دینامیک روتور

جلد سوم - مدل‌های پیوسته

www.ketab.ir

تألیف

سید علی اصغر حسینی

عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی

دانشگاه خوارزمی

تهران ۱۴۰۲

سرشناسه	:	حسینی، سیدعلی‌اصغر، ۱۳۵۶-
عنوان و نام پدیدآور	:	دینامیک روتور/تألیف سیدعلی‌اصغر حسینی.
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه خوارزمی ، ۱۴۰۲-
مشخصات ظاهری	:	ج.: مصور، جدول.
شابک	:	دوره978-600-8587-82-8
		۴۰۰۰۰۰۰ریال: ج.۱:978-600-8587-83-5 ؛
		۴۸۵۰۰۰۰ریال: ج.۲ :978-600-8587-84-2 ؛
		۳۶۵۰۰۰۰ریال: ج.۳:978-600-8587-85-9
مندرجات	:	ج.۱. مدل‌های مقدماتی.- ج.۲. مدل‌های پیشرفته.- ج.۳. مدل‌های پیوسته
موضوع	:	ماشین‌های دوار – دینامیک Rotors -- Dynamics
شناسه افزوده	:	دانشگاه خوارزمی
رده بندی کنگره	:	TJ۱۰۵۸
رده بندی دیویی	:	۸۲۳۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی	:	۹۳۵۲۳۱۸
اطلاعات رکورد کتابشناسی	:	فیپا

www.ketab.ir

عنوان کتاب	:	**دینامیک روتور** / جلد سوم- مدل‌های پیوسته
نویسنده	:	سیدعلی‌اصغر حسینی
ناشر	:	دانشگاه خوارزمی
صفحه‌آرا	:	صدیقه عرب
طراح جلد	:	فاطمه منظور
نوبت وسال چاپ	:	اول، ۱۴۰۲
شابک دوره ۳ جلدی	:	۹۷۸-۶۰۰-۸۵۸۷-۸۲-۸
شابک جلد ۳	:	۹۷۸-۶۰۰-۸۵۸۷-۸۵-۹
شمار	:	۵۰۰ نسخه
قیمت	:	۳۶۵۰۰۰۰ ریال

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به انتشارات دانشگاه خوارزمی است.

آدرس: تهران، خ شهید مفتح، شماره ۴۳، کدپستی ۱۴۹۱۱- ۱۵۷۱۹ تلفن مرکز پخش: ۸۸۳۱۱۸۶۶

pub@khu.ac.ir www.khu.ac.ir

پیش‌گفتار

سپاس از این که کتاب حاضر را گشودید. جلد سوم از کتاب *دینامیک روتور* اکنون در پیشگاه شما است. همان اهداف بیان شده در پیش‌گفتار جلدهای گذشته، راهنمای تالیف کتاب حاضر است. مانند قبل سعی شده است کتابی توسعه یابد که مباحث ارایه شده در آن حاصل نگاه ویژه‌ی نگارنده به دینامیک روتور بوده و مطالب لازم را با در نظر گرفتن پیشرفت‌های اخیر به زبان فارسی ارایه نماید.

در جلد اول بحث‌های پایه‌ای شامل فرمولبندی و تحلیل روتور جفکات انتقالی، روتور جفکات زاویه‌ای، حرکت پیچشی، جفت‌شدگی خمشی-پیچشی و مدل چهار درجه آزادی مطالعه گردید. همچنین بررسی کامل روتورهای دارای میرایی داخلی و خارجی از دیگر مواردی است که طی ۸ فصل بررسی گردید. در جلد دوم (فصل‌های ۹ تا ۱۶) مباحث پیشرفته‌تر مانند حرکت ناپایای روتور، اثر تکیه‌گاه بر رفتاری دینامیکی روتور، انواع عدم تقارن (مانند عدم تقارن در یاتاقان، عدم تقارن در شفت، عدم تقارن در دیسک و ترکیب آنها) و در نهایت بحث کوپلینگ و ناهمراستایی فرمولبندی و تحلیل گردید. تمام مدل‌های بکار گرفته شده بصورت گسسته و خطی بودند[1].

