ۱۸۸

فصل ۶- آنالیز چاه‌های غیرخطی انرژی روی یاتاقان‌های ژورنال و دیسک مجموعه روتور- دیسک- یاتاقان-پره ۱۸۹

۶-۱- مدل سیستم ۱۸۹
۶-۲- استخراج انرژی‌ها ۱۹۲
۶-۲-۱- انرژی جنبشی و پتانسیل چاه غیرخطی انرژی نصب شده روی دیسک ۱۹۲
۶-۲-۲- انرژی پتانسیل و جنبشی یاتاقان و چاه‌های غیرخطی انرژی نصب شده روی یاتاقان ۱۹۲
۶-۲-۳- نیروی لایه روغن ۱۹۳
۶-۲-۴- اثر کوتاه‌شدگی روتور ۱۹۴
۶-۲-۵- میزان استهلاک در اجزای متفاوت ۱۹۵
۶-۳- استخراج معادلات ۱۹۵
۶-۳-۱- تبدیل مختصات ۱۹۷
۶-۳-۲- شکل‌مدهای روتور بر روی تکیه‌گاه ۲۰۳
۶-۳-۳- بی‌بعدسازی ۲۰۵
۶-۳-۴- اعمال روش گالرکین ۲۰۷
۶-۳-۵- حل عددی ۲۰۸
۶-۴- نتایج عددی سیستم روتور، یاتاقان، دیسک و پره ۲۰۸
۶-۵- بهینه‌سازی ۲۱۵
۶-۶- نتیجه‌گیری ۲۲۹

فصل ۷- نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۳۱

۷-۱- نتیجه‌گیری ۲۳۱
۷-۱-۱- بررسی دینامیک غیرخطی سیستم روتور- دیسک با توجه به اثر پره‌ها ۲۳۱
۷-۱-۲- آنالیز چاه غیرخطی انرژی روی تیر چرخان ۲۳۲
۷-۱-۳- آنالیز چاه غیرخطی انرژی روی دیسک روتور ۲۳۳
۷-۱-۴- آنالیز چاه‌های غیرخطی انرژی روی یاتاقان‌های ژورنال سیستم روتور- یاتاقان ۲۳۴
۷-۱-۵- آنالیز چاه‌های غیرخطی انرژی روی یاتاقان‌های ژورنال و دیسک مجموعه روتور- دیسک- یاتاقان-پره ۲۳۴
۷-۲- پیشنهادات ۲۳۵

فهرست مراجع ۲۳۶

فهرست علائم

فنریت غیرخطی چاه غیرخطی انرژی روی یاتاقان	K_{nesbe}	سطح مقطع تیر چرخان	A
فنریت غیرخطی تکیه‌گاه یاتاقان	K_{nf}	دامنه مودال ارتعاشات روتور در مدل جفکات	$A(t_1,...)$
فنریت غیرخطی چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	K_{nnesd}	سطح مقطع پره	A'
انحنای شفت	k_1 , k_2 , k_3	دامنه مودال ارتعاشات مرتبه اول و دوم چاه غیرخطی انرژی روی دیسک در مدل جفکات	$B_1(t_1,...)$, $B_2(t_1,...)$
طول یاتاقان	L_{be}	فنریت غیرخطی چاه غیرخطی انرژی روی تیر چرخان	C
طول روتور	l	لقی یاتاقان	c
طول پره و تیر چرخان	l'	دمپینگ پره	c_{blade}
جرم بر واحد طول روتور	m	فنریت تکیه‌گاه روتور	c_f
جرم دیسک	m_{disk}	دمپینگ چاه‌های غیرخطی انرژی روی یاتاقان‌ها	c_{NESbe}
جرم چاه غیرخطی انرژی روی تیر چرخان	m_{nb}	دمپینگ چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	c_{nesd}
جرم چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	m_{nesd}	دمپینگ روتور	c_{rotor}
چگالی جرمی پره	m'	فنریت معادل پیچشی و جانبی روتور	D_{11}, D_{22} , D_{33}
تعداد پره‌ها	n_{bl}	فاصله محل نصب چاه غیرخطی انرژی از ریشه تیر	d
تعداد چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	n_{nd}	اندازه خروج از مرکزیت	e
فاز حرکت کند چاه غیرخطی انرژی نسبت به تیر چرخان	$N(\tau_1)$	خارج از مرکز لایه روغن	e_o
فنریت محوری روتور	N_{11}	دامنه تحریک خارجی روی تیر چرخان	F
مرتبه مقدار ε	$O(\varepsilon)$	ممان اینرسی قطبی جرمی روتور	I_1
مرکز هندسی یاتاقان و ژورنال	O_b, O_j	ممان اینرسی خمشی جرمی روتور	I_2, I_3
جابه‌جائی مد اول تیر چرخان	$q_1(\bar{t})$	ممان اینرسی خمشی جرمی دیسک	I_{disk}
جابه‌جائی تیر چرخان در محل نصب چاه غیرخطی انرژی	$q_1'(\bar{t})$	ممان اینرسی قطبی جرمی دیسک	J_{disk}
مختصات مختلط روتور	r	فنریت خطی تکیه‌گاه یاتاقان	K_{lf}
فاصله مقطع دلخواه تیر چرخان از مرکز دوران	r_b	فنریت خطی چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	K_{lnesd}

