

تحلیل اجزا محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از MATLAB و ABAQUS

جلد اول

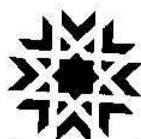
ترجمه و تالیف
آرش رستمی



www.elmehran.com

www.elmehran.com
Info@elmehran.com

عضو:



نشریه کتاب‌های

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	: رستمی، آرش، ۱۳۶۸ -
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل اجزا محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از abaqus و matlab / ترجمه و تالیف آرش رستمی
مشخصات نشر	: تهران: علم عمران، ۱۳۹۶ -
مشخصات ظاهری	: ج. : مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۳۹۰۰۰۰ ریال : ج. ۱ ۱-۳۹-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸؛ ۱۲۰۰۰۰۰ ریال: دوره ۷-۴۰-۵۷۷۶-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: روش المان‌های محدود — نرم‌افزار، آباکوس، متلب
موضوع	: Finite elements method -- Software MATLAB , Abaqus (Electronic resource)
رده بندی کنگره	: TAT۴۷/۹,۵ ۱۳۹۶
رده بندی دیویی	: ۶۲۰/۰۰۱۵۱۸۲۵
شماره کتابشناسی	: ۴۹۰۱۳۲۱



نشر علم عمران

تحلیل اجزا محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از ABAQUS و MATLAB (جلد اول)
ترجمه و تالیف: آرش رستمی

چاپ اول	پاییز ۱۳۹۶
چاپ	پرستش
تعداد و قطع صفحات	۵۶۸ صفحه وزیری
شمارگان	۱۰۰۰
بهای کتاب	۳۹۰۰۰۰ ریال
شابک دوره ۷-۴۰-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-40-7
شابک ۱-۳۹-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸	ISBN 978-600-5176-39-1

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان‌آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱

تلفن: ۸۸۳۵۳۹۳۰-۳۱ دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

در حال حاضر در دنیای مهندسی یکی از روش‌های حل معادلات و مسائل در حوزه‌های مختلف روش‌های عددی من جمله المان محدود و یا اجزاء محدود می‌باشد، که به سرعت در حال گسترش هستند. در این راستا نرم‌افزارهای متعددی توسط دانشمندان، محققان و شرکت‌های تجاری تولید و روانه بازار شده‌اند، ولی در این میان می‌توان گفت که نرم‌افزار Abaqus به حق جز یکی از بهترین نرم‌افزارهای حال حاضر در این عرصه می‌باشد. این نرم‌افزار اولین بار ۱۹۸۷ به بازار آمد و از آن پس تا کنون ورژن‌های متعددی از آن را اختار کاربران قرار گرفته است. Abaqus در زبان لاتین به معنی چرتکه می‌باشد. از ویژگی‌های خاص نرم‌افزار Abaqus، به روز شدن آن، اضافه شدن ماژول‌ها و حلگرهای مختلف به این نرم‌افزار در کنار کدنویسی، برنامه پایتون به حق این نرم‌افزار را سرآمد دیگر محصولات موجود کرده است. با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های مقاطع کارشناسی ارشد، دکتری و حتی دوره کارشناسی نیازمند نرم‌افزارهای عددی و تحلیل می‌باشد، این نرم‌افزار قادر است در اکثر رشته‌ها پاسخگوی نیاز محققین باشد. این نرم‌افزار با توجه به اثر کار این یک نرم‌افزار مخصوص مهندسين می‌باشد، این در حالی است که کاربردها و استفاده‌های علاوه بر این، چون پزشکی قدرت و قابلیت این نرم‌افزار را یک سر و گردن از دیگر نمونه‌های موجود نشان می‌دهد. این نرم‌افزار در حال حاضر به طور کامل محصول مشابه خود یعنی نرم‌افزار انسیس را از رده خارج کرده و تمایل محققان به این محصول را بیشتر کرده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه آباکوس قابلیت برنامه‌نویسی کدنویسی را نیز دارا می‌باشد محصول جایگزین این نرم‌افزار به نظر بنده تا چندین سال بعد نیز قدرت و رضایت‌مندی در مقابل این نرم‌افزار را نخواهد داشت. جدا از ویژگی‌های مطرح شده برای این محصول، قدرت و قابلیت و دقت بسیار بالا در نتایج قابلیت مدل کردن رفتارهای مختلف مواد مانند فلزات، مواد منفجره، کامپوزیت‌ها، سیالات، بتن مسلح، خاک، پلاستیک‌ها، فوم‌ها و حتی اعضای بدن موجب گسترش و محبوبیت این نرم‌افزار در میان دانشجویان محققین و اساتید شده است.