www.ketab.ir

در این جلد تمرکز بر مدلسازی پیوسته روتورها می‌باشد. این مبحث به علت تکنیک‌های ویژه‌ی ریاضی مرتبط به سامانه‌های پیوسته نسبت به دو جلد پیشین، کمی تفاوت دارد. علاوه بر مباحث مقدماتی ارتعاشات، دینامیک و مقاومت مصالح، در این فصل نیاز به دانستن اطلاعات پایه‌ای از ارتعاشات سامانه‌های پیوسته، تکنیک حساب تغییرات، مکانیک مواد ناهمسانگرد و حل معادلات دیفرانسیل مشتق پاره‌ای می‌باشد[2].

در این جلد طی ۸ فصل، موارد زیر بررسی می‌شود[3]:

فصل ۱۷. مقدمات ورود به بحث روتورهای پیوسته در این فصل ارایه می‌گردد. ابتدا اصول ابتدایی تئوری الاستیسیته که مورد نیاز فصل‌های آتی است مرور می‌گردد. به علت آن که دانستن مباحث مقاومت مصالح مفروض در نظر گرفته می‌شود تمرکز بر مکانیک مواد

---

۱. مشاهده شد بعضی اوقات در دینامیک ناپایای روتور، معادلات غیرخطی ظاهر می‌شود.

۲. البته مروری بر این مباحث در فصل‌های آتی، صورت خواهد گرفت که برای خواننده با معلومات متوسط، کفایت می‌کند.

۳. شماره‌گذاری فصل‌ها در ادامه‌ی جلدهای اول و دوم انجام می‌شود.

ناهمسانگرد است. بعدا در فصل ۲۳ از این اطلاعات در مدلسازی شفت‌های کامپوزیتی استفاده می‌گردد. موضوع دیگری که در این فصل مرور می‌شود استفاده از تکنیک حساب تغییرات در فرمولبندی سامانه‌های پیوسته است که در فصل ۲۰ برای استخراج معادلات حرکت بکار می‌رود. بکارگیری اصل همیلتون و معادلات لاگرانژ از موارد مهم این فصل است. چگونگی حل سامانه‌های پیوسته از دیگر موضوعات ارایه شده می‌باشد. ابتدا مروری بر قضیه بسط مودال و استفاده از توابع ویژه صورت می‌گیرد و سپس تکنیک تابع انتقال پیوسته و استفاده از تابع گرین در یافتن پاسخ سامانه‌های پیوسته بررسی می‌شود. درنهایت، مروری بر روش‌های گسسته‌سازی سامانه‌های پیوسته انجام می‌گیرد. دو کلاس عمده از تکنیک‌های گسسته‌سازی، یعنی باقیمانده وزنی و ریتز، معرفی شده و جزییات دو روش مهم، یعنی گلرکین و مودهای فرضی، ارایه می‌گردد.

فصل ۱۸. در این فصل، فرمولبندی و تحلیل روتورهای پیوسته با استفاده از روش نیوتن انجام می‌شود. برای استخراج معادلات از هر سه تئوری اویلر-برنولی، ریلی و تیموشنکو استفاده می‌گردد. پاسخ ارتعاشات آزاد و همچنین پاسخ ناشی از تحریک‌های نامیزانی و انحنای اولیه تحلیل می‌گردد. مطالعه‌ای در مورد اثر مرکزگریز در فرمولبندی مدل ریلی و تیموشنکو صورت می‌گیرد که از مباحث مورد اختلاف در مراجع می‌باشد.

فصل ۱۹. این فصل در ادامه فصل ۱۸ می‌باشد و مباحث دیگری از دینامیک شفت‌های پیوسته را شامل می‌شود. اولین موضوع، فرمولبندی و تحلیل روتور تحت نیرو و گشتاور محوری است که در شفت‌های انتقال قدرت، قابل توجه است. مطالعه اثر تکیه‌گاه منعطف در پاسخ روتور، وجود یاتاقان میانی در شفت‌های پیوسته و در نهایت اثر وجود دیسک در دینامیک روتورهای پیوسته از دیگر موضوعاتی است که در این فصل بررسی می‌گردد. در ادامه، حرکات پیچشی و طولی روتور پیوسته فرمولبندی و تحلیل می‌شود. در نهایت، بررسی حرکت ناپایای روتور و جفت‌شدگی خمشی-پیچشی در فرمولبندی شفت از مباحثی است که ارایه خواهد شد.

