

روش اجزای محدود مرزی

مقیاس شده

تألیف:

John P. Wolf

(Swiss Federal Institute of Technology)

ترجمه و تدوین:

ساسان محاسب

(عضو هیئت علمی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران)



سرشناسه : ولف، جان پی. ۱۹۳۸ - م

Wolf, John P.

عنوان و نام پدیدآورنده : روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده / تألیف: [جان. پی. ولف]؛ ترجمه و تدوین: ساسان محاسب.

مشخصات نشر : تهران: ماه نوپسان، ۱۳۹۳.

مشخصات ظاهری : ک. ۴۹۶ ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک : ۳۰۰۰۰ ریال ۱-۰-۹۴۹۰۱-۶۰۰-۹۷۸ ISBN: 978-600-94901-1-0

وضعیت فهرست نویسی : فیا.

یادداشت : عنوان اصلی: The scaled boundary finite element method.

یادداشت : چاپ قبلی: تمثیل، ۱۳۹۱.

یادداشت : کتابنامه: ص: ۴۵۷.

یادداشت : نمایه

موضوع : روش المان های محدود

موضوع : روش المان های مرزی

شناسه افزوده : محاسب، ساسان، ۱۳۳۵ -، مترجم

رده بندی کنگره : ۱۳۹۳ و ۹ / ر ۳۴۷ TA

رده بندی دیویی : ۶۲۰ / ۰۰۱۵۱۵۳۵

شماره کتاب شناسی ملی : ۳۶۷۴۲۷۴

ماه نوپسان



ناشر: ماه نوپسان

روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده

John P. Wolf

ترجمه و تدوین: ساسان محاسب

سرپرستار: احمد نادرزاده

ویراستار: آرش نیری

امور فنی و هنری: مهناز عزب دفتری

نویت چاپ: اول

تاریخ انتشار: زمستان ۱۳۹۳

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

شابک: ۱-۰-۹۴۹۰۱-۶۰۰-۹۷۸

قیمت: ۳۰۰۰۰ تومان

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

تلفن مرکز بخش: ۰۹۱۲۳۱۹۱۱۵۲ - ۰۹۳۹۳۱۹۱۱۵۲

فهرست مطالب

ش	مقدمه مترجم
ض	پیشگفتار
ظ	مقدمه مؤلف

۱	۱ مبانی تحلیل عددی
۲	۱-۱ مسئله فیزیکی، مدل ریاضی و حل عددی آن
۳	۱-۲ معادله لاپلاس برای جابه‌جایی خارج از صفحه ورق برشی
۸	۱-۳ روش باقیمانده‌های وزنی
۱۴	۱-۴ روش اجزای محدود
۳۲	۱-۵ روش اجزای مرزی
۵۱	۱-۶ نگاهی اجمالی به روش اجزای محدود مرزی مقیاس‌شده
۶۵	۲ روش محاسباتی نوین (بدیع)

بخش اول مسئله مدل: جزء خطی برای معادله موج اسکالر

۷۵	۳ مفاهیم انتقال مرز مقیاس‌شده هندسه و تشابه
۸۱	۴ گوه کامل و گوه ناقص نیمه‌بی‌نهایت ورق برشی
۸۵	۵ استنتاج بر پایه انتقال مرز مقیاس‌شده
۸۵	۵-۱ انتقال مرز مقیاس‌شده هندسه
۹۰	۵-۲ معادلات حاکم در مختصات مرز مقیاس‌شده
۹۱	۵-۳ روش باقیمانده‌های وزنی
۹۷	۵-۴ ماتریس سختی دینامیکی
۱۰۳	۶ استنتاج بر پایه اصول مکانیک
۱۰۶	۶-۱ ماتریس‌های سختی دینامیکی در مرزهای مشابه یک محیط
۱۰۸	۶-۲ ماتریس‌های ضرایب
۱۱۶	۶-۳ سرهم‌بندی سلول جزء محدود و محیط
۱۱۸	۶-۴ حد تحلیلی عرض سلول جزء محدود
۱۲۷	۷ مدل‌سازی با اجزای محدود تک‌خطی
۱۴۱	۸ استاتیک
۱۴۱	۸-۱ بار حجمی صفرشونده
۱۴۳	۸-۲ بار حجمی

