



روش اجزای محدود

مؤلف:

داریل ر. لوگان

ویرایش ششم

مترجم:

پروفسور محمد شیشه ساز

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران هواز

دانشکده‌ی مهندسی

۱۳۹۷

انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

۷۴۲

سرشناسه	لوگان، داریل ال. Logan, Daryl L.
عنوان و نام پدیدآور	روش اجزای محدود: ویرایش ششم/مؤلف داریل ل. لوگان؛ مترجم محمد شیشه‌ساز.
مشخصات نشر	اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	۷۸۴ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست	انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز: ۷۴۲.
شابک	دوره: ۶۷-۲-۸۶۵۹-۹۶۴-۹۷۸؛ ج ۱. ۲۳۷-۰-۱۴۱-۶۰۰-۹۷۸؛ ج ۲. ۴-۱۰۱-۱۴۱-۶۰۰-۹۷۸
وضع فهرست‌نویسی	فیا
یادداشت	عنوان اصلی: A first course in the finite element method.
موضوع	روش المان‌های محدود
موضوع	Finite element method
شناسه افزوده	شیشه‌ساز، محمد، ۱۳۳۶-، مترجم
شناسه افزوده	دانشگاه شهید چمران اهواز
رده بندی کنگره	۱۳۹۱/۳۴۷۷ TAR
رده بندی دیویی	۶۲۰.۰۰۱۵۰۲۵
شماره کتابخانه ملی	۵۵۴۹۸۵

کلیه حقوق این کتاب برای ناشر محفوظ است و هرگونه استفاده از مطالب این کتاب اعم از چاپ کاغذی، الکترونیکی و یا قراردادن مطالب بر روی اینترنت و وب سایت بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است. ناشر با استناد به قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قوانین مربوط به جرایم رایانه ای کشور قابل پیگیری در محاکم قضایی می باشد.



عنوان: روش اجزای محدود: ویرایش ششم
ترجمه: دکتر محمد شیشه‌ساز
ویراستار علمی: دکتر سیدجلال الدین هاشمی
ویراستار ادبی: دکتر عادل سواعدی
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: ۱۳۹۷
شمارگان: ۵۰۰ نسخه

ناشر: اداره چاپ و انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز
چاپ و صحافی: اداره چاپ و انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

بها: ۸۰,۰۰۰ تومان

اهواز، میدان دانشگاه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ابتدای خیابان استاد بیاتفر، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

کدپستی: ۶۱۲۵۷۸۳۱۵۱ پست الکترونیک: book@scu.ac.ir - تارنما: <http://scu.ac.ir>

بخش و فروش: ۷۲-۳۳۳۱۰۳ و ۳۳۳۳۱۵۲۲ (۰۶۱) - ۶۴۳۹۴۴۰۹ و ۶۴۴۱۱۱۷۳ (۰۲۱)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ک	نماد گذاری
ق	پیش گفتار مترجم
ث	پیش گفتار مؤلف
۱	پیشگفتار
۱	اهداف فصل
۱	مقدمه
۴	تاریخچه به اختصار
۷	معرفی نماد ماتریسی
۱۱	نقش رایانه
۱۳	گام های کلی در روش اجزای محدود
۲۸	کاربرد روش اجزای محدود

صفحه	عنوان
۳۹	مزایای روش اجزای محدود
۴۰	برنامه‌های رایانه‌ای در روش اجزای محدود
۴۴	مراجع
۴۸	مسائل
۵۱	معرفی روش سختی (جابه‌جایی)
۵۱	اهداف فصل
۵۲	مقدمه
۵۲	تعریف ماتریس سختی
۵۳	استخراج ماتریس سختی در المان فنر
۶۰	مثالی در مورد به هم‌گذاری مجموعه فنرها
۶۴	نحوه‌ی دستیابی به ماتریس سختی کل از طریق روش انطباق (روش مستقیم سختی)
۶۸	شرایط مرزی
۹۱	روش انرژی پتانسیل در استخراج معادلات المان فنری
	شکل
۱۰۷	خلاصه‌ی معادلات
۱۰۸	مراجع
۱۰۸	مسائل
۱۱۷	استخراج معادلات خرپا
۱۱۷	اهداف فصل