فصل ۲۰. این فصل بر فرمولبندی شفت پیوسته با استفاده از روش انرژی، متمرکز است. ابتدا عبارت‌های مربوط به انرژی جنبشی و پتانسیل استخراج می‌گردد. این که انرژی جنبشی در

www.ketab.ir

چه مرحله‌ای، خطی‌سازی شود به فرمولبندی‌های متفاوتی در شفت منجر شده و اثر مرکزگریز را به روش‌های متفاوتی لحاظ می‌کند. تفاوت رفتار روتور با لحاظ/صرفنظر کردن این اثر بررسی شده و بحثی در مورد مزایا/معایب هر یک صورت می‌گیرد. در نهایت تحلیل روتور دارای جرم متمرکز با بکارگیری تابع دلتای دیراک تحت اثر نامیزانی‌های استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود.

فصل ۲۱. این فصل، اختصاص به فرمولبندی اجزای محدود روتورهای پیوسته دارد. همینطور که خواننده می‌داند این تکنیک از قدرتمندترین روش‌ها برای تحلیل سامانه‌های پیوسته است. تمرکز این فصل بر استفاده از المان تیر در فرمولبندی ماتریس‌های جرم و سفتی است. برای آشنایی، ابتدا تحلیل برای تیر یک بعدی صورت می‌گیرد و سپس فرمولبندی به شفت اسپین-دار تعمیم می‌یابد. ماتریس‌های جرم و سفتی متناظر با هر دو مدل اویلر-برنولی و تیموشنکو استخراج می‌گردد. چگونگی مدلسازی تکیه‌گاه منعطف و لحاظ کردن جرم متمرکز از دیگر موضوعات این فصل است. در ادامه، چگونگی مدلسازی نامیزانی و تحلیل ارتعاشات اجباری روتور بررسی شده و در نهایت فرمولبندی اجزای محدود حرکات طولی و پیچشی روتور ارایه می‌گردد.

فصل ۲۲. در این فصل، چگونگی استفاده از روش ماتریس انتقال در تحلیل روتورهای پیوسته بررسی می‌گردد. اگر چه این روش در تحلیل سازه‌ها پس از ظهور روش اجزای محدود تا حدی در سایه قرار گرفته است ولی در دینامیک روتور، دارای اهمیت است. چگونگی تشکیل ماتریس‌های سفتی و جرم و تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری روتور پیوسته از موضوعات مهم این فصل است.

فصل ۲۳. مباحث پیشرفته‌ی روتورهای پیوسته در این فصل بررسی می‌شود. سه موضوع عمده‌ی ارایه شده، شامل تئوری‌های برشی مرتبه بالا، شفت‌های ناهمسانگرد (کامپوزیتی) و شفت‌های ناهمگن (مدرج تابعی) می‌باشد. ابتدا انواع میدان جابجایی متناظر با تئوری‌های مرتبه بالای برشی ارایه گشته و سپس فرمولبندی تیر اسپین‌دار با استفاده از آن صورت می-گیرد. در ادامه چگونگی فرمولبندی شفت‌های کامپوزیتی ارایه می‌گردد. با بکارگیری چندین روش از جمله روش مدول موثر، روش لایه واحد (با و بدون اثرات جفت‌شدگی) و

www.ketab.ir

تکنیک لایه‌ای، معادلات حرکت شفت کامپوزیتی، استخراج و تحلیل‌های لازم صورت می‌گیرد. آخرین بحث این فصل نیز مربوط به شفت ناهمگن ساخته شده از مواد مدرج تابعی است.