tامین مختصات مودال مجموعه چاه‌های غیرخطی انرژی روی محیط دیسک	u_t	شعاع دیسک	r_d
جابه‌جائی تیر چرخان	$v(r_b,t)$	شعاع داخلی تیر چرخان	r_i
جابه‌جائی جانبی روتوردر راستای Y	$v(x,t)$	شعاع خارجی تیر چرخان	r_o
انرژی پتانسیل شفت و پره‌ها	V_{Shaft}	جابه‌جائی qامین چاه غیرخطی انرژی روی دیسک	s_q
انرژی پتانسیل شفت و پره‌ها	V_{Blades}	انرژی جنبشی پره‌ها	T_{Blades}
جابه‌جائی جانبی روتور در راستای Z	$w(x,t)$	انرژی جنبشی دیسک	T_{disk}
موقعیت نصب دیسک روی روتور	x_d	انرژی جنبشی شفت ناشی از نابالانسی	T_{im}
جابه‌جائی یاتاقان در راستای Y	Y_{be}	انرژی جنبشی شفت	T_{Shaft}
جابه‌جائی چاه غیرخطی انرژی نصب شده روی یاتاقان در راستای Y	Y_{nesbe}	انرژی جنبشی چاه غیرخطی انرژی qام	$T_{(NESd)q}$
جابه‌جائی یاتاقان در راستای Z	Z_{be}	جابه‌جائی چاه غیرخطی انرژی روی تیر چرخان	$u(t)$
جابه‌جائی چاه غیرخطی انرژی نصب شده روی یاتاقان در راستای Z	Z_{nesbe}	جابه‌جائی محوری روتور	$u(x,t)$

فهرست علائم یونانی

ویسکوزیته دینامیکی لایه روغن	μ	کرنش در راستای محوری تار خنثی شفت	α
زاویه بین پره qام و اول	v_q	زاویه اویلر مربوط به روتور	$\beta(x,t)$
زاویه اویلر مربوط به روتور	$\theta(x,t)$	تابع دیراک	$\delta(x)$
پارامتر میزان	σ	پارامتر کوچک	ε
فاصله مقطع دلخواه پره از ریشه آن	ς	خارج از مرکز بدون بعد یاتاقان	$\varepsilon_o = e_o / c$
مرتبه‌های زمانی	$\tau_r = \varepsilon^r t,\ r = 0,1,...$	ارتعاشات پیچشی روتور	$\phi(x,t)$
دامنه تحریک خارجی روی تیر چرخان	ω	شکل مد jام تیر یکسر گیردار	$\phi_j(\bar{r})$
رزونانس مد اول تیر چرخان	ω_0	دامنه مودال مختلط حرکت کند چاه غیرخطی انرژی و تیر چرخان	$\phi_k(t),\ k = 1,2$
فرکانس‌های زاویه‌ای شفت	$\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3$	فاز خروج از مرکزیت در مدل جفکات روتور	φ
سرعت دورانی روتور	Ω	فاز حرکت کند چاه غیرخطی انرژی نسبت به تیر	$\gamma(\tau_1)$
زاویه اویلر مربوط به روتور	$\psi(x,t)$	دمپینگ چاه غیرخطی انرژی روی پره	λ
		دامنه ارتعاشات پره iام	Λ_i

