

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها، اجزای محدود، ANSYS

تالیف

محمد رفیعی



مدک ایستیس

سرشناسه	: رفیعی، محمد، ۱۳۶۴ -
عنوان و نام پدیدآور	: دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها، اجزای محدود، ANSYS / تالیف محمد رفیعی.
مشخصات نشر	: تهران: فدک ایستاتیس، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	: ۳۴۴ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۸۵۰۰۰ ریال: ۷-۰۴۸-۱۶۰-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: نرم‌افزار انسیس
موضوع	: روش المان‌های محدود
موضوع	: ارتعاش -- شبیه‌سازی کامپیوتری
موضوع	: دینامیک -- مهندسی
موضوع	: مهندسی -- داده‌پردازی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۰ الف/۸/۳۴۵/TA
رده بندی دیویی	: ۶۲۰/۰۰۲۸۵۵۳۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۵۴۰۳۰۷

دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها، اجزای محدود، ANSYS



تالیف	: محمد رفیعی
مدیر تولید	: مهندس رضا کرمی‌شاهنده
حروفچینی و صفحه‌آرایی	: واحد تولید انتشارات فدک ایستاتیس (سامان کهنه‌پوشی)
ویراستار ادبی	: صفیه فیروزی‌مهر
نوبت چاپ	: اول - ۱۳۹۰
تیراژ	: ۱۰۰۰
چاپ و صحافی	: گنج‌شایگان
قیمت	: ۸۵۰۰۰ ریال
شابک	: ۷-۰۴۸-۱۶۰-۶۰۰-۹۷۸

دفتر انتشارات : تهران - خیابان انقلاب - خیابان اردیبهشت - بین‌لبافی نژاد و جمهوری - ساختمان ۱۰
 تلفن: ۶۶۴۶۵۸۳۱ - ۶۶۴۸۱۰۹۶ - ۶۶۴۸۲۲۲۱
 نمایندگی تهران : خیابان انقلاب - نبش ۱۲ فروردین - پلاک ۱۳۱۲ - انتشارات صانعی
 تلفن: ۶۶۴۰۹۹۲۴ - ۶۶۴۰۵۳۸۵
 فروشگاه یزد: میدان آزادی (باغ ملی) - ابتدای خیابان فرخی - جنب مجتمع ستاره
 تلفن: ۶۲۲۶۷۷۱ - ۶۲۲۶۷۷۲ - ۶۲۲۶۷۷۳
www.fadakbook.ir - info@fadakbook.ir

کلیه حقوق و حق چاپ متن و عنوان کتاب که به ثبت رسیده است؛ مطابق با قانون حقوق مولفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸ محفوظ و متعلق به انتشارات فدک ایستاتیس می‌باشد. هرگونه برداشت، تکثیر، کپی برداری به هر شکل (چاپ، فتوکپی، انتشار الکترونیکی) بدون اجازه کتبی از انتشارات فدک ایستاتیس ممنوع بوده و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار خواهند گرفت.

معاونت حقوقی
انتشارات فدک ایستاتیس

مقدمه

"مبانی تئوری روش اجزای محدود^۱ برای دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها و کاربرد آن با نرم افزار ANSYS" همان طور که از نامش پیداست به بررسی مبانی تئوری اجزای محدود می‌پردازد و کاربرد این روش را با استفاده از نرم‌افزار تجاری آنالیز اجزای محدود ANSYS به تصویر می‌کشد. دلایل زیادی برای نوشتن این کتاب و ارائه‌ی آن به جامعه مهندسی وجود داشت که برخی از آنها را مختصراً توصیف خواهیم کرد.