فصل ۲٤. آخرین فصل کتاب دربرگیرنده‌ی مباحث مربوط به میرایی روتورهای پیوسته است. به غیر از یک مورد، مطالب این فصل، مشابه با فصل‌های ۷ و ۸ (جلد اول) مربوط به مدل‌های گسسته است. ابتدا مدلسازی میرایی هیسترزیس شفت با استفاده از روش‌های میرایی معادل و مفهوم اختلاف فاز بین تنش و کرنش انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از مدل کلوین-ویت، فرمولبندی میرایی داخلی شفت پیوسته صورت می‌گیرد. در ادامه چگونگی استفاده از عملگرهای دلخواه در مدلسازی میرایی روتور پیوسته، بحث و سپس روش انتگرالی بولتزمان (میرایی غیرویسکوز) مطالعه می‌شود. از پژوهش‌های جدید که در این فصل معرفی می‌گردد استفاده از مدل میرایی غیرمحلی در شفت چرخان است که صرفا مربوط به مدل پیوسته می‌باشد. در نهایت، استفاده از روش اجزای محدود در مدلسازی میرایی، تحقیق می‌شود. سه تکنیک مهم در این زمینه که شامل روش ارزای کرنشی مودال، روش گولا-هاجز-مکتاویش و روش میدان ترمودینامیکی تکمیلی است ارایه و فرمولبندی‌های مربوطه صورت می‌گیرد.

www.ketab.ir

اگرچه سعی شده است ارایه مباحث این فصل بصورت مستقل از جلدهای اول و دوم بیان گردد ولی در برخی از موضوعات (به علت پیوستگی مطالب)، ارجاع به مباحث جلدهای پیشین، ضروری می‌بود. به همین دلیل، مطالعه‌ی دقیق موضوعات ارایه شده در جلدهای پیشین (در صورت لزوم) برای فهم بهتر مطالب این جلد ضروری است. پیشنهاد می‌شود خواننده پیش از مطالعه‌ی این جلد، مروری بر مطالب جلدهای اول و دوم داشته باشد.

اگر چه که این جلد بر مباحث پیشرفته تمرکز دارد، با این حال، بیشتر مباحث ارایه شده بگونه‌ای است که برای خواننده با سطح کارشناسی ارشد، مفید می‌باشد. برای تفکیک مباحث پیچیده‌تر، بخش‌هایی با ستاره (*) مشخص شده‌اند که برای خوانندگان با سطح پیشرفته‌تر مفید است و می‌توان آنها را در مطالعه‌ی ابتدایی، حذف کرد.

همانطور که خواننده از دوره‌های تحصیلی، تجربه دارد تسلط بر یک مبحث، صرفا با مطالعه آن حاصل نشده و بایستی تمرین‌های مناسب و مرتبط با آن موضوع تحلیل گردد. پیرو این اصل، ۲۸۱ مساله در این جلد گنجانده شده که مکمل و موسعِ مباحث هر فصل می‌باشد. از این رو به خواننده‌ی جدی، توصیه‌ی موکد می‌شود که برای فهم و تسلط بیشتر بر موضوعات این جلد حتما تعداد مناسبی از مسایل هر فصل را حل کند. مشابه با جلدهای پیشین، مسایل ارایه شده به چندگونه است: بخشی از آن، ساده در حد عددگذاری چند فرمول است. در بعضی مسایل از خواننده خواسته شده است که جزییات استخراج یک رابطه و یا رسم یک نمودار را ارایه دهد (این دو نوع مساله بایستی مورد نظر خواننده باشد). در برخی دیگر، تحقیقی درباره موضوعی خواسته شده است. نوع دیگر مسایل، توسعه فرمولبندی‌های ارایه شده است. بعضی از آنها ساده و برخی دیگر مشکل است که موارد پیچیده با علامت ستاره (*) مشخص شده است. بعضی از این مسایلِ ستاره‌دار، از مقالات استخراج شده است (که منبع آن بیان گردیده) و برخی دیگر نگونه‌ای است که انجام کامل آن حتی می‌تواند به مقاله‌ی پژوهشی، منتهی شود (دو نوع اخیر برای پروژه‌ی دانشجویان قابل استفاده است).

مشابه با جلدهای اول و دوم، تمام کدهای کامپیوتری مربوط به این کتاب از طریق ایمیل به نویسنده به آدرس ali.hosseini@khu.ac.ir قابل دسترسی است. از این کدها می‌توان برای مقاصد آموزشی، پژوهشی و درکارهای صنعتی (برای مسایل واقعی) استفاده کرد.