۹	جرم گوه.....	۱۴۷
۱۰	بسط مجانب فرکانس بالا برای سختی دینامیکی گوه ناقص نیمه‌بی‌نهایت.....	۱۴۹
۱۱	حل عددی سختی دینامیکی، پاسخ ضربه واحد و جابه‌جایی گوه ناقص ...	۱۵۳
۱۱-۱	سختی دینامیکی.....	۱۵۴
۱۱-۲	پاسخ ضربه واحد.....	۱۵۵
۱۱-۲-۱	تبدیل معکوس فوریه.....	۱۵۶
۱۱-۲-۲	جداسازی زمانی.....	۱۵۹
۱۱-۳	جابه‌جایی.....	۱۶۱
۱۲	حل تحلیلی در حوزه فرکانس.....	۱۶۵
۱۲-۱	جابه‌جایی.....	۱۶۶
۱۲-۲	سختی دینامیکی گوه.....	۱۷۲
۱۲-۳	سختی دینامیکی گوه ناقص نیمه‌بی‌نهایت.....	۱۷۲
۱۲-۴	جابه‌جایی متدال دور.....	۱۷۵
۱۳	کاربرد.....	۱۷۷
۱۴	جمع‌بندی.....	۱۸۱
۱۴-۱	استنتاج.....	۱۸۱
۱۴-۲	روند حل مسئله.....	۱۸۲
۱۴-۳	ویژگی‌ها و مزیت‌ها.....	۱۸۴
پیوست الف	مدل‌سازی جامدات.....	۱۸۷
پیوست ب	حرکت هارمونیک و تبدیل فوریه.....	۱۹۳
پیوست پ	اندرکنش دینامیکی محیط نامحدود - سازه.....	۲۰۳
پیوست ت	تاریخچه.....	۲۱۱

بخش دوم الاستودینامیک، استاتیک و انتشار دوبعدی و سه‌بعدی

۱۵	معادله‌های بنیادی.....	۲۱۷
۱۵-۱	مفهوم برجسته.....	۲۱۷
۱۵-۲	معادلات حاکم الاستودینامیک در مختصات مرزی مقیاس‌شده.....	۲۲۲
۱۵-۳	روش باقیمانده‌های وزنی.....	۲۳۰
۱۵-۴	ماتریس سختی دینامیکی.....	۲۳۷
۱۵-۵	معادلات الاستودینامیک دوبعدی.....	۲۴۱