روش اجزای محدود به قدری کاربرد گسترده در تکنیک‌های طراحی و تحلیل پیدا کرده که ضروریست دانشجویان مهندسی در مقطع کارشناسی نیز دانش پایه‌ای از تئوری و کاربردهای این تکنیک پیدا کنند از این رو مبانی تئوری با رویکرد آموزش این امر برای دانشجویان و مهندسان علاقه‌مند به حیطه دینامیک و ارتعاشات تدوین شد. متأسفانه بسیاری از مهندسان بدون دانش مفاهیم پایه روش اجزای محدود، از نرم‌افزارهای آنالیز اجزای محدود استفاده می‌کنند که این می‌تواند خطرناک باشد. در طول سالیان تدریس روش اجزای محدود و نرم‌افزار ANSYS در دانشگاه‌ها و صنایع مختلف، هرگز کتابی را در سطح جهان نیافتم که در آن بتواند آموزش‌های ANSYS را در کنار مبانی تئوری روش دینامیک و ارتعاشات بیان کند. بنابراین نیاز به این نوع کتاب برای دانشجویان و مهندسان احساس می‌شد. کتاب‌های موجود بود یا مبانی نظری را به‌طور محض مورد بحث قرار می‌دهد و یا صرفاً ویژه نرم افزار ANSYS است که البته در هیچ کتابی در سطح دنیا مسائل دینامیک و ارتعاشات با استفاده از ANSYS بدین گستردگی و تنوع آورده نشده است. مؤلف کوشیده است تا با استفاده از ANSYS مثال‌هایی را ارائه کند که اغلب آنها در کتاب‌های فعلی و مراجع مختلف نباشد. برخی از مثال‌های ارائه شده مربوط به مقالات چاپ شده در مجلات و کنفرانس‌های علمی می‌باشد. از این رو امید است که این کتاب برای دانشجویان مهندسی در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مفید فایده باشد. این کتاب از فصول متعددی تشکیل شده که در ادامه مختصری از محتویات آنها بیان شده است.

بخش ۱ به مباحث مقدماتی و مبانی تئوری روش اجزای محدود برای دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها می‌پردازد و شامل دو فصل است.

فصل ۱ مقدمه‌ی کوتاهی از روش اجزای محدود است و شامل توصیفی از مفاهیم پایه‌ای تقسیم دامنه به زیر دامنه‌های با اندازه محدود می‌باشد. روش تفاضل متناهی برای مقایسه با روش اجزای محدود معرفی شده است. روشی عمومی به ترتیب برای تعریف مدل، حل و تفسیر نتایج، مورد بحث قرار گرفته و با ارائه چند مثال کاربرد روش اجزای محدود به تصویر کشیده شده است.

فصل ۲ مفهوم حرکت دینامیکی سازه‌ها را با استفاده از روش اجزای محدود معرفی می‌کند. فرض ما بر این نبوده که خواننده درس ارتعاشات مکانیکی را در مقطع کارشناسی گذرانده باشد؛ در نتیجه، این فصل شامل مباحث ابتدایی تئوری دینامیک و ارتعاشات است. با ارائه مثال‌هایی از سیستم‌های جرم و فنر، مفهوم ماتریس جرم یا اینرسی توسعه بخشیده شده و سپس به اجسام پیوسته بسط داده شده است. ماتریس‌های جرم متمرکز و پیوسته تعریف شده و در مثال‌ها از آن استفاده شده است. آنالیز مودال^۱ روش پایه‌ای برای پاسخ دینامیکی سازه‌ها است؛ بنابراین، بخش قابل توجهی از مطالب ارائه شده در این فصل به تعیین مودهای طبیعی^۲، تعامد^۳ و برهم نهی مودها^۴ اختصاص داده شده است. ترکیبی از روش تفاضلات متناهی^۵ و روش اجزای محدود برای حل مسائل سازه‌ای دینامیکی گذرا^۶ مورد استفاده قرار گرفته است.

بخش ۲ مباحث پیرامون مبانی ANSYS را در بر می‌گیرد. در طول این بخش، خواننده علاوه بر یافتن اطلاعاتی پیرامون نرم‌افزار ANSYS و قابلیت‌های آن، مفاهیم اصلی و پایه‌ای آن را مورد مطالعه قرار می‌دهد و در ادامه با روش آنالیز در ANSYS آشنا می‌شود.

