

آنالیز المان مرزی در مکانیک شکست

دکتر هادی حائری

استادیار دانشکده مهندسی عمران
مؤسسه علوم و توسعه پایدار آریا

دکتر وهاب سرفرازی

استادیار دانشکده مهندسی
دانشگاه صنعتی همردان

مسعود گهرندی

علیرضا بذری شمیرانی



مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف



مؤسسه انتشارات علم
دانشگاه صنعتی شریف

آنالیز المان مرزی در مکانیک شکست

تألیف: وهاب سرفرازی، هادی حائری، مسعود کهوندی، علیرضا باقرشمیرانی

ناشر: مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف

چاپ اول: ۱۳۹۶

شمارگان: ۱۰۰۰

بها: ۲۰۰۰۰ تومان

ویرایش و آماده‌سازی کتاب را مؤلفان انجام داده‌اند.

حق چاپ برای مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است.

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۲۰۸-۱۹۲-۹ ISBN 978-964-208-192-9

تلفن: ۶۶۰۱۳۱۲۹-۰۲۱ ۶۴۰۷۲-۶۶۱۶۴۰۷۰

دفتر مرکزی: خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف

دفتر فروش: میدان انقلاب - خیابان شهید منبری جاوید (اردیبهشت) - ساختمان بهمن - پلاک ۸۷ - طبقه چهارم - واحد ۴۰۲

پست الکترونیکی: publishing@sharif.ir

وبگاه: http://sina.sharif.ir/~publishing

فروش اینترنتی: www.saneibook.com, www.ketabiran.ir

موضوع: Finite element methods

موضوع: روش المان‌های مرزی

موضوع: Boundary element methods

شناسه افزوده: سرفرازی، وهاب، ۱۳۵۹

شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی

رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۶ TA۳۴۷/۹۱۸

رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۰۰۱۵۱۵۳۵

شماره کتابشناسی ملی: ۴۶۸۵۸۰۱

سرشناسه: سرفرازی، وهاب، ۱۳۵۹

عنوان و نام پدیدآور: آنالیز المان مرزی در مکانیک شکست / وهاب سرفرازی - (و دیگران)

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی، ۱۳۹۶

مشخصات ظاهری: ۱۷۲ ص: مصور

شابک: 978-964-208-192-9

وضعیت فهرست‌نویسی: فیا

یادداشت: وهاب سرفرازی، هادی حائری، مسعود کهوندی، علیرضا باقرشمیرانی

موضوع: روش المان‌های محدود

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

هفت	پیشگفتار
۱	فصل ۱ چشم انداز کلی
۱	۱-۱ پیشرفت و توسعه انترال، مرزی
۳	۲-۱ فرمول بندی حدی
۵	۳-۱ مسائل مکانیک شکست
۶	مراجع
۹	فصل ۲ مکانیزم های شکست
۹	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ چند تعریف
۱۱	۳-۲ چند نتیجه بنیادی
۱۶	مراجع
۱۹	فصل ۳ رابطه مندی معادلات انتگرال مرزی و راه حل
۱۹	۱-۳ مقدمه
۲۰	۲-۳ معادلات الاستیسیته دوبعدی و سه بعدی
۲۱	۳-۳ راه حل های بنیادی
۲۴	۴-۳ حل بنیادی ایزوتروپیک دوبعدی
۲۸	۵-۳ حل بنیادین ایزوتروپیک سه بعدی

۲۹	۶-۳ اتحادهای سومیگلیانا
۳۱	۷-۳ معادلات انتگرال مرزی
۳۳	۸-۳ مربع‌سازی عمودی
۴۰	مراجع