۲۴۷	۶-۱۵	معادلات انتشار
۲۵۵	۷-۱۵	استنتاج جایگزین بر پایه کار مجازی
۲۶۱	۱۶	استاتیک
۲۶۴	۱-۱۶	بارهای حجمی صفر شونده
۲۶۹	۲-۱۶	محیط نامحدود دوبعدی
۲۸۳	۳-۱۶	بار حجمی
۲۸۷	۴-۱۶	برخی توزیع‌های بار حجمی
۲۸۷	۱-۴-۱۶	بار متمرکز
۲۹۰	۲-۴-۱۶	بار متغیر به عنوان تابع توانی مختصه شعاعی
۲۹۴	۵-۱۶	تنش اولیه
۲۹۷	۱۷	ماتریس جرم محیط محدود
۲۹۷	۱-۱۷	الاستودینامیک
۳۰۳	۲-۱۷	انتشار
۳۰۷	۱۸	بسط مجانب فرکانس بالای سختی دینامیکی محیط نامحدود
۳۱۷	۱۹	حل عددی سختی دینامیکی، پاسخ ضربه واحد و جابه‌جایی محیط نامحدود
۳۱۸	۱-۱۹	سختی دینامیکی
۳۲۰	۲-۱۹	پاسخ ضربه واحد
۳۲۰	۱-۲-۱۹	تبدیل فوری معکوس
۳۲۳	۲-۲-۱۹	جداسازی زمان
۳۲۶	۳-۱۹	جابه‌جایی
۳۲۹	۲۰	حل تحلیلی در حوزه فرکانس
۳۳۰	۱-۲۰	جابه‌جایی
۳۳۸	۲-۲۰	سختی دینامیکی محیط محدود
۳۴۰	۳-۲۰	سختی دینامیکی محیط نامحدود
۳۴۳	۴-۲۰	جابه‌جایی میدان دور
۳۴۵	۲۱	مطالب تکمیلی
۳۴۶	۱-۲۱	تغییر مشخصات مصالح در جهت شعاعی
۳۵۴	۲-۲۱	الاستودینامیک تراکم‌ناپذیر
۳۵۵	۳-۲۱	مجموعه کاهش یافته توابع پایه
۳۵۷	۴-۲۱	محیط نامحدود لایه‌ای دوبعدی
۳۵۹	۵-۲۱	محیط نامحدود منشوری سه‌بُعدی با مقطع غیرهمگن

۲۲	زیر ساختار سازی	۳۶۳
۲۳	مثال هایی برای محیط محدود	۳۶۹
۲۳-۱	ورق دوسان گرد لبه ترک دار با محوره های مصالح چرخیده تحت برش	۳۷۰
۲۳-۲	ورق دو جنسی وجه ترک دار تحت کشش	۳۷۳
۲۳-۳	ورق دو جنسی دوسان گرد با ترک عمود و پایان یافته در وجه مشترک	۳۷۵
۲۳-۴	ورق دوسان گرد دایره ای چرخنده با ترک مرکزی	۳۷۶
۲۳-۵	ورق دو جنسی دوسان گرد با ترک مرکزی تحت کشش	۳۷۹
۲۳-۶	عامل شدت تنش دینامیکی	۳۸۱
۲۳-۷	ورق دو جنسی با تکینی شار در انتشار	۳۸۴
۲۳-۸	پی سطحی روی نیم صفحه با بار گذاری ناپیوسته	۳۸۷
۲۴	مثال هایی برای محیط های نامحدود	۳۹۱
۲۴-۱	پی منشوری مدفون در نیم فضا	۳۹۲
۲۴-۲	حفره کروی مدفون در فضای کامل	۳۹۹
۲۴-۳	حرکت درون صفحه گوه نیمه بی نهایت	۴۰۴
۲۵	بر آورد خطا و انطباق پذیری	۴۰۷
۲۵-۱	بر آورد خطا در تحلیل عددی	۴۱۰
۲۵-۲	بازیابی تنش در روش اجزای محدود	۴۱۱
۲۵-۳	بازیابی تنش در روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده	۴۱۵
۲۵-۴	بر آورد خطا در روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده	۴۱۹
۲۵-۵	مثال برای بازیابی تنش و بر آورد خطا	۴۲۳
۲۵-۵-۱	ورق نامحدود با سوراخ دایره ای مرکزی تحت تنش کششی	۴۲۳
۲۵-۵-۲	مدل محدود	۴۲۴
۲۵-۵-۳	مدل نامحدود	۴۲۹
۲۵-۶	انطباق پذیری سلسله مراتبی H	۴۳۲
۲۵-۷	مثال هایی برای انطباق پذیری	۴۳۶
۲۵-۷-۱	ورق با دو سوراخ مربعی تحت تنش کششی تک محوری	۴۳۶
۲۵-۷-۲	پی استوانه ای مدفون در نیم فضا	۴۳۹
۲۶	نتیجه گیری	۴۴۵
	مراجع	۴۵۷
	فهرست راهنما	۴۶۱
	پیوست فصل ۲۵. ورق ها	۴۷۱