کتابی که پیش روی شماست یکی از ۳ جلد و اولین جلد از این سری می‌باشد. این کتاب جلد اول از مجموعه سری «تحلیل اجزاء محدود و بهینه‌سازی مدل با استفاده از Abaqus و MATLAB» می‌باشد. خوشبختانه در حال حاضر کتب بسیار مفید و ارزشمندی توسط اساتید و محققین در مورد نرم‌افزار Abaqus در میهن عزیزمان نگارش شده که به حق دارای محتوای مناسب و کاربردی می‌باشند. این سری کتب کاملاً متفاوت از دیگر آثار موجود بوده و اندکی قدم فراتر نهاده و به لینک و ادغام چند نرم‌افزار پرداخته است. این سری ویژگی‌های متمایزی نسبت به دیگر آثار دارد و در واقع در مورد کدنویسی در MATLAB و Abaqus و در جلد سوم کدنویسی در Abaqus، MATLAB و Python و ادغام آن‌ها جهت افزایش سرعت محاسبات و نیز انجام برخی تحلیل‌های خاص پرداخته است. جلد اول و فی‌الواقع کتاب حاضر بر اساس کتاب آقای عمار خنان بنا نهاده شده و به همین دلیل جلد سری کتب نیز بر این اساس طراحی

گردیده است. جلد اول مقدمه و گام ابتدایی در راستای اهداف سری کتب می باشد. در جلد اول خواننده با اصول اولیه و ابتدایی کدنویسی دستورات Abaqus در MATLAB آشنا می شود. با توجه به تمرکز این سری بر نرم افزار آباکوس توصیه می شود خواننده قبل از مطالعه این سری آشنایی و مهارت لازم را در مورد نحوه کدنویسی در نرم افزار MATLAB کسب نماید. این جلد مقدمات و اصول پایه را برای خواننده شرح داده و کاربر را برای مجله های بعدی که مباحث تکمیلی و سنگین ارایه می شوند آماده می نماید. در جلد دوم و سوم که به ترتیب مرحله پیشرفته و حرفه ای می باشند، کدنویسی و مدلسازی را بر اساس اصول بهینه سازی و الگوهای متداول و خاص بهینه سازی از جمله الگوی شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک کدهایی همچون رگرسیون، کرم شب تاب و... شرح داده شده و لینک ها و کدهای مرتبط به تفصیل بیان شده است. خواننده بتواند به واسطه این کدها در برخی از مدلسازی ها که قابلیت بهینه کردن مدل در آن ها وجود دارد کار خود را پیش ببرد. در جلد سوم و مرحله حرفه ای گام را اندکی بیشتر فراتر برداشته و سه نرم افزار Python، Abaqus و MATLAB را آموزش داده ایم. مباحث بیان شده در این سه جلد و به خصوص جلد دوم و سوم به گونه ای است که کاملاً دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری و نیز فوق دکتری با توجه به اهمیت موضوع بهینه سازی کاملاً اقناع می نمایند. همچنین با امید به ایزد منان این سری تا اواسط سال ۲۰۱۷ میلادی به زودی تکمیل می شود و چاپ خواهند شد.

در پایان لازم می دانم از آقای مهندس عرفان بابین پیشنهاد انجام این آثار تشکر کنم و نیز از دفتر فنی پایتخت (فولادی) که زحمت تایپ را بر عهده گرفتند و نیز خانم سارا رستمی (کانون تبلیغاتی نقش واره) که زحمت طراحی جلد و صفحه آرایی کتاب را تقبل کردند تشکر و قدردانی نمایم و همچنین از دوستانم که اجازه دادند مقدمه این اثر به نگارش بنده باشد.