۴۳	فصل ۴ مدل‌سازی انتگرال مرزی سطوح ترک
۴۳	۱-۴ مقدمه
۴۴	۲-۴ نامعتبر بودن معادلات انتگرال مرزی برای سطوح هم‌صفحه
۴۷	۳-۴ کاربردهای معادله انتگرال مرزی در چند ناحیه
۴۹	۴-۴ مدل‌سازی رأس ترک بر مبنای انرژی کرنشی
۵۴	۵-۴ درونیایی‌های سطح ترک
۵۹	مراجع

۶۱	فصل ۵ فرمول‌بندی تابع گرین در حالت‌های دوبعدی
۶۱	۱-۵ مقدمه
۶۲	۲-۵ فرمول‌بندی تابع گرین ناهم‌باز (نرایز تروپیک)
۶۶	۳-۵ سومیگلیانا برای فرمول‌بندی تابع گرین ناهم‌باز
۶۹	۴-۵ به‌کارگیری المان مرزی متغیر خطی
۷۹	۵-۵ کاربردها
۸۳	مراجع

۸۵	فصل ۶ تحلیل مکانیک شکست الاستوپلاستیک
۸۵	۱-۶ مقدمه
۸۶	۲-۶ روابط الاستوپلاستیک بنیادین
۸۹	۳-۶ ضریب تقریب‌زننده سومیگلیانا در الاستوپلاستیسته سه‌بعدی
۹۳	۴-۶ سومیگلیانا در الاستوپلاستیسته دوبعدی
۹۵	۵-۶ ضریب تقریب‌زننده‌ها در مکانیک شکست الاستوپلاستیک
۱۰۲	۶-۶ کاربرد عددی فرمول‌بندی معادله انتگرال مرزی الاستوپلاستیک
۱۰۴	۷-۶ نتایج عددی در الاستوپلاستیسته دوبعدی
۱۱۰	مراجع

۱۱۳	فصل ۷ مدل سازی ناپیوستگی تغییر مکان ترک ها
۱۱۳	۱-۷ مقدمه
۱۱۴	۲-۷ فرمول بندی معادله انتگرال مرزی برای ترک های مسطح
۱۱۸	۳-۷ فرمول بندی معادله انتگرال مرزی بردار تنش دویعدی
۱۲۰	۴-۷ جواب نزدیک نوک ترک برای معادله انتگرال مرزی
۱۲۲	۵-۷ روش عددی
۱۳۰	۶-۷ نتایج عددی
۱۳۳	مراجع

۱۳۵	فصل ۸ ارزیابی عملکرد وزن دویعدی
۱۳۵	۱-۸ مقدمه
۱۳۶	۲-۸ فرمول بندی معادله انتگرال مرزی وزن
۱۴۳	مراجع

۱۴۵	فصل ۹ مقایسه نتایج عددی با تحلیلی و آزمایشگاهی
۱۴۵	۱-۹ مقدمه
۱۴۶	۲-۹ حل مسائل ساده مکانیک شکست
۱۴۶	۱-۲-۹ مسئله دیسک برزلی حاوی ترک مرکزی
۱۵۲	۲-۲-۹ ترک های لبه ای ناممتد یلکانی
۱۵۵	مراجع

۱۵۷	واژه نامه انگلیسی-فارسی
۱۵۹	واژه نامه فارسی-انگلیسی
۱۶۱	فهرست راهنما

پیشگفتار مؤلفان

مطالعه، رشد و گسترش ترک در سازه‌های مهندسی اهمیت زیادی دارد. روش‌های متفاوتی می‌تواند برای تجزیه و تحلیل انتشار ترک در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیقات با رویکرد تحلیلی، امکان مطالعه انتشار و به هم پیوستگی ترک‌ها بسیار مشکل، وقت‌گیر، و دارای محدودیت است. آزمون‌های آزمایشگاهی رویه جالبی هستند زیرا می‌توانند الگوهای انتشار و به هم پیوستگی ترک‌ها را آشکار کنند که با روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نیست. ولی برای تأیید نتایج پدیده شکست آزمون‌های آزمایشگاهی زیادی مورد نیاز است که انجام آنها مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