مقدمه مترجم

برای مدل سازی اثر خاک و بررسی اندرکنش آن با محیط در سازه های مهم مثل سدها، سازه های بلند، تونل ها و نیروگاه ها بایستی از روش های تحلیلی دقیق همانند روش اجزای محدود یا اجزای مرزی استفاده نمود. شرایط مرزی خاک به عنوان یک حوزه نامحدود، با استفاده از مدل های اجزای محدود به درستی ارضا نمی شود و احتیاج به یک مدل بزرگ و حجم حافظه قابل توجه رایانه ای و زمان تحلیل زیاد دارد. برای مثال، به منظور مدل کردن محیط خاکی در پروژه های بهسازی لرزه ای هتل آزادی و هتل استقلال در تهران (به مدیریت مهندسی و اجرایی اینجانب) با روش اجزای محدود، نیاز به مدلی با حجم ۲ میلیون جزء بود که با توجه به بازار در دسترس مقرون به صرفه نبود. از سوی دیگر، در مدل های اجزای مرزی نیز به یک حل بنیادی نیاز است که برای بیشتر مسائل، این حل وجود ندارد.

برای حل دقیق مسئله اندرکنش خاک و سازه، شیوه جایگزین جدیدی به نام اجزای محدود مرزی مقیاس شده (SBFEM) در دانشگاه صنعتی ETH سوئیس در زوریخ توسعه پیدا کرد. این روش که یک شیوه اجزای محدود بر پایه اجزای مرزی است، در پروژه های یادشده (دو هتل بزرگ تهران) مورد استفاده قرار گرفت. روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده با تلاش های محاسباتی خیلی کمتر نسبت به روش اجزای محدود و اجزای مرزی محیط نامحدود، خاک را به صورت دقیق مدل می کند. از این رو صرفه جویی قابل توجهی در زمان و هزینه تحلیل مسائل اندرکنشی بزرگ در پی خواهد داشت. افزون بر آن، روش یادشده در تحلیل مسائل مکانیک شکست، تمرکز تنش در نوک ترک، مسئله انتشار و تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک - سازه کاربرد دارد که در متن کتاب با مثال های مختلف به آنها اشاره شده است.

با توجه به منابع آموزشی و کاربردی بسیار محدود در زمینه آشنایی با روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده، کتاب حاضر که حاصل زحمات پروفسور جان. پ. ولف می باشد، از ساختار مناسبی برخوردار بوده و ضمن تشریح کامل مبانی روش و ارائه مثال های کاربردی در زمینه های مختلف، می تواند به عنوان یک مرجع آموزشی مهم مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین تصمیم گرفته شد که

کتاب یادشده ترجمه شود تا از طریق تدریس و ارتباط دانشجویان و اساتید با این روش تحلیلی، تلاشی برای اشاعه و توسعه آن در کنار روش‌های تحلیل عددی موجود بین پژوهشگران صورت گیرد. مطالعه و آشنایی با روش ارائه شده در این کتاب برای دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای عمران در گرایش‌های سازه و خاک و پی و به‌ویژه در مواردی که مسئله اندرکنش استاتیکی و دینامیکی خاک و محیط در سازه‌های بزرگ مطرح است یا مسائل مکانیک شکست و ترک‌خوردگی سازه‌ها توصیه می‌شود. اینجانب نیز دوره این روش را در چندین دانشگاه ایران براساس محتوای کتاب حاضر تدریس نموده‌ام که نتیجه آن نیز برای دانشجویان به‌منظور کاربرد در پروژه‌های تحقیقاتی و تحلیل‌های عددی رضایت‌بخش بوده است.

در اینجا لازم می‌دانم از خانم الهه جعفری که در ترجمه فارسی کتاب زحمات زیادی را کشیده و همکاری بسزایی داشته‌اند قدردانی نمایم. از آقای دکتر آرش نیری که ویرایش کتاب را با دقت بسیار بر عهده گرفتند سپاس‌گزاری می‌نمایم.