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۵-۱: نتایج الگوریتم ژنتیک شامل درصد کاهش جذر میانگین مربع ارتعاشات روتور و دمپینگ و فنریت بهینه چاه‌های غیر خطی انرژی ۱۸۰
جدول ۶-۱: نتایج الگوریتم ژنتیک شامل درصد کاهش متوسط، جذر میانگین مربع ارتعاشات سیستم و دمپینگ و فنریت بهینه چاه‌های انرژی غیرخطی ۲۱۸

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱: یک نمونه روتور پیوسته[2] ۲۰
شکل ۱-۲: شماتیک انتقال هدفمند انرژی ۲۴
شکل ۱-۳: پیکربندی متصل به زمین و غیرمتصل به زمین برای چاه انرژی غیرخطی ۲۶
شکل ۱-۴: پیکربندی چاه انرژی (الف) هموار(ب) غیرهموار ۲۷
شکل ۱-۵: یک اسیلاتور تخفیف یافته شامل یک الاکلنگ با ذخیره‌گر آب در یک سمت و یک وزنه در سمت دیگر[6] ۲۸
شکل ۱-۶: مدل دمپر ضربه‌ای خود تنظیم شونده [16] ۳۱
شکل ۱-۷: مجموعه آزمایشگاهی و مدل محاسباتی پره-روتور کوپل شده [18] ۳۲
شکل ۱-۸: مدل پره - روتور انعطاف‌پذیر [21] ۳۴
شکل ۱-۹: مدل آزمایشگاهی روتور و جاذب آونگ گریز از مرکز متصل به آن [23] ۳۵
شکل ۱-۱۰: مدل دیسک و پره به همراه جاذب آونگ گریز از مرکز [24] ۳۶
شکل ۱-۱۱: مدل سیستم پره-روتور-یاتاقان [29] ۳۸
شکل ۱-۱۲: روتور انعطاف‌پذیر با یاتاقان‌های متخلخل تکیه‌گاه‌های غیرخطی [34] ۴۰
شکل ۱-۱۳: مدل سیستم روتور و یاتاقان و جاذب تیر یک سر گیردار [39] ۴۱
شکل ۱-۱۴: سیستمآزمایشگاهی تحت تست[47] ۴۵
شکل ۱-۱۵: چاه غیرخطی انرژی دوار کوپل شده با سیستم یک درجه آزادی [59] ۴۸
شکل ۲-۱: مجموعه روتورانعطاف‌پذیر، دیسک و n_{bl} پره ۵۲
شکل ۲-۲: (a) تبدیل زوایای اولر برای دستگاه‌های XYZ و xyz (b) تبدیل بردارهای یکه متناظر ۵۳
شکل ۲-۳: دیاگرام کمپل (فرکانس طبیعی) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور، فنریت سازه‌ای پره، ترم ژیروسکوپ مربوط به روتور و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=5$ ۶۷
شکل ۲-۴: دیاگرام کمپل (نرخ کاهش) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور، فنریت سازه‌ای پره، ترم ژیروسکوپ مربوط به روتور و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=5$ ۶۸
شکل ۲-۵: دیاگرام کمپل (فرکانس طبیعی) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور، فنریت سازه‌ای پره و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=5$ ۶۸
شکل ۲-۶: دیاگرام کمپل (فرکانس طبیعی) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=5$ ۶۹
شکل ۲-۷: دیاگرام کمپل (نرخ کاهش) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=5$ ۷۰