آرش، شهریور، ۱۳۹۵

مقدمه چاپ و ویرایش دوم

به نام یگانه مهندس گیتی

نرم افزار قدرتمند ABAQUS در سال های اخیر با سرعت زیادی اکثر رقبای خود را کنار زد و هم اکنون به عنوان اولین و مورد قبول ترین نرم افزار اجزا محدود در سرتاسر جهان شناخته می شود. این نرم افزار با توجه به ورژن های اخیر که وارد بازار شده و نیز قابلیت کدنویسی و نیز روش های حل که به آن افزوده شده بی شک محصولی بی رقیب در بازار می باشد. کتاب «تحلیل اجزا محدود و بهینه سازی مدل با استفاده از MATLAB و ABAQUS» اولین جلد از کتاب سه جلدی با همین عنوان می باشد. جلد اول این کتاب با استقبال خوبی در جامعه دانشجویی و دانشگاهی قرار گرفت و توانست در مدت کوتاهی، فروش رسیده و مخاطبان را با سرفصل های جدیدی آشنا نماید. ویرایش دوم و نیز چاپ دوم جلد اول بدون تردید همان مطالب جلد اول و ویرایش اول کتاب می باشد. ولی در مورد دو جا بعدی با توجه به استقبال خوانندگان نویسنده را به شدت به تکاپو انداخت تا مطالب بسیار جدیدی را به دست آوردی که تا کنون در هیچ کتاب، مقاله، سایت و منبعی معرفی نشده به علاقه مندان ارائه دهد. جلد دوم و سوم مختص اساتید و دانشجویانی است که علاقه مند کارهای پژوهشی هستند و تخصص آنها به سمت سازی مدل و مدلسازی می باشد. در جلد دوم و سوم که به امید خداوند متعال به جد در حال تهیه آن هستیم تا انتهای سال ۹۶ به بازار عرضه خواهد شد و یقین دارم با توجه به سرفصل ها و مطالب بسیار جدیدی که علاوه بر گرفته از مقالات و پژوهش های سال های اخیر محققین مطرح دنیا در رشته های عمران، مکانیک، هوافضا، برق و متالورژی می باشد، دانشجویان اساتید و محققان کشور عزیزم را کمک شایان توجهی در راستای ارائه پژوهش های بسیار نوآورانه خواهد داشت. از سمتی چون چنین کتابی در دیگر مراجع خارجی وجود ندارد ترجمه همزمان دو جلد بعدی نیز در حال انجام می باشد تا به صورت هم زمان در زبان فارسی و انگلیسی به چاپ برسد. دوستانی در تهیه این اثر و در مدت تدوین آن این بنده را بسیار مساعدت نمودند که جای دارد از همین جا از این عزیزان تشکر و قدردانی نمایم. سرکار خانم فوری (دانش فنی پایتخت) بابت قبول زحمت تایپ، سرکار خانم رستمی (کانون تبلیغاتی نقش واره) بابت صفحه آرایی و ده ست و همکار عزیز جناب آقای دکتر داودنبی مدیر مسوول انتشارات علم عمران که در تهیه این اثر بیشتر از بنده حقیر تلاش نمودند. از خوانندگان عزیز تقاضا دارم انتقادات پیشنهادات و نقطه نظرات خود را در خصوص کتاب به آدرس ایمیل Civil.Rostami.Books@gmail.com ارسال نمایند تا در ویرایش های بعدی لحاظ گردد. همچنین در وبسایت شخصی اینجانب به آدرس www.ArashRostami.com نیز مطالب مرتبط و به روز شده در دسترس عزیزان می باشد.

آرش رستمی

مهرماه ۱۳۹۶

فهرست مطالب

۲۱	فصل اول مقدمه
۲۳	پیش‌گفتار
۲۳	تحلیل اجزاء محدود و کاربر
۲۴	هدف از نگارش کتاب
۲۵	ساختار کتاب
۲۷	فصل دوم المان میله‌ای
۲۹	۱-۲-۱ مقادیر
۲۹	۲-۲-۱ المان یک‌سوی خرد
۳۲	۱-۲-۲ مول‌های ماتریس سختی: روش مستقیم
۳۵	۲-۲-۲ المان خردی دوبندی
۳۵	۳-۲-۲ تجميع ماتریس سختی کل
۳۵	۱-۳-۲ گسسته‌سازی
۳۷	۲-۳-۲ ماتریس‌های سختی المان‌ها در مختصات محلی
۳۷	۳-۳-۲ ماتریس‌های سختی المان‌ها در مختصات کلی
۳۷	۱-۳-۳-۲ المان ۱
۳۸	۲-۳-۳-۲ المان ۲
۳۹	۳-۳-۳-۲ المان ۳
۳۹	۴-۳-۲ اسمبل ماتریس کلی
۴۰	۱-۴-۳-۲ فقط المان ۱ وجود دارد
۴۰	۲-۴-۳-۲ فقط المان ۲ وجود دارد
۴۰	۳-۴-۳-۲ فقط المان ۳ وجود دارد
۴۱	۵-۳-۲ اسمبل بردار نیروی کلی
۴۱	۴-۲ شرایط مرزی
۴۳	۱-۴-۲ مورد کلی
۴۴	۵-۲ راه حل سیستم معادلات
۴۴	۶-۲ واکنش‌های تکیه‌گاهی
۴۶	۷-۲ نیروهای اعضا
۴۷	۸-۲ برنامه کامپیوتری: Truss.m
	۱-۸-۲ آماده‌سازی داده‌ها