در انتها از تمام معلمان، اساتید، دانشجویان حاضر و پیشین و همکاران گرامی در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه خوارزمی، که نقش پررنگی در رشد علمی مولف داشته‌اند سپاسگزاری می‌شود. درنهایت از همسر گرامی و فرزندان عزیزم که بدون لطف ایشان، این کتاب به انتها نمی‌رسید صمیمانه تشکر می‌شود.

یقینا این جلد کتاب، خالی از اشکال نیست. از همه‌ی خوانندگان و متخصصان گرامی درخواست دارم نظرات و پیشنهادات ارزشمند خود را مستقیما به ایمیل نویسنده ارسال نمایند تا در چاپ‌های آتی لحاظ گردد.

سید علی اصغر حسینی

دانشگاه خوارزمی

www.ketab.ir

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ..... ط

فصل ۱۷: مروری بر تئوری سامانه‌های پیوسته ۱

۱۷-۱- مقدمه ۱

۱۷-۲- مقدمه ای بر تئوری الاستیسیته ۲

۱۷-۲-۱- تعریف تنش، کرنش و معادله ساختاری ۳

۱۷-۲-۲- ارایه تنش و کرنش در دستگاه‌های مختصات متفاوت ۸

۱۷-۳- مقدمه ای بر حساب تغییرات ۱۳

۱۷-۴- اصل کار مجازی ۱۸

۱۷-۵- استخراج اصل همیلتون ۲۰

۱۷-۶- اعمال اصل همیلتون به سامانه‌های پیوسته ۲۳

*۱۷-۷- کاربرد معادلات لاگرانژ در سامانه‌های پیوسته ۲۶

۱۷-۸- قضیه بسط و حل دقیق سامانه‌های پیوسته ۲۸

*۱۷-۹- تابع انتقال سامانه‌های پیوسته و حل دقیق آنها با استفاده از تابع گرین (روش انتگرالی) ۳۵

۱۷-۱۰- گسسته‌سازی و حل تقریبی سامانه‌های پیوسته ۴۴

۱۷-۱۰-۱- روش مودهای فرضی (ریتز) ۴۶

۱۷-۱۰-۲- روش گلرکین ۵۲

۱۷-۱۱- بحث و نتیجه گیری ۵۵

۱۷-۱۲- مسایل ۵۷

۱۷-۱۳- مراجع ۶۱

فصل ۱۸: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-روش نیوتن (بخش اول) ۶۵

۱۸-۱- مقدمه ۶۵

۱۸-۲- تحلیل دینامیکی شفت چرخان با استفاده از تئوری های اویلر-برنولی و ریلی ۶۹

۱۸-۲-۱- استخراج معادلات حرکت ۶۹

www.ketab.ir

۱۸-۲-۲- تحلیل ارتعاش آزاد شفت اویلر ۷۷
۱۸-۲-۳- تحلیل ارتعاش آزاد شفت ریلی ۷۹
۱۸-۲-۴- تحلیل ارتعاش اجباری ناشی از تحریک نامیزانی ۸۳
۱۸-۲-۵- تحلیل پاسخ شفت با بکارگیری بی نهایت مود ۸۵
۱۸-۲-۶- فرمولبندی شفت ریلی با لحاظ کردن اثر مرکزگریز ۸۷
۱۸-۲-۷- فرمولبندی شفت دارای انحنای اولیه ۸۹

*۱۸-۳- *تحلیل دینامیکی شفت چرخان با استفاده از تئوری تیموشنکو* ۹۲
۱۸-۳-۱- فرمولبندی معادلات حرکت شفت تیموشنکو در غیاب اثر مرکزگریز ۹۲
۱۸-۳-۲- فرمولبندی معادلات حرکت شفت تیموشنکو در حضور اثر مرکزگریز ۹۷
۱۸-۳-۳- تحلیل ارتعاش آزاد ۹۷
۱۸-۳-۴- تحلیل ارتعاش اجباری ناشی از تحریک نامیزانی ۱۰۲

۱۸-۴- بحث و نتیجه گیری ۱۰۴

۱۸-۵- مسایل ۱۰۵

۱۸-۶- مراجع ۱۰۶

فصل ۱۹: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-روش نیوتن (بخش دوم) ۱۰۹