فصل ۳ مقدمات لازم جهت شروع یک آنالیز در نرم‌افزار ANSYS را توصیف می‌کند. این فصل از اطلاعاتی در مورد خود نرم‌افزار شروع می‌شود و در ادامه به نحوه‌ی اجرای ANSYS، محیط شبیه‌سازی، انواع قابلیت‌های کلی آن، فایل‌های ANSYS و غیره می‌پردازد.

فصل ۴ مباحث پایه‌ای ANSYS را معرفی می‌کند. در این فصل نحوه‌ی نمایش موضوعات و چاپ آنها، معرفی دستگاه‌های مختصات موجود در ANSYS و منطق انتخاب مورد بحث قرار گرفته است.

فصل ۵ با توصیف روش آنالیز عمومی در ANSYS شروع می‌شود. این آنالیزها به‌طور تخصصی به سه آنالیز مودال، هارمونیک و دینامیکی گذرا بسط داده شده و هر یک از این آنالیزها به همراه جزئیات مفهومی و پایه‌ای آنها به تفصیل شرح داده شده است.

بخش ۳ اختصاص به آموزش‌های ANSYS دارد. مباحث در بر گرفته شده جمعاً شامل سه قسمت و چهار فصل است. این قسمت‌ها عبارتند از: ارتعاشات، دینامیک و مباحث منتخب.

قسمت ۱ در برگیرنده‌ی مباحث ارتعاشات و مثال‌هایی در ارتباط با آن است. این قسمت شامل دو فصل می‌باشد که در اولین فصل آن (فصل ۶) ارتعاشات آزاد و در دومین فصل (فصل ۷) ارتعاشات اجباری با نرم‌افزار ANSYS در قالب چندین مثال آموزش داده شده است.

فصل ۶ که بخش قابل توجهی از کتاب را به خود اختصاص داده، مربوط به تکنیک‌های مختلف در آنالیز ارتعاشات آزاد (آنالیز مودال) می‌باشد. مثال‌های بسیار متنوعی در این فصل ارائه شده که

-
1. Modal Analysis
 2. Natural Modes
 3. Orthogonality
 4. Moed superposition
 5. Finite difference method
 6. Transient dynamics

بسیاری از آنها در سطح جهان کم نظیر است. از جمله مباحث مطرح شده در این فصل می‌توان به ارتعاشات کوپل سازه سیال، ارتعاشات سازه‌های میکروالکترومکانیکی^۱ (MEMS)، کنترل فعال^۲ ارتعاشات، تحلیل پیزوالکتریک‌ها^۳، و غیره اشاره کرد.

فصل ۷ ارتعاشات اجباری را در قالب مثال تشریح می‌کند. سعی شده تا جنبه‌های مختلف آنالیز پاسخ هارمونیک در این مثال‌ها به تصویر کشیده شود ولی با توجه به اینکه پایه و اساس این فصل، فصل قبل می‌باشد از تکرار مسائل فصل قبل خودداری شده است.

قسمت ۲ در برگیرنده‌ی آنالیز دینامیکی گذراست و فصل هشتم را شامل می‌شود.

فصل ۸ بسیاری از تکنیک‌های رایج در آنالیزهای دینامیکی گذرا در این فصل در قالب مثال‌های متعدد به تصویر کشیده شده است. برخی از این مثال‌ها عبارتند از بررسی پاسخ دینامیکی غیر خطی سیستم جرم و فنر، تحلیل دینامیکی یک مکانیزم چهار لینیکی، پاسخ دینامیکی یک تیر کامپوزیتی به ضربه وارد شده و شبیه‌سازی دو بعدی فیلترهای امواج آکوستیک سطحی^۴.

قسمت ۳ شامل برخی مباحث منتخب در حوزه علم دینامیک و ارتعاشات می‌باشد.

فصل ۹ قابلیت ویژه نرم افزار ANSYS در تحلیل تقارن چرخه‌ای را به تصویر کشیده و با آموزش مثالی مفهوم آن را برای خواننده روشن می‌سازد.