۴۷	۲-۸-۱-۱ مختصات گره‌ها
۴۷	۲-۸-۱-۲ اتصال المان‌ها
۴۷	۲-۸-۱-۳ خواص ماده‌ای و هندسی
۴۷	۲-۸-۱-۴ شرایط مرزی
۴۸	۲-۸-۱-۵ بارگذاری
۴۹	۲-۸-۲ ماتریس‌های المان
۴۹	۲-۸-۲-۱ ماتریس سختی در مختصات محلی
۴۹	۲-۸-۲-۲ ماتریس تبدیل
۴۹	۲-۸-۲-۳ ماتریس سختی در مختصات کلی
۵۰	۲-۸-۳ بردار «راهنما»
۵۰	۲-۸-۳-۱ اسکالر ماتریس سختی کلی
۵۰	۲-۸-۳-۲ اسمبل بردار نیروی بی
۵۰	۲-۸-۳-۵ حل معادلات سیستم کلی
۵۱	۲-۸-۳-۶ جایجایی‌های گره‌ای
۵۱	۲-۸-۳-۷ نیروهای المان
۵۲	۲-۸-۳-۸ اسکریپت برنامه
۵۵	۳-۹-۲ مسایل
۵۵	۳-۹-۲-۱ مسئله ۱-۲
۶۰	۳-۹-۲-۲ مسئله ۲-۲
۶۳	۲-۱۰-۲ تحلیل یک نمونه خرابا با استفاده از ABAQUS
۶۳	۲-۱۰-۲-۱ مروری بر ABAQUS
۶۵	۲-۱۰-۲-۲ تحلیل یک خرابا با استفاده از نسخه تعاملی ABAQUS
۶۵	۲-۱۰-۲-۱-۲ مدل‌سازی
۶۵	۲-۱۰-۲-۲-۲ تحلیل
۹۲	۲-۱۰-۳ تحلیل خرابا با ویرایش نسخه کلمات کلیدی Abaqus KEYWORD
۹۹	فصل سوم المان تیر
۱۰۱	۳-۱-۳ مقدمه
۱۰۲	۳-۲-۲ ماتریس سختی
۱۰۶	۳-۳-۳ بارگذاری یکنواخت توزیع شده
۱۱۰	۳-۴-۴ مفاصل داخلی
۱۱۲	۳-۵-۵ برنامه کامپیوتری: beam.m

۱۱۲	۳-۵-۱ آماده سازی داده‌ها
۱۱۲	۳-۵-۱-۱ مختصات گره‌ها
۱۱۳	۳-۵-۱-۲ اتصال المان‌ها
۱۱۳	۳-۵-۱-۳ ویژگی‌های هندسی و مواد
۱۱۳	۳-۵-۱-۴ شرایط مرزی
۱۱۴	۳-۵-۱-۵ مفاصل داخلی
۱۱۴	۳-۵-۱-۶ اعمال بارگذاری
۱۱۵	۳-۵-۱-۷ ماتریس سختی
۱۱۶	۵-۱ اسمبل سیستم کلی معادلات
۱۱۶	۵-۳ جابجایی‌های گره‌ای
۱۱۶	۳-۵-۴ نیروهای داخلی
۱۲۱	۳-۶ مسایل
۱۲۱	۳-۶-۱ مسئله ۱-۱
۱۲۲	۳-۶-۲ مسئله ۲-۲
۱۲۷	۳-۶-۳ مسئله ۳-۳
۱۳۰	۳-۷ تحلیل یک تیر ساده با آباکوس
۱۳۰	۳-۷-۱ نسخه تعاملی
۱۴۳	۳-۷-۲ تحلیل یک تیر با نسخه کلمات کلیدی آباکوس
۱۴۷	فصل چهارم قاب‌های مفصلی صلب
۱۴۹	۴-۱ مقدمه
۱۴۹	۴-۲ ماتریس سختی یک المان تیر-ستون
۱۴۹	۴-۳ ماتریس سختی المان تیر-ستون در حضور انتهای مفصلی
۱۵۰	۴-۴ سیستم‌های مختصات محلی و کلی
۱۵۱	۴-۵ اسمبل و حل ماتریس سختی کلی برای جابجایی‌های مجهول
۱۵۱	۴-۵ برنامه کامپیوتری: frame.m
۱۵۱	۴-۶-۱ آماده‌سازی داده‌ها
۱۵۲	۴-۶-۱-۱ مختصات گره‌ها
۱۵۲	۴-۶-۱-۲ اتصال المان‌ها
۱۵۲	۴-۶-۱-۳ ویژگی‌های خواص هندسی و ماده‌ای
۱۵۲	۴-۶-۱-۴ شرایط مرزی
۱۵۳	۴-۶-۱-۵ مفاصل داخلی