۱۹-۱- مقدمه ۱۰۹

۱۹-۲- تحلیل دینامیکی شفت چرخان تحت نیرو و گشتاور محوری با استفاده از تئوری تیموشنکو ۱۱۰
۱۹-۲-۱- فرمولبندی معادلات ۱۱۰
۱۹-۲-۲- تحلیل ارتعاش آزاد و پایداری ۱۱۳

۱۹-۳- اثر انعطاف تکیه گاه در دینامیک روتور پیوسته ۱۱۷

۱۹-۴- اثر جرم متمرکز در دینامیک روتور پیوسته ۱۲۱
۱۹-۴-۱- تشکیل معادلات ۱۲۳
۱۹-۴-۲- حل معادلات حرکت ۱۲۵
۱۹-۴-۳- مدلسازی روتور یکسرگیردار دارای جرم متمرکز ۱۲۸

۱۹-۵- اثر یاتاقان میانی در دینامیک روتور پیوسته ۱۳۲

۱۹-۶- مدلسازی و تحلیل حرکت پیچشی روتور پیوسته ۱۳۵

۱۹-۷- مدلسازی و تحلیل حرکت محوری روتور پیوسته ۱۳۹

www.ketab.ir

*۱۹-۸- مدلسازی و تحلیل حرکت خمشی روتور پیوسته با سرعت متغیر- جفت‌شدگی حرکات خمشی و پیچشی در شفت دوار ۱۴۰
۱۹-۸-۱- استخراج معادلات حرکت شفت ریلی برای حرکت ناپایا با صرفنظر کردن از اثر مرکزگریز ۱۴۰
۱۹-۸-۲- استخراج معادلات حرکت شفت ریلی برای حرکت ناپایا با در نظر گرفتن اثر مرکزگریز ۱۴۴
۱۹-۸-۳- تحلیل معادلات حرکت ۱۴۵
۱۹-۹- بحث و نتیجه گیری ۱۵۱
۱۹-۱۰- مسایل ۱۵۳
۱۹-۱۱- مراجع ۱۵۷
فصل ۲۰: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-روش انرژی ۱۶۰
۲۰-۱- مقدمه ۱۶۰
۲۰-۲- محاسبه انرژی های جنبشی و پتانسیل شفت ریلی ۱۶۱
۲۰-۲-۱- استخراج عبارت انرژی پتانسیل شفت ریلی نامتقارن ۱۶۱
۲۰-۲-۲- استخراج عبارت انرژی جنبشی شفت ریلی ۱۶۴
۲۰-۳- اثر نیروی مرکزگریز و تفاوت های موجود در فرمولبندی شفت های ریلی و تیموشنکو ..۱۷۰
۲۰-۴- استخراج عبارت انرژی پتانسیل شفت تیموشنکو ۱۸۱
*۲۰-۵- تحلیل دینامیکی شفت یکسرگیردار با در نظر گرفتن نامیزانی و کجی دیسک (نامیزانی دینامیکی) ۱۸۲
۲۰-۶- تحلیل مودال شفت دارای تعداد دلخواه جرم و فنر متمرکز ۱۸۸
۲۰-۷- تحلیل دینامیکی شفت (روتور پیوسته) نامتقارن ۱۹۲
۲۰-۸- بحث و نتیجه گیری ۱۹۶
۲۰-۹- مسایل ۱۹۹
۲۰-۱۰- مراجع ۲۰۲
فصل ۲۱: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-روش اجزای محدود ۲۰۵
۲۱-۱- مقدمه ۲۰۵
۲۱-۲- گسسته سازی و مختصه‌های عمومی ۲۰۷
۲۱-۳- ماتریس های جرم و سفتی تیر ۲۰۹

www.ketab.ir

۲۱-۳-۱- المان تیر اویلر-برنولی ۲۱۰
*۲۱-۳-۲- المان تیر تیموشنکو ۲۱۲

۲۱-۴- ماتریس‌های جرم و سفتی شفت ۲۱۶
۲۱-۴-۱- المان شفت ریلی (اویلر) ۲۱۶
*۲۱-۴-۲- المان شفت تیموشنکو ۲۱۹