صفحه	عنوان
۱۱۸	مقدمه
۱۲۰	۱-۳ استخراج ماتریس سختی المان میله‌ای شکل در مختصات محلی
۱۲۸	۲-۳ انتخاب تابع جابه‌جایی در مرحله‌ی ۲ استخراج ماتریس سختی برای المان میله‌ای شکل یک بعدی
۱۳۵	۳-۳ انتقال بردارها در فضای دو بعدی
۱۳۹	۴-۳ ماتریس سختی اصلی برای میله‌ای تحت زاویه‌ی دلخواه در صفحه
۱۴۶	۵-۳ محاسبه‌ی نیروهای معادل در میله‌ای که در صفحه‌ی $x-y$ قرار دارد
۱۴۹	۶-۳ حل یک خرابی در بعدی
۱۶۲	۷-۳ ماتریس‌های انتقال و سختی برای یک میله در فضایی سه بعدی
۱۷۶	۸-۳ کاربرد تقارن در سازه‌ها
۱۸۱	۹-۳ تکیه‌گاه‌های شیب‌دار یا اریب
۱۹۶	۱۰-۳ روش انرژی پتانسیل در استخراج معادلات المان میله‌ای شکل
۲۱۴	۱۱-۳ مقایسه‌ی حل اجزای محدود با حل مستقیم ریاضی یک میله
۲۲۰	۱۲-۳ روش پسماند گالرکین و کاربرد آن در استخراج معادلات المان میله‌ای شکل یک بعدی
۲۲۴	۱۳-۳ روش‌های دیگر پسماند و اعمال آن‌ها به مسئله‌ی المان میله‌ای شکل یک بعدی

صفحه	عنوان
۲۳۱	۱۴-۳ شمای عملیاتی حل مسائل مرتبط با خرابای سه بعدی
۲۳۲	۱۵-۳ حل مرحله به مرحله مسئله‌ی خرابی به کمک برنامه‌ی رایانه‌ای
۲۳۶	خلاصه‌ی معادلات
۲۳۸	مراجع
۲۳۹	مسائل
۲۶۹	۲ استخراج معادلات تیر
۲۶۹	الف فصل
۲۷۰	مقدمه
۲۷۱	۱-۴ سختی تیر
۲۸۷	۲-۴ مثالی در مورد برهم گذاری ماتریس‌های سختی تیر
۲۹۰	۳-۴ مثال‌هایی از تحلیل یک تیر ساده از روش مستقیم سختی
۳۰۳	۴-۴ بارگذاری گسترده
۳۳۱	۵-۴ مقایسه‌ی حل المان محدود با حل واقعی در یک تیر
۳۴۱	۶-۴ المان تیر با گره لولایی
۳۵۲	۷-۴ رویکرد انرژی پتانسیل در استخراج معادلات تیرآهن
۳۵۷	۸-۴ روش گالرکین در استخراج معادلات المان تیر
۳۶۱	خلاصه‌ی معادلات
۳۶۳	مراجع
۳۶۴	مسائل

صفحه	عنوان
۳۷۹	معادلات قاب و شبکه ۵
۳۷۹	اهداف فصل
۳۸۰	مقدمه
۳۸۰	المان تیر آهن دو بعدی با جهتی دلخواه ۱-۵
۳۸۷	مثال‌هایی از قاب صفحه‌ای ۲-۵
۴۱۸	تکیه‌گاه‌های شیب‌دار یا اریب - المان قاب ۳-۵
۴۱۹	معادلات شبکه ۴-۵
۴۴۹	المان تیر خمی دلخواه در فضا ۵-۵
۴۷۱	ایده‌ی تحلیل نیروها ۶-۵
۴۸۰	خلاصه‌ی معادلات
۴۸۴	مراجع
۴۸۵	مسائل
۵۳۱	استخراج معادلات سختی در حالت تنش و کرنش صفحه‌ای ۶
۵۳۱	اهداف فصل
۵۳۲	مقدمه
۵۳۳	مفاهیم اولیه تنش و کرنش صفحه‌ای ۱-۶
۵۴۱	استخراج معادلات و ماتریس سختی المان مثلثی شکل در حالت کرنش ثابت ۲-۶
۵۶۵	نحوه‌ی به‌کارگیری نیروهای حجمی و سطحی ۳-۶

صفحه	عنوان
۵۷۳	۴-۶ عبارات صریح برای ماتریس سختی در المان مثلثی شکل با کرنش ثابت
۵۷۶	۵-۶ حل اجزای محدود مسئله‌ای با تنش سطحی
۵۹۲	۶-۶ المان صفحه‌ای مستطیل شکل (مستطیل زوج خطی، Q۴)
۶۰۳	خلاصه‌ی معادلات
۶۰۹	مراجع
۶۱۰	مسائل
۶۲۱	نکات کاربردی در مدل‌سازی، تفسیر نتایج و مثال‌هایی از تحلیل تنش/کرنش صفحه‌ای
۶۲۱	اهداف فصل
۶۲۲	مقدمه
۶۲۳	۱-۷ مدل‌سازی در اجزای محدود
۶۴۷	۲-۷ تعادل و هم‌سازی در نتایج برای اجزای محدود
۶۵۰	۳-۷ همگرایی در حل و پالایش شبکه
۶۵۸	۴-۷ تفسیر مقادیر تنش
۶۶۱	۵-۷ نمودار گردش کار نحوه‌ی حل مسائلی از نوع تنش/کرنش صفحه‌ای
۶۶۲	۶-۷ حل گام به گام به کمک برنامه‌ی رایانه‌ای، دیگر مدل‌ها و نتایج مسائلی از نوع تنش/کرنش صفحه‌ای
۶۷۱	مراجع
۶۷۴	مسائل