۱۵۳	۴-۱-۶ بارگذاری
۱۵۴	۴-۲-۶ ماتریس‌های المان
۱۵۴	۴-۲-۱ ماتریس سختی با مختصات محلی
۱۵۵	۴-۲-۲ ماتریس تبدیل
۱۵۵	۴-۲-۳ ماتریس سختی در مختصات کلی
۱۵۵	۴-۲-۴ بردار «راهنما»
۱۵۵	۴-۲-۵ بارهای المان
۱۵۶	۴-۲-۶ اسمبل ماتریس سختی کلی
۱۵۶	۴-۲-۷ راه حل سیستم کلی معادلات
۱۵۶	۴-۲-۸ جابجایی‌های گره‌ای
۱۵۶	۴-۲-۹ نیروهای المان
۱۶۷	۴-۷-۱ تحلیل یک قاب ساده - ابعاد
۱۶۷	۴-۷-۲ نسخه تعاملی
۱۷۶	۴-۷-۳ نسخه کلمه کلید
۱۷۹	فصل پنجم تحلیل تنش و کرنش
۱۸۱	۵-۱ مقدمه
۱۸۱	۵-۲ تانسور تنش
۱۸۱	۵-۲-۱ تعریف
۱۸۳	۵-۲-۲ روابط بین بردار تنش - تانسور تنش
۱۸۵	۵-۲-۳ تبدیل تانسور تنش
۱۸۶	۵-۲-۴ معادلات تعادل
۱۸۷	۵-۲-۵ تنش‌های اصلی
۱۸۸	۵-۲-۶ تنش فون مایس
۱۸۹	۵-۲-۷ اجزای نرمال و تانژانتی بردار تنش
۱۹۰	۵-۲-۸ دایره موهر برای تنش
۱۹۱	۵-۲-۹ نمایش مهندسی تنش
۱۹۲	۵-۳ تغییرشکل و کرنش
۱۹۲	۵-۳-۱ تعریف
۱۹۳	۵-۳-۲ تعارف لاگرانژی و اویلری
۱۹۴	۵-۳-۳ جابجایی
۱۹۵	۵-۳-۴ شیب‌های جابجایی و تغییرشکل

۱۹۷	۵-۳-۵ ماتریس کرنش لاگرانژ گرین
۱۹۹	۶-۳-۵ تئوری تغییر شکل کوچک
۱۹۹	۱-۶-۳-۵ کرنش بی‌نهایت کوچک
۲۰۰	۲-۶-۳-۵ تفسیر هندسی عبارات تانسور کرنش
۲۰۲	۳-۶-۳-۵ شرایط سازگاری
۲۰۲	۷-۳-۵ کرنش‌های اصلی
۲۰۲	۸-۳-۵ تبدیل تانسور کرنش
۲۰۳	۹-۳-۵ نمایش مهندسی کرنش
۲۰۴	۴-۵ روابط ساختاری تنش-کرنش
۲۰۴	۱-۴-۵ قانون کلی هوک
۲۰۵	۲-۴-۵ کرن‌های ساده
۲۰۵	۱-۴-۵ تقارن با توجه به صفحه
۲۰۷	۲-۴-۵ تقارن با توجه به صفحات متعامد یا عمود بر هم
۲۰۷	۳-۲-۴-۵ تدرن ج. ش. با توجه به یک محور
۲۰۸	۳-۴-۵ ماده ایزوتروپیک
۲۱۰	۱-۳-۴-۵ مدول الاستیسیته
۲۱۰	۲-۳-۴-۵ نسبت پواسون
۲۱۰	۳-۳-۴-۵ مدول برشی
۲۱۱	۴-۳-۴-۵ مدول حجمی
۲۱۲	۴-۴-۵ تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای
۲۱۴	۵-۵ مسایل حل شده
۲۱۴	۱-۵-۵ مسئله ۱-۵
۲۱۴	۲-۵-۵ مسئله ۲-۵
۲۱۷	۳-۵-۵ مسئله ۳-۵
۲۱۸	۴-۵-۵ مسئله ۴-۵
۲۲۰	۵-۵-۵ مسئله ۵-۵
۲۲۱	۶-۵-۵ مسئله ۶-۵
۲۲۲	۷-۵-۵ مسئله ۷-۵
۲۲۴	۸-۵-۵ مسئله ۸-۵
۲۲۷	فصل ششم روش‌های باقیمانده وزنی
۲۲۹	۱-۶ مقدمه