شکل ۲-۸: دیاگرام کمپل (فرکانس طبیعی) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور و اثر سفت‌شدگی گریز از مرکز، $l'/r_d=3$ ۷۰
شکل ۲-۹: دیاگرام کمپل (فرکانس طبیعی) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور، $l'/r_d=5$ ۷۱
شکل ۲-۱۰: دیاگرام کمپل (نرخ کاهش) مجموعه پره، دیسک و روتور بدون وجود ترم‌های دمپینگ سازه‌ای پره و روتور، $l'/r_d=5$ ۷۱
شکل ۲-۱۱: دیاگرام کمپل (نرخ کاهش) مجموعه پره، دیسک و روتور به ازای $l'/r_d=5$ و $c_r^*=c_{\text{blade}}=0.01$ ۷۲
شکل ۲-۱۲: نمودار پاسخ فرکانسی روتور حول رزونانس اول برای حالت پره انعطاف‌پذیر به ازای مقادیر متفاوت خروج از مرکز $(c_r^*=0.01, c_{blade}^*=0.01)$ ۸۲
شکل ۲-۱۳: نمودار پاسخ فرکانسی روتور حول رزونانس اول به ازای دو حالت پره صلب وانعطاف‌پذیر به ازای $(e_1^*=e_2^*=0.001)$ ۸۲
شکل ۲-۱۴: دامنه پاسخ پایدار سیستم بر حسب دمپینگ به ازای مقادیر متفاوت پارامتر میزان (σ) برای سیستم با پره صلب و انعطاف‌پذیر به ازای $(e_1^*=e_2^*=0.01)$ ۸۳
شکل ۲-۱۵: دامنه پاسخ پایدار سیستم دارای پره انعطاف‌پذیر بر حسب خروج از مرکز $(c_r^*=0.01,\ c_{\text{blade}}^*=0.01)$ ۸۳
شکل ۲-۱۶: دامنه پاسخ پایدار سیستم دارای پره انعطاف‌پذیر و صلب بر حسب خروج از مرکز $(c_r^*=0.01,\ c_{\text{blade}}^*=0.01, \sigma=0.1)$ ۸۴
شکل ۲-۱۷: مکان نقطه انشعاب اول و دوم بر حسب تغییرات دمپینگ به ازای $(e_1^*=e_2^*=0.01)$ برای سیستم دارای پره انعطاف‌پذیر ۸۵
شکل ۲-۱۸: مکان انشعاب اول و دوم بر حسب تغییرات دمپینگ به ازای $(e_1^*=e_2^*=1e-5)$ برای دو حالت، پره انعطاف‌پذیر و صلب ۸۵
شکل ۲-۱۹: نمودار پاسخ فرکانسی روتور حول رزونانس اول به ازای دو حالت پره صلب و انعطاف‌پذیر به ازای $(e_1^*=e_2^*=0.001)$، $l'/r=2$ و $l/l'=3.5$ ۸۶
شکل ۳-۱: تیر دوار به همراه چاه غیرخطی انرژی نصب شده روی آن ۸۹
شکل ۳-۲: تصویرنمودار منیفولد آهسته نامتغیر در صفحه $N(\tau_1)$ و $|C|^2$، به ازای $\omega_0=1.24$، $\beta=1$ و $\alpha=0.5$، پدیده پرش و همچنین انشعاب زین اسبی ۱۰۱
شکل ۳-۳: فرکانس‌های طبیعی تیر چرخان و فرکانس تحریک خارجی بر حسب سرعت دروانی ۱۰۷
شکل ۳-۴: رخداد انشعاب زین اسبی در فضای پارامترهای d، F و α که به ترتیب فاصله محل جاذب روی تیر از ریشه تیر، نیروی تحریک خارجی و دمپینگ بی بعد به ازای $(\sigma=1)$ ۱۰۸
شکل ۳-۵: رخداد انشعاب هاپ در فضای پارامترهای d، F و α که به ترتیب فاصله محل جاذب روی تیر از ریشه تیر، نیروی تحریک خارجی و دمپینگ بی بعد هستند، به ازای $(\sigma=1)$ ۱۰۹