صفحه	عنوان
۶۹۹	استخراج معادلات المان مثلثی شکل با کرنش خطی
۶۹۹	اهداف فصل
۶۹۹	مقدمه
۷۰۰	استخراج ماتریس سختی و معادلات المان مثلثی شکل با کرنش خطی
۷۰۸	مثالی در مورد نحوه تعیین سختی المان LST
۷۱۲	مقیاسه المانها
۷۱۷	خلاصه مرادفات
۷۱۹	مراجع
۷۲۰	مسائل
۷۲۵	پاسخ مسائل منتخب

پیشگفتار مترجم

روش اجزای محدود از جمله روش‌های عددی است که از آن می‌توان به‌طور گسترده در حل مسائل پیچیده استفاده نمود. کاربرد این روش در مسائل سازه‌ای، انتقال حرارت، سیالات، تحلیل مدارهای الکتریکی و مسائل مرتبط با الکترواستاتیک، تحلیل تنش در اندام‌ها یا عضوها، مصنوعي در بیومکانیک و نیز تحلیل تنش در پروتزها و ایمپلنت‌های دندان‌های جایگزین ویژه‌ای پیدا نموده است. در مبحث اجزای محدود، محیط مورد نظر می‌تواند از بعدی، همانند یک میله، دو بعدی، همانند یک ورق، و یا سه بعدی باشد. در این روش محدودی مورد نظر به جزءهای کوچک‌تری که اصطلاحاً المان نامیده می‌شوند تقسیم شده و معادله‌ی تغییرات پارامتر مورد نظر بر روی هر المان برحسب درجات آزادی آن‌ها نوشته می‌شود. گره‌ها از به هم پیوستن المان‌ها حاصل شده و درجات آزادی آن‌ها به نوع المانی که در مدل‌سازی محدودی مورد نظر به کار می‌رود بستگی دارد. مثلاً در تحلیل کششی میله‌ها از المان‌های یک بعدی با یک درجه‌ی آزادی در هر گره (جابه‌جایی طولی)، در تحلیل تیرآنها از المان‌های یک بعدی با دو درجه‌ی آزادی در هر گره، و در تحلیل ورق‌ها، با توجه به نوع بارگذاری، از المان‌های دو بعدی با دو درجه‌ی آزادی در هر گره (به ازای بارهای غشایی درون صفحه‌ای در ورق) یا

سه درجه‌ی آزادی در هر گره (به ازای بارهای برون صفحه‌ای همانند بار عرضی) استفاده می‌شود. درجات آزادی هر گره با توجه به خصوصیات مکانیکی جسم مورد نظر و نیز تئوری به کار رفته در استخراج رابط تعادل منظور می‌شوند. معادلاتی که برای تغییرات پارامتر مورد نظر در بیشتر المان‌های ساده منظور می‌شود عمدتاً از نوع خطی یا زوج خطی است؛ اگرچه می‌توان از معادلاتی با درجه‌ی بالاتر نیز استفاده نمود. ضرایب معادلات منظور شده در هر المان را می‌توان از روش‌های مختلف تعیین نمود و نهایتاً تغییرات هر معادله را بر روی هر المان، و نهایتاً کل محدوده تعیین نمود. با توجه به نوع مسئله و میزان سختی حل معادلات، می‌توان از روش‌های دیگر نسبت به تعیین جواب اقدام نمود. از جمله روش‌هایی که از آن‌ها در حل معادلات به‌کار آمده استفاده می‌شود می‌توان از روش انرژی، روش مستقیم سختی، و روش‌های هسماند وزنی نام برد. علاوه بر حل مسائل کلاسیک، روش اجزای محدود در حل بسیاری از مسائل صنعتی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد. در ارتباط با این موضوع می‌توان به پژوهش‌های علمی - تحقیقاتی متعددی که توسط مترجم و دیگر محققین انجام شده است اشاره نمود. برای مثال، تصاویری که بر روی جلد‌های رویی و پشتی کتاب آورده شده است مربوط به بعضی از پروژه‌هایی است که توسط مترجم به انجام رسیده یا راهنمایی شده است. تصاویر مندرج بر جلد رویی شامل تجزیه و تحلیل تنش در یک ایمپلنت دندان‌سازی است که نتایج کامل آن در ژورنال *Latin American Journal of Solids and Structures* به چاپ رسیده است. خوانندگان برای اطلاعات بیشتر در این مورد می‌توانند به ژورنال یاد شده مراجعه نمایند. علاوه بر این، نتایج تصویری حاصل از تحلیل پره‌ی فن برج خنک-کننده‌ی یکی از نیروگاه‌های ایران که پره‌های آن به دلایل نامعلومی دچار شکست می‌شد بر جلد رویی نشان شده است. در این تحقیق پره‌های یاد شده پس از ساخت و مدل‌سازی مورد تحلیل اجزای محدود قرار گرفت. پس از تعیین خطوط جریان هوا و تغییرات فشار حاصل بر روی پره، تحلیل تنشی که به ازای بار وارد