۲۱-۵- ماتریس‌های سفتی و میرایی متناظر با تکیه گاه ۲۲۱

۲۱-۶- ماتریس جرم متناظر با دیسک (جرم متمرکز) ۲۲۲

۲۱-۷- مونتاژ ماتریس المانها و حل معادلات نهایی ۲۲۳

۲۱-۸- اثر نامیزانی دیسک در پاسخ روتور ۲۲۷

۲۱-۹- معادلات روتور در دستگاه چرخان ۲۳۸

۲۱-۱۰- فرمولبندی اجزای محدود شفت نامتقارن ۲۴۱

۲۱-۱۱- تحلیل روتور پیوسته با دیسک نامتقارن ۲۴۶

۲۱-۱۲- تحلیل روتور پیوسته با دیسک، شفت و یاتاقان نامتقارن ۲۴۸

۲۱-۱۳- فرمولبندی اجزای محدود ارتعاش های طولی و پیچشی شفت ۲۴۹

۲۱-۱۴- مدلسازی کوپلینگ با استفاده از روش اجزای محدود ۲۵۰
۲۱-۱۴-۱- مدلسازی کوپلینگ منعطف بصورت پین ۲۵۱
۲۱-۱۴-۲- مدلسازی کوپلینگ منعطف بصورت پین با در نظر گرفتن جرم کوپلینگ ۲۵۴
۲۱-۱۴-۳- مدلسازی کوپلینگ منعطف بصورت پین با در نظر گرفتن سفتی و میرایی دورانی کوپلینگ ۲۵۵
۲۱-۱۴-۴- مدلسازی کوپلینگ منعطف با در نظر گرفتن سفتی عرضی و دورانی ۲۵۶
۲۱-۱۴-۵- مدلسازی کوپلینگ منعطف با در نظر گرفتن سفتی و میرایی عرضی ۲۵۸

۲۱-۱۵- بحث و نتیجه گیری ۲۵۸

۲۱-۱۶- مسایل ۲۶۰

۲۱-۱۷- مراجع ۲۶۶

فصل ۲۲: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-روش ماتریس انتقال ۲۶۹

۲۲-۱- مقدمه ۲۶۹

۲۲-۲- گسسته سازی ۲۷۰

www.ketab.ir

۲۲-۳- *اعمال روش ماتریس انتقال در حالت ارتعاش آزاد* ۲۷۲
۲۲-۳-۱- ماتریس انتقال در طی یک میدان ۲۷۴
۲۲-۳-۲- ماتریس انتقال در یک ایستگاه ۲۷۶
۲۲-۳-۳- اعمال شرایط مرزی ۲۷۹
۲۲-۴- *اعمال روش ماتریس انتقال برای حالت ارتعاش اجباری* ۲۸۰
۲۲-۵- *بحث و نتیجه گیری* ۲۸۵
۲۲-۶- *مسایل* ۲۸۶
۲۲-۷- *مراجع* ۲۸۸
فصل ۲۳: تحلیل دینامیکی روتور پیوسته-تئوری برشی مرتبه بالا، شفت‌های غیرهمسانگرد (کامپوزیتی) و ناهمگن (مدرج تابعی) ۲۸۹
۲۳-۱- *مقدمه* ۲۸۹
۲۳-۲- *فرمولبندی و تحلیل معادلات حرکت شفت چرخان با بکارگیری تئوری برشی مرتبه بالا* ۲۹۱
۲۳-۲-۱- تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه بالا ۲۹۲
۲۳-۲-۲- تئوری‌های مرتبه بالای برشی قابل اعمال به تیر با سطح مقطع مستطیل ۲۹۳
۲۳-۲-۳- تئوری‌های مرتبه بالای برشی قابل اعمال به تیر و شفت با سطح مقطع دایره ۲۹۶
۲۳-۲-۴- استخراج معادلات حرکت شفت با بکارگیری تئوری مرتبه بالای برشی ۲۹۸
۲۳-۳- *فرمولبندی و تحلیل شفت های کامپوزیتی ناهمسانگرد* ۳۰۲
۲۳-۳-۱- روش مدول معادل (موثر) ۳۰۴
۲۳-۳-۲- روش لایه واحد معادل با صرفنظر کردن از ضرایب جفت‌شدگی برای شفت توخالی جدار نازک ۳۰۵
۲۳-۳-۳- روش لایه واحد معادل با لحاظ کردن ضریب جفت‌شدگی خمشی-برشی ۳۱۰
*۲۳-۳-۴- روش لایه واحد معادل با لحاظ کردن حرکات طولی و پیچشی ۳۱۳
*۲۳-۳-۵- تئوری لایهای شفت کامپوزیتی ۳۱۷
۲۳-۴- *فرمولبندی و تحلیل معادلات حرکت شفت چرخان ناهمگن (مدرج تابعی)* ۳۲۲
۲۳-۵- *بحث و نتیجه گیری* ۳۲۵
۲۳-۶- *مسایل* ۳۲۸
۲۳-۷- *مراجع* ۳۳۱
فصل ۲۴: تحلیل روتور پیوسته با فرض وجود میرایی داخلی و خارجی ۳۳۵
۲۴-۱- مقدمه ۳۳۵