۲۲۹	۲-۶ فرمولاسیون کلی
۲۳۰	۳-۶ روش گالرکین
۲۳۳	۴-۶ شکل ضعیف
۲۳۴	۵-۶ انتگرال گیری بر حسب بخش در دو بعدی ها و سه بعدی ها (قضیه گرین)
۲۳۹	۶-۶ روش ریلیق ریتز
۲۳۹	۱-۶-۶ تعریف
۲۳۹	۲-۶-۶ شکل تابعی مربوط به شکل انتگرالی
۲۴۰	۱-۶-۶ روش رابلی ریتز
۲۴۲	۶-۶ نمونه هایی از اشکال تابع طبیعی
۲۴۹	فصل هفتم تقریب المان محدود
۲۵۱	۱-۷ مقدمه
۲۵۱	۲-۷ تقریب های کلی و گره ای
۲۵۳	۳-۷ تقریب المان محدود
۲۵۶	۴-۷ اصول پایه برای ساخت مدل از الاستیسی
۲۵۶	۱-۴-۷ اصل سازگاری
۲۵۷	۲-۴-۷ اصل تمامیت
۲۵۸	۵-۷ تقریب المان محدود دو بعدی
۲۵۸	۱-۵-۷ المان سه گوش خطی مسطح برای مسایل C
۲۵۸	۱-۱-۵-۷ توابع شکل
۲۶۱	۲-۱-۵-۷ المان مرجع
۲۶۴	۳-۱-۵-۷ مختصات ناحیه ای
۲۶۶	۲-۵-۷ المان چهارضلعی خطی برای مسایل C
۲۶۶	۱-۲-۵-۷ تبدیل هندسی
۲۶۹	۲-۲-۵-۷ نوشتن تابع آزمایشی بر المان چهارضلعی خطی
۲۶۹	۶-۷ توابع شکلی برخی المان های کلاسیک یا سختی برای مسایل C
۲۶۹	۱-۷-۶ المان های تک-بعدی
۲۶۹	۱-۱-۷-۶ المان خطی دو گره ای
۲۷۰	۲-۱-۷-۶ المان درجه دوم سه گره ای
۲۷۰	۲-۷-۶ المان های دو-بعدی
۲۷۰	۱-۲-۷-۶ چهارضلعی دو سویه چهار گره ای
۲۷۱	۲-۲-۷-۶ چهارضلعی درجه دوم هشت گره ای

۲۷۱	۶-۷-۳ مثلث خطی سه گره‌ای
۲۷۱	۶-۷-۴ مثلث درجه دوم شش گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۳ المان‌های سه بعدی
۲۷۲	۶-۷-۳-۱ چهارضلعی خطی چهار گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۳-۲ چهارضلعی درجه دوم ده گره‌ای
۲۷۲	۶-۷-۳-۳ المان مکعب خطی هشت گره‌ای
۲۷۳	۶-۷-۴ المان مکعبی درجه دوم بیست گره‌ای
۲۷۵	فصل هشتم: انتگرال گیری عددی
۲۷۷	۸-۱ مقدمه
۲۷۷	۸-۲ مربع سازی گاوس
۲۷۹	۸-۲-۱ انتگرال گیری در فاصله قراردادی [a,b]
۲۸۱	۸-۲-۲ انتگرال گیری در فاصله بی‌نهایت و سه بعدی‌ها
۲۸۳	۸-۳ انتگرال گیری در یک المان مرجع
۲۸۴	۸-۴ انتگرال گیری در یک المان فیزیکی
۲۸۴	۸-۴-۱ فرمول‌های ساده
۲۸۵	۸-۴-۲ انتگرال گیری عددی در یک المان ده ضلعی
۲۸۶	۸-۵ مسائل حل شده
۲۸۶	۸-۵-۱ مسئله ۱-۸
۲۸۷	۸-۵-۲ مسئله ۲-۸
۲۹۴	۸-۵-۳ مسئله ۳-۸
۳۰۳	فصل نهم: مسائل صفحه‌ای
۳۰۴	۹-۱ مقدمه
۳۰۷	۹-۲ فرمول بندی المان محدود برای مسائل صفحه‌ای
۳۰۹	۹-۳ گسسته سازی فضایی
۳۰۹	۹-۴ مثلث کرنشی ثابت
۲۹۱	۹-۴-۱ حوزه جابجایی
۳۱۰	۹-۴-۲ ماتریس کرنش
۳۱۰	۹-۴-۳ ماتریس سختی
۳۱۱	۹-۴-۴ بردار نیروی المان
۳۱۱	۹-۴-۴-۱ نیروهای جسم
۳۱۲	۹-۴-۴-۲ نیروهای انقباضی