شده بر پره صورت گرفت دلایل شکست پره را مشخص نمود. جنس پره از شیشه-اپوکسی منظور شده بود. همچنین، تصاویر دو نوع پروتزی که به صورت یک سرگیردار و دو سرگیردار مدل‌سازی شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده بود بر روی جلد پستی آورده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نیز در مجله‌ی دانشکده‌ی دندان‌پزشکی دانشگاه اصفهان به چاپ رسیده است. تحقیقات دیگری نیز در ارتباط با تنش ایجاد شده در فنرهای موجی، ریل راه‌آهن و شاه‌فنر یک وسیله نقلیه و نیز مبدل‌های دیگر توسط مترجم یا تحت راهنمایی ایشان به انجام رسیده است. کتابی که هم‌کنون در دست خوانندگان گرامی است کتابی است که به نظر مترجم از جمله کتاب‌های محدود در زمینه‌ی اجزای محدود است که به نحوه شایسته‌ای مطالب مربوطه را برای دانشجویان و افراد علاقه‌مند به فراگیری این مبحث، با ذکر مثال‌های متعدد بازگو می‌کند. از جمله مزیت‌های این کتاب می‌توان به جامع بودن نسبی آن در قالب یک کتاب مقدماتی با حدودی متوسطه و نیز آسان بودن درک مطالب، ارائه‌ی مثال‌های متعدد به منظور درک بهتر و ارائه‌ی روش‌های متعدد در قالبی ساده و قابل فهم برای خواننده اشاره نمود. با توجه به استقبال بسیار خوب دانشجویان از ویرایش چهارم این کتاب، امید است ترجمه این ویرایش (ویرایش ششم) که حاوی مطالب جدید است مورد توجه و استفاده‌ی محققین و دانشجویان قرار گیرد. از جمله مطالب جدید در این ویرایش می‌توان به مواردی همچون تحلیل اجزای محدود جریان سیال در محیط متخلخل و درون شبکه‌های هیدرولیکی، تحلیل شبکه‌های الکتریکی و الکترواستاتیکی و حل معادله‌ی پواسون اشاره نمود. معادله‌ی یاد شده در بسیاری از مسائل مهندسی از قبیل پیچش شافت‌ها با مقاطع غیر دایره‌ای و نیز انتقال حرارت بر روی سطوح و موارد دیگر ظاهر می‌شود. کاربرد آزمون وصله که بدان طریق می‌توان تا حدود زیادی از صحت المان تعریف شده جهت حل مسئله مورد نظر استفاده نمود نیز در این ویرایش مورد بررسی قرار گرفته است.

در انتها بر خود لازم می‌دانم تا از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران و نیز از سرپرست انتشارات این دانشگاه، جناب آقای مهندس شفیعی که زحمات زیادی را جهت چاپ هرچه سریع‌تر این ویرایش متحمل شدند صمیمانه تشکر نمایم. مضافاً، از دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز و دیگر دانشجویانی که در تهیه‌ی بعضی از شکل‌های روی جلد و پشت جلد این‌جانب را یاری نمودند قدردانی می‌نمایم.

همچنین ماایم تا از خانواده‌ی خود، علی‌الخصوص همسر مهربان و فداکار و فرزندان بسیار عزیزم که در خلال ترجمه‌ی این کتاب با فراهم نمودن آرامش و امکانات لازم ترجمه‌ی این ویرایش را امکان‌پذیر نمودند تشکر کنم. حضور آن‌ها در کنار خود پیوسته دل‌گرمی این‌جانب را به انجام کارهای سخت بیشتر نموده است. یقیناً صبر و تحمل پشت‌بانی و نیز گذشت‌های بی‌دریغ آن‌ها منجر به تکمیل ترجمه‌ی این ویرایش گردید. در حاتبه این کتاب را به صبر جمیل پدر دلسوز و روح پرفتوح مادر مهربان خود و شهدای مظلوم جنگ تحمیلی هدیه می‌کنم. یادشان گرامی و خاطرشان همیشه در دل من جاوداً خواهد ماند.

محمد شیشه‌ساز

۱۳۹۷