از همکاری جناب آقای دکتر احمد نادرزاده که با نهایت دقت و مهارت، متن کامل کتاب را بازخوانی و ویرایش نهایی نمودند، صمیمانه سپاس‌گزارم.

از پروفسور جان. پ. ولف استاد راهنمای پایان‌نامه دکترای اینجانب در دانشگاه ETH برای حمایت‌های مداوم در طول ۲۵ سال کمال تشکر را دارم.

در پایان از خانم مهناز عزب‌دفتری و همکاران‌شان که امورات فنی و هنری کتاب را با دقت و کیفیت بالا، صمیمانه به‌انجام رسانیدند و همچنین از انتشارات ماه‌نویسان که عهده‌دار چاپ کتاب بودند نهایت تشکر را دارم.

در صورت وجود هرگونه ابهام یا سؤال در رابطه با محتوا و مطالب کتاب یا وجود ایرادات احتمالی می‌توانید با آدرس ایمیل اینجانب مکاتبه نمایید.

سازمان محاسب

عضو افتخاری هیئت علمی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

دکترای مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی ETH زوریخ

کارشناسی ارشد - دانشگاه استنفورد

smteam@gmx.ch

آبان ۱۳۹۱، تهران

پیش گفتار

در ابتدای قرن ۲۱ انواع مختلف مسائل مکانیک جامدات و به طور کلی مسائل مکانیک پیوسته که به صورت ریاضی فرمول بندی شده اند، بسیار بزرگ و مفصل است. مدل هایی وجود دارند که رفتار کلان مکانیکی انواع مصالح را تحت شرایط بارگذاری مختلف ارائه می کنند. رفتار الاستیک، پلاستیک، ویسکوالاستیک و دیگر رفتارهای مصالح همسان گرد و ناهمسان گرد تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی، به وسیله دستگاه های معادلات دیفرانسیل جزئی و یا انتگرالی ارائه می شوند. فرمول بندی های مسائل مربوط به مصالح جدید، گسیختگی، برخورد، خستگی و سایر موارد شناخته شده هستند. با این حال، حل دقیق این فرمول بندی های ریاضی در اکثر موارد مجهول بوده و تنها چند مورد بنیادی با هندسه و شرایط مرزی ساده می توانند به صورت تحلیلی حل شوند.

تنها روش واقع بینانه در حل مسائل مکانیک جامدات، جداسازی بوده است. در ابتدا، این عمل با ارائه حل برحسب تعداد متناهی از پارامترهایی که ضرایبی از بسط سری ساده بوده و در روش های کلاسیک تحلیل خمش ورق مستطیلی رخ می دهد، انجام می شده است. در ادامه، با استفاده از یک سری توابع شکل انتخاب شده که در طول حوزه امتداد دارند، انجام می گردید. در این روش، مانند روش Trefftz، دامنه این توابع به عنوان مجهول های مسئله در نظر گرفته می شود. ایده جدیدی با روش تفاضل محدود به وجود آمد که عنوان می کرد متغیر میدان برحسب مقادیرش در تعدادی نقاط که روی حوزه به طور مساوی تقسیم شده اند، بیان گردد. معادلات حاکم با مشتقات تخمینی آنها برحسب تفاضل ها، در هر نقطه داخلی اعمال می شوند. روش اجزای محدود یک گام جلوتر به سمت جداسازی پیش می برد. نه تنها متغیر میدان برحسب مقادیرش در یک سری گره بیان می شود، بلکه حوزه نیز خودش به اجزایی تقسیم می گردد. توابع براساس محلی برای درون یابی استفاده می شوند.