شکل ۳-۶: میزان تحریک بحرانی به عنوان شرط اولیه رخداد نوسانات تخفیف یافته، در فضای پارامترهای d ، F و α که به ترتیب فاصله محل جاذب روی تیر از ریشه تیر، نیروی تحریک خارجی و دمپینگ بی‌بعد هستند ۱۱۰
شکل ۳-۷: نمودار محل رخداد انشعاب هاپ، زین اسبی و دامنه تحریک بحرانی به ازای $\sigma=1$، زمانی که جاذب در انتهای تیر قرار گیرد ۱۱۲
شکل ۳-۸: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم، زمانی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d=0.99)$ و $\sigma=1$، $F=0.5$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۴ در شکل ۳-۷) ۱۱۲
شکل ۳-۹: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم، زمانی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.99)$ و $\sigma = 1$، $F = 1$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۵ در شکل ۳-۷) ۱۱۳
شکل ۳-۱۰: نمودار تغییرات زاویه در فضای کند مربوط به ارتعاشات تیر چرخان زمانی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d=0.99)$ و $\sigma = 1$، $F=1$ و $\alpha=0.5$ (نقطه ۵ در شکل ۳-۷) ۱۱۳
شکل ۳-۱۱: نمودار حرکت سیستم در صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم که نهایتاً جذب مدار بسته چهار مرحله‌ای و معادل با آن نوسانات تخفیف یافته می‌شود، در حالتی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d=0.99)$ و $\sigma = 1$، $F = 1$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۵ در شکل ۳-۷) ۱۱۴
شکل ۳-۱۲: پاسخ فرکانسی سیستم، زمانیکه جاذب به انتهای تیر وصل شده است $(d=0.99)$، $F=0.5$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۵ در نمودار شکل ۳-۷) ۱۱۴
شکل ۳-۱۳: پاسخ زمانی جابه‌جائی نسبی جاذب نسبت به تیر چرخان (SMRs حرکت نوسانات تخفیف یافته قوی)، به ازای پارامترهای نقطه ۵ در شکل ۳-۷ و $\sigma = -2$ ۱۱۵
شکل ۳-۱۴: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم، زمانی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.99)$ و $\sigma=1$، $F=2$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۷ در شکل ۳-۷) ۱۱۶
شکل ۳-۱۵: پاسخ فرکانسی سیستم، زمانیکه جاذب به انتهای تیر وصل شده است $(d = 0.99)$، $F=1.75$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۶ در نمودار شکل ۳-۷) ۱۱۷
شکل ۳-۱۶: پاسخ فرکانسی سیستم، زمانیکه جاذب به انتهای تیر وصل شده است $(d = 0.99)$، $F=2.3$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۷ در نمودار شکل ۳-۷) ۱۱۷
شکل ۳-۱۷: نمودار محل رخداد انشعاب هاپ، زین اسبی و دامنه تحریک بحرانی به ازای $(\sigma = 1)$، زمانیکه جاذب نزدیک انتهای تیر قرار دارد $(d = 0.86)$ ۱۱۸
شکل ۳-۱۸: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم، زمانی که جاذب به نزدیک انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.86)$ و $\sigma = 1,\ F = 0.5,\ \alpha = 0.3$ (نقطه ۱ در شکل ۳-۱۷) ۱۱۹
شکل ۳-۱۹: پاسخ فرکانسی سیستم، زمانی که جاذب به نزدیک انتهای تیر وصل می‌شود $(d=0.86)$ و $\sigma = 1,\ F = 0.5,\ \alpha = 0.3$ (نقطه ۱ در شکل ۳-۱۷) ۱۱۹
شکل ۳-۲۰: وابستگی پاسخ سیستم به شرایط اولیه در محدوده $-1<y_1,\dot{y}_1,y_2<1$ و $\dot{y}_2=0$، زمانیکه جاذب به نزدیک انتهای تیر وصل شده است $(d = 0.86)$ و $F = 0.5,\ \alpha = 0.3,\ \sigma = 1$ (دارای دو رفتار، پاسخ مدوله قوی و حرکت نوسانی تک فرکانسه دامنه پائین) ۱۲۰