در اینجا لازم می‌دانم تا از تمامی افرادی که به صورت مستقیم و غیر مستقیم در نوشتن این کتاب مرا یاری نمودند تشکر کنم. بنابراین لازم است از پدر و مادر و برادران و خواهر عزیزم به خاطر صبر و مهربانی‌شان و درک آنها تشکر کنم. همچنین از دکتر سید محمد مهدی نجفی زاده و دکتر سعید جعفری مهر آبادی به خاطر جهت‌دهی به سمت گرایش مورد علاقه‌ام در علم مکانیک سپاسگزاری می‌کنم. به علاوه از دکتر نیما راسخ صالح که پایه‌های دانش نرم‌افزار ANSYS را برایم ساختند، تشکر می‌کنم

محمد رفیعی

پاییز ۱۳۹۰

mrafiee20@gmail.com

1. Micro electro Mechanical system
2. Active control
3. Piego electric
4. SAW, Surface Acountic Waves

فهرست مطالب

بخش ۱ مبانی روش اجزای محدود و کاربرد آن در دینامیک سازه‌ها

فصل ۱ مفاهیم پایه در روش اجزای محدود ۳

مقدمه ۳	۱.۱
روش اجزای محدود چگونه کار می‌کند؟ ۴	۲.۱
روش عمومی برای آنالیز اجزای محدود ۱۲	۳.۱
تاریخچه‌ی مختصری از روش اجزای محدود ۱۳	۴.۱
مثال‌هایی از آنالیز اجزای محدود ۱۴	۵.۱
منابع و مراجع فصل اول ۱۷	

فصل ۲ مبانی روش اجزای محدود در دینامیک و ارتعاشات

سازه‌ها ۱۹

مقدمه ۱۹	۱.۲
نوسانگر هارمونیک ساده ۲۰	۲.۲
سیستم‌های چند درجه آزادی ۲۸	۳.۲
المان‌های میله: ماتریس جرم توزیعی ۳۸	۴.۲
المان‌های تیر ۴۴	۵.۲
ماتریس جرم برای یک المان عمومی: معادلات حرکت ۴۸	۶.۲
تعامل مودهای اصلی ۵۵	۷.۲
پاسخ هارمونیک با استفاده از برهم نهی مود ۵۹	۸.۲
اتلاف انرژی: میرایی سازه‌ای ۶۲	۹.۲
پاسخ دینامیکی گذرا ۷۱	۱۰.۲

۷۳	ماتریس جرم المان میله در سازه‌ی خرپای دو بعدی	۱۱.۲
	ملاحظات عملی ۸۱	۱۲.۲
	جمع‌بندی ۸۳	۱۳.۲
۸۳	منابع و مراجع فصل دوم	
	مسائل فصل دوم ۸۴	

بخش ۲ مبانی ANSYS

فصل ۳ مبانی ANSYS ۸۹

	درباره‌ی ANSYS ۸۹	۱.۳
۹۰	چرا از ANSYS استفاده می‌کنیم؟	۲.۳
	اجرای ANSYS ۹۱	۳.۳
	فایل‌های ANSYS ۹۲	۴.۳
۹۲	نکات مربوط به File Management	۵.۳
	تعیین وسیله‌ی گرافیکی ۹۳	۶.۳
	ANSYS Workbench ۹۴	۷.۳
۹۵	واسط کاربر گرافیکی ANSYS (ANSYS GUI)	۸.۳
	استفاده از راهنما (Help) ۹۸	۹.۳