www.ketab.ir

۲۴-۲- فرمولبندی و تحلیل روتور پیوسته دارای میرایی چرخان ویسکوز و استفاده از مفهوم میرایی معادل برای شبیه سازی میرایی هیسترزیس..... ۳۳۷

۲۴-۳- فرمولبندی میرایی هیسترزیس با بکارگیری مفاهیم اختلاف فاز بین تنش-کرنش و سفتی مختلط ۳۴۰

۲۴-۴- فرمولبندی و تحلیل روتور پیوسته دارای میرایی داخلی کلوین-ویت در دستگاههای اینرسی و چرخان..... ۳۴۴

۲۴-۴-۱- فرمولبندی به روش نیوتن..... ۳۴۵

۲۴-۴-۲- فرمولبندی به روش انرژی- استخراج معادلات در دستگاه های اینرسی و چرخان ۳۴۷

۲۴-۴-۳- ارتعاشات آزاد و تحلیل پایداری..... ۳۵۰

۲۴-۴-۴- پاسخ ناشی از تحریک نامیزانی ۳۵۳

**۲۴-۵- فرمولبندی روتور پیوسته با مدل میرایی دارای عملگرهای دلخواه از تنش و کرنش ۳۵۴*

**۲۴-۶- فرمولبندی و تحلیل روتور پیوسته دارای میرایی داخلی غیرویسکوز (مدل بولتزمان) ...۳۵۶*

**۲۴-۷- فرمولبندی و تحلیل روتور پیوسته با بکارگیری عملگر عمومی میرایی- مفهوم میرایی غیرمحلی..... ۳۵۹*

۲۴-۷-۱- عملگر عمومی میرایی..... ۳۶۰

۲۴-۷-۲- مدلسازی میرایی غیرمحلی..... ۳۶۱

۲۴-۷-۳- حل معادله روتور دارای میرایی غیرمحلی ۳۶۵

۲۴-۸- فرمولبندی و تحلیل روتور پیوسته میرا با استفاده از روش اجزای محدود ۳۷۱

۲۴-۸-۱- ماتریس میرایی خارجی..... ۳۷۱

۲۴-۸-۲- ماتریس میرایی داخلی ویسکوز (مدل کلوین-ویت) و هیسترزیس..... ۳۷۲

*۲۴-۸-۳- روش انرژی کرنش مودال برای مدلسازی رفتار مادی وابسته به فرکانس ۳۷۴

*۲۴-۸-۴- تئوری اجزای محدود برای مدلسازی رفتار مادی وابسته به فرکانس در حوزه زمان- روش گولا-هاجز-مکتاویش ۳۷۸

*۲۴-۸-۵- تئوری اجزای محدود برای مدلسازی رفتار مادی وابسته به فرکانس در حوزه زمان- روش میدان ترمودینامیکی تکمیلی..... ۳۸۵

۲۴-۹- بحث و نتیجه گیری ۳۸۸

۲۴-۱۰- مسایل ۳۹۲

۲۴-۱۱- مراجع..... ۳۹۷

www.ketab.ir