شکل ۳-۲۱:نمودار محل رخداد انشعاب هاپ، زین اسبی و دامنه تحریک بحرانی به ازای $(\sigma = 1)$، زمانیکه جاذب نزدیک انتهای تیر قرار دارد $(d = 0.5)$ ۱۲۲
شکل ۳-۲۲: نمودار حرکت سیستم در صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم که نهایتاً جذب مدار بسته چهار مرحله‌ای و معادل با آن نوسانات تخفیف یافته می‌شود، در حالتی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.5)$ و $\sigma = 1$، $F = 0.3$ و $\alpha = 0.5$ (نقطه ۹ در شکل ۳-۲۱) ۱۲۲
شکل ۳-۲۳: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم، زمانی که جاذب به نزدیک انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.5)$ و $\sigma = 1,\ F = 0.6,\ \alpha = 0.5$ (نقطه ۱۰ در شکل ۳-۲۱) ۱۲۳
شکل ۳-۲۴: نمودار محل رخداد انشعاب هاپ، زین اسبی و دامنه تحریک بحرانی به ازای $(\sigma = 1)$، زمانیکه جاذب نزدیک انتهای تیر قرار دارد $(d = 0.3)$ ۱۲۵
شکل ۳-۲۵: نمودار حرکت سیستم در صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم که نهایتاً جذب مدار بسته چهار مرحله‌ای و معادل با آن نوسانات تخفیف یافته می‌شود، در حالتی که جاذب به انتهای تیر وصل می‌شود $(d = 0.3)$ و $\sigma = 1$، $F = 0.1$ و $\alpha = 0.1$ (نقطه ۱۴ در شکل ۳-۲۴)..... ۱۲۵
شکل ۳-۲۶: واریانس پاسخ سیستم اصلی با وجود جاذب خطی و غیرخطی بهینه نصب شده در انتهای تیر چرخان $(d = 0.99)$ و بدون وجود هیچ یک ۱۲۸
شکل ۴-۱: سیستم روتور، دیسک به همرای جاذب‌های غیرخطی انرژی نصب شده روی آن ۱۳۲
شکل ۴-۲: سه مد اول گره قطری برای مجموعه چاه‌های غیرخطی انرژی الف) گره قطری صفر ب) گره قطری یک ج) گره قطری دو ۱۳۶
شکل ۴-۳: مانیفولد دو بعدی، دامنه نوسانات روتور و چاه غیرخطی انرژی به ازای پارامترهای $C_n = 0.003$، $\omega = 1$، $K_n = 0.1$، $n = 4$ و $m' = 0.05$، پدیده پرش و انشعاب زین اسبی ۱۴۴
شکل ۴-۴: دامنه مودال روتور (a) بر حسب تغییرات پارامتر میزان (σ)، به ازای پارامترهای $n = 4$، $K_n = 0.1$، $m' = 0.05$، $C_n = 0.003$، $\omega = 1$، $e = 0.01$، $(SN$ انشعاب زین اسبی، H انشعاب هاپ، SMR ناحیه رخداد پاسخ مدوله قوی) ۱۵۳
شکل ۴-۵: دامنه مودال چاه غیرخطی انرژی (b) بر حسب تغییرات پارامتر میزان (σ)، به ازای پارامترهای $n = 4$، $K_n = 0.1$، $m' = 0.05$، $C_n = 0.003$، $\omega = 1$، $e = 0.01$، $(SN$ انشعاب زین اسبی، H انشعاب هاپ، SMR ناحیه رخداد پاسخ مدوله قوی) ۱۵۳
شکل ۴-۶: پاسخ زمانی سیستم به ازای پارامترهای $n = 4$، $K_n = 0.1$، $m' = 0.05$، $C_n = 0.003$، $\omega = 1$، $e = 0.01$، $\sigma = -0.01$، الف)دامنه مودال روتور (a) بر حسب زمان ب)دامنه مودال چاه‌های غیرخطی انرژی (b) بر حسب زمانج) دامنه روتور در راستای محور (x) بر حسب زمان د) قسمت حقیقی پاسخ مودال چاه‌های غیرخطی انرژی بر حسب زمان ه) جابه‌جائی روتور در صفحه xy ی) جابه‌جائی روتور پاسخ مودال چاه‌های غیرخطی انرژی در صفحه xy ۱۵۴
شکل ۴-۷: صفحه فاز مربوط به حرکت کند سیستم به ازای پارامترهای $n = 4$، $K_n = 0.1$، $m' = 0.05$، $C_n = 0.003$، $\omega = 1$، $e = 0.01$، $\sigma = 0.01$ ۱۵۴