روش اجزای محدود بیش از چهل سال توسعه پیدا کرده تا تبدیل به روشی برای حل تقریباً هر مسئله مکانیک محیط پیوسته که برای آن فرمول بندی ریاضی وجود دارد، شود. ایده های نوینی نظیر رابطه سازی بدون تورین، توسعه جدیدی از مفهوم جداسازی حوزه هستند. با وجود این که روش اجزای محدود ابزاری بسیار کلی و توانمند و با قابلیت به کارگیری برای تقریباً هر نوع مسئله مکانیک جامدات است، مشکلاتی در مسائلی خاص نظیر تحلیل دینامیکی حوزه های بزرگ یا نامحدود، انتشار ترک، برخورد و دیگر مسائل تمرکز تنش به همراه دارد. این مشکلات به همراه کار کسل کننده

جداسازی اجزای محدود، باعث ظهور روش اجزای مرزی گردید. در این مورد، معادلات حاکم بر مسئله مقدار مرزی به شکل معادلات انتگرال مرزی بیان شده و در نتیجه، جداسازی متغیر میدان به مرز حوزه محدود می شود. اجزاء، گره ها، توابع شکل و موارد اساسی دیگر روش اجزای محدود نیز بخشی از روش اجزای مرزی هستند، اما به مرز مقید می باشند. مزیت بزرگ این روش یعنی کاهش بعد مسئله به یک، برای حوزه های بزرگ و نامحدود کاملاً آشکار است. مسائل در ارتباط با انتشار ترک یا مکانیک برخورد همچنین مزیت های محدود کردن جداسازی تنها مرز حوزه را نشان می دهند.

این واقعیت که روش اجزای محدود برای مسائل خاص مکانیک محیط پیوسته با مشکلاتی همراه بوده و کمبودهایی دارد، نه تنها باعث گسترده شدن استفاده از روش اجزای مرزی در آن زمینه ها می شود، بلکه زمینه را برای ایجاد روش های عددی جدید فراهم می کند. روش نوین ارائه شده توسط جان. پ. ولف در این کتاب، گام دیگری در جهت دهی به روش های عددی برای غلبه بر مشکلات روش اجزای محدود است. روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده برای حل انواع خاص مسائل مکانیک محیط پیوسته مناسب بوده و ضمن برخورداری از مزیت های هر دو روش اجزای محدود و اجزای مرزی، برخی از موانع آنها را برطرف می کند. مسلماً این روش محدودیت های خاص خود را دارد که باعث می شود تنها بر تعداد محدود اما بزرگ و مهم از مسائل مکانیک محیط پیوسته تمرکز داشته باشد. پژوهشگران و مهندسان علاقه مند به حل مسائلی مانند اندرکنش خاک - سازه، انتشار، مکانیک شکست و زمینه های دیگر می بایست علاوه بر آشنایی با این روش، از مزیت های آن استفاده نموده و برای بهره برداری از امکانات آن آماده شوند. این روش قابل اعمال به هر مسئله مکانیک محیط پیوسته است که معادلات دیفرانسیل جزئی خطی بر تحلیل آن حاکم باشند. در این روش نیمه تحلیلی، یک روند مقیاس بندی در جهت شعاعی استفاده می شود تا جداسازی را (در حالت اجزای محدود) به جهت های پیرامونی محدود نماید.

کتاب های زیادی در ارائه روش های جدید برای حل مسائل مهندسی وجود ندارد. با تشکر از سخت کوشی به یادماندنی و خلاقیت خارق العاده نویسنده آن، ارائه روش جدید در این کتاب ممکن شده است. در تلاش برای به دست آوردن رویکردهای بهتر برای اندرکنش دینامیکی خاک - سازه (همان طور که در کتاب *مدل سازی اجزای محدود محیط نامحدود*، Wiley ۱۹۹۶ نشان داده شده)، نویسنده روشی را توسعه داده که به محیط های محدود و طیف وسیعی از مسائل مهندسی بسط داده شده است. انتظار می رود که در آینده پیشرفت های بیشتری در این روش محاسباتی نوین رخ دهد.

Jose Dominguez

دانشگاه سویل، اسپانیا