۳۱۳	۳-۴-۴-۹ نیروهای متمرکز
۳۱۳	۵-۴-۹ برنامه‌های کامپیوتری با استفاده از مثلث کرنشی ثابت
۳۱۴	۱-۵-۴-۹ آماده کردن داده‌ها
۳۱۶	۲-۵-۴-۹ مختصات گرمای
۳۱۶	۳-۵-۴-۹ پیوستگی المان
۳۱۶	۴-۵-۴-۹ خواص ماده
۳۱۷	۵-۵-۴-۹ شرایط مرزی
۳۱۷	۶-۵-۴-۹ بارگذاری
۳۱۷	۷-۵-۴-۹ برنامه اصلی
۳۱۹	۵-۴-۹ ماتریس سختی المان
۳۲۰	۴-۵-۹ ابعاد و جابجایی کلی
۳۲۰	۱-۵-۴-۹ سیستم کلی معادلات
۳۲۰	۱۱-۵-۴-۹ جابجایی‌های
۳۲۰	۱۲-۵-۴-۹ تنش و کرنش در المان
۳۲۰	۱۳-۵-۴-۹ نتایج و بحث
۳۲۳	۱۴-۵-۴-۹ برنامه ایجاد خودکار مش
۳۲۸	۶-۴-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از CST
۳۲۸	۱-۶-۴-۹ نسخه تعاملی
۳۳۷	۲-۶-۴-۹ نسخه کلمات کلیدی
۳۴۱	۵-۹ مثلث کرنشی خطی
۳۴۲	۱-۵-۹ حوزه جابجایی
۳۴۳	۲-۵-۹ ماتریس کرنشی
۳۴۴	۳-۵-۹ ماتریس سختی
۳۴۴	۴-۵-۹ برنامه کامپیوتری: LST_PLANE_STRANE_MESH.m
۳۴۸	۱-۴-۵-۹ انتگرال‌گیری عددی از ماتریس سختی
۳۵۰	۲-۴-۵-۹ محاسبه تنش‌ها و کرنش‌ها
۳۵۱	۵-۵-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از LST
۳۵۱	۱-۵-۵-۹ نسخه تعاملی
۳۵۸	۲-۵-۵-۹ نسخه کلمات کلیدی
۳۵۹	۶-۹ چهارضلعی دوسویه
۳۵۹	۱-۶-۹ حوزه جابجایی

۳۶۱	۲-۶-۹ ماتریس کرنشی
۳۶۲	۳-۶-۹ ماتریس سختی
۳۶۲	۴-۶-۹ بردار نیروی المان
۳۶۴	۵-۶-۹ برنامه کامپیوتری: PLANE_STRESS.m_Q4
۳۶۵	۱-۵-۶-۹ آماده سازی داده ها
۳۶۷	۲-۵-۶-۹ برنامه اصلی
۳۷۰	۳-۵-۶-۹ انتگرال گیری ماتریس سختی
۳۷۱	۴-۵-۶-۹ محاسبه تنش ها و کرنش ها
۳۷۲	۵-۵-۶-۹ برنامه ایجاد خودکار شبکه
۳۷۷	۶-۵-۶-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از چهارضلعی Q4
۳۷۷	۱-۶-۶-۹ نسبت های تعاملی
۳۸۶	۲-۶-۶-۹ نسبت های کلیدی
۳۹۰	۷-۶-۶-۹ چهار ضلعی هشت گره ای
۳۹۰	۱-۷-۹ فرمول نویسی
۳۹۲	۲-۷-۹ نیروهای گره ای معادل
۳۹۲	۳-۷-۹ برنامه PLANE_STRESS.m_Q8
۳۹۷	۱-۳-۷-۹ آماده سازی داده ها
۳۹۷	۲-۳-۷-۹ برنامه اصلی
۳۹۹	۳-۳-۷-۹ انتگرال گیری ماتریس سختی
۳۹۹	۴-۳-۷-۹ نتایج بدست آمده با مش درشت
۴۰۱	۵-۳-۷-۹ برنامه ای برای ایجاد خودکار مش
۴۰۷	۴-۷-۹ تحلیل با آباکوس با استفاده از چهارضلعی Q8
۴۱۳	۸-۹ مسایل حل شده با MATLAB
۴۱۳	۱-۸-۹ ستون نواری با المان CST
۴۱۸	۲-۸-۹ پایه نواری با المان LST
۴۲۴	۳-۸-۹ پایه پل با المان QA
۴۴۱	فصل دهم مسایل تقارن محوری
۴۴۳	۱-۱۰ تعریف
۴۴۳	۲-۱۰ رابطه کرنش جابجایی
۴۴۴	۳-۱۰ روابط تنش-کرنش
۴۴۵	۴-۱۰ فرمول بندی المان محدود