فصل ۴ مباحث پایه‌ای ANSYS ۹۹

	رسم ۹۹	۱.۴
	چاپ ۹۹	۲.۴
	دستگاه‌های مختصات ۱۰۱	۳.۴
	منطق انتخاب ۱۰۳	۴.۴

فصل ۵ روش آنالیز عمومی در ANSYS ۱۰۵

	روش آنالیز عمومی ۱۰۵	۱.۵
	روش آنالیز مودال ۱۱۰	۲.۵

۳.۵ روش آنالیز پاسخ هارمونیک ۱۲۴

۴.۵ روش آنالیز دینامیکی گذرا ۱۲۸

بخش ۳ آموزش‌های ANSYS

فصل ۶ ارتعاشات آزاد ۱۳۷

- مثال ۱۶ ارتعاشات سیستم سه درجه‌ی آزادی جرم و فنر خطی ۱۳۷
- مثال ۲۶ ارتعاشات یک اتصال صلب چسبیده به سیستم جرم و فنر ۱۴۸
- مثال ۳۶ محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد ارتعاشات طولی میله با سطح مقطع متغیر ۱۵۴
- مثال ۴۶ ارتعاشات عرضی تیر اویلر- برنولی بر روی تکیه‌گاه الاستیک ۱۵۸
- مثال ۵۶ آنالیز فرکانسی پیش‌تنش ورق مستطیلی سوراخ‌دار ۱۶۶
- مثال ۶۶ تحلیل ارتعاشات سه بعدی قطاعی از ورق دایره‌ای ۱۸۶
- مثال ۷۶ کنترل فعال ارتعاشات تیر ایزوتروپیک هوشمند با محرک پیزوالکتریک ۱۹۷
- مثال ۸۶ ارتعاشات سازه‌ی میکروالکترومکانیکی (MEMS) شامل تیر سیلیکونی تیموشنکو ۲۰۴
- مثال ۹۶ ارتعاشات تداخل سازه سیال یک تیر آزاد غوطه‌ور در آب ۲۱۴
- مثال ۱۰۶ ارتعاشات آزاد هیدروالاستیک دو ورق دایره‌ای یکسان کوپل شده با سیال بین آن ۲۲۴

فصل ۷ ارتعاشات اجباری ۲۳۱

- مثال ۱۷.۷ پاسخ یک سیستم دو درجه آزادی همراه با جاذب ارتعاشات به نیروی هارمونیک ۲۳۱
- مثال ۲۷.۷ ارتعاشات اجباری ورق حلقوی با شرایط مرزی گیردار در هر دو لبه ۲۴۲

فصل ۸ دینامیک ۲۴۵

- مثال ۱۸ تحلیل پاسخ دینامیکی گذرای قطاعی از یک ورق دایره‌ای گیردار به نیروی وابسته به زمان ۲۴۵
- مثال ۲۸ تحلیل دینامیکی غیرخطی یک سیستم جرم و فنر ۲۵۹
- مثال ۳۸ تیر کامپوزیتی دو لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای بر روی تکیه‌گاه ساده ۲۶۶

مثال ۴.۸ تحلیل دینامیکی گذرای مکانیزم چهار میله‌ای ۲۷۵
مثال ۵.۸ شبیه‌سازی دو بعدی فیلترهای موج آکوستیک سطحی (SAW) با استفاده از
ANSYS ۲۷۹

فصل ۹ آنالیز تقارن چرخه‌ای مودال ۳۰۷

۱.۹ مرور کلی بر مفهوم تقارن چرخه‌ای ۳۰۷
مثال ۱.۹ تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای سوراخ‌دار یک طرف گیردار با استفاده از
قابلیت تقارن چرخه‌ای ۳۱۷

فهرست الفبایی ۳۳۱

بخش ۱

مبانی روش اجزای محدود و کاربرد آن در دینامیک سازه‌ها

دو فصل بخش ۱ مبانی روش اجزای محدود و روابط آن در دینامیک و ارتعاشات سازه‌ها را در برمی‌گیرد. محتویات این فصل‌ها چون مبانی روش اجزای محدود هستند، برای کاربران نرم‌افزارهای آنالیز اجزای محدود می‌تواند بسیار کارآمد باشد. فصل ۱ مقدمه‌ای از روش اجزای محدود را معرفی می‌کند. فصل ۲ نیز کاربرد روش اجزای محدود در دینامیک سازه را مورد بررسی قرار می‌دهد.