۴۴۵	۱-۴-۱۰ حوزه جابجایی
۴۴۶	۲-۴-۱۰ ماتریس کرنشی
۴۴۶	۳-۴-۱۰ ماتریس سختی
۴۴۶	۴-۴-۱۰ بردارهای نیروی گره‌ای
۴۴۶	۱-۴-۴-۱۰ نیروی چشم
۴۴۶	۲-۴-۴-۱۰ بردار نیروی سطحی
۴۴۷	۳-۴-۴-۱۰ بارهای متمرکز
۴۴۷	۴-۴-۴-۱۰ مثال
۴۴۸	۵-۱۰ برنامه نویسی
۴۵۰	۱-۵-۱۰ برنامه نویسی: m.AXI_SYM_T6
۴۵۴	۱-۵-۱۰ انتگرال گیری عددی ماتریس سختی
۴۵۵	۳-۵-۱۰ نتایج
۴۵۷	۲-۵-۱۰ برنامه نویسی: m.AXI_SYM_Q8
۴۶۱	۱-۲-۵-۱۰ انتگرال گیری عددی از ماتریس سختی
۴۶۲	۲-۲-۵-۱۰ نتایج
۴۶۵	۶-۱۰ تحلیل در آباکوس با استفاده از چارچوب تست گره‌ای
۴۷۱	فصل یازدهم صفحات ضخیم و نازک
۴۷۳	۱-۱۱ مقدمه
۴۷۳	۲-۱۱ صفحات باریک
۴۷۳	۱-۲-۱۱ معادلات دیفرانسیل صفحات تحت بارگذاری خمشی
۴۷۷	۲-۲-۱۱ معادله حاکم بر حسب متغیرهای جابجایی
۴۷۸	۳-۱۱ تئوری صفحه ضخیم یا تئوری صفحه مایلدین
۴۷۹	۱-۳-۱۱ روابط تنش-کرنش
۴۸۰	۴-۱۱ تحلیل المان محدود الاستیک خطی صفحات
۴۸۰	۱-۴-۱۱ فرمولسازی اجزاءمحدود برای صفحات نازک
۴۸۱	۱-۱-۴-۱۱ المان مثلثی
۴۸۳	۲-۱-۴-۱۱ المان مستطیلی
۴۸۴	۲-۴-۱۱ فرمول بندی المان محدود برای صفحات ضخیم
۴۸۶	۵-۱۱ شرایط مرزی
۴۸۶	۱-۵-۱۱ لبه با تکیه‌گاه ساده
۴۸۷	۲-۵-۱۱ لبه یا حاشیه اتصالی

۴۸۸	۱۱-۵-۳ لبه یا حاشیه آزاد
۴۸۸	۱۱-۶ برنامه کامپیوتری برای صفحه ضخیم با استفاده از چهار ضلعی هشت گره‌ای
۴۸۸	۱۱-۶-۱ برنامه اصلی: m.Thick_plate_Q8
۴۹۳	۱۱-۶-۲ آماده‌سازی داده‌ها
۴۹۳	۱۱-۶-۳ ماتریسهای سختی
۴۹۴	۱۱-۶-۴ شرایط مرزی
۴۹۴	۱۱-۶-۵ بارگذاری
۴۹۶	۱۱-۶-۴ انتگرال گیری عددی از ماتریس سختی
۴۹۷	۱۱-۶-۳
۴۹۷	۱۱-۶-۳ تعیین ممان‌ها و نیروهای برشی
۴۹۸	۱۱-۶-۴
۴۹۹	۱۱-۷ تحلیل با آباتر
۴۹۹	۱۱-۷-۱ مقدمات
۵۰۰	۱۱-۷-۱ shell المانهای سه بعدی
۵۰۰	۱۱-۷-۲ shell المانهای تقارن محور
۵۰۰	۱۱-۷-۳ shell قراردادی ضخیم در مقابل نازک
۵۰۱	۱۱-۷-۲ صفحه با تکیه‌گاه ساده
۵۰۸	۱۱-۷-۳ shell های سه بعدی
۵۲۳	ضمیمه الف لیست توابع و مدول MATLAB
۵۴۹	ضمیمه ب نیروهای گره‌ای معادل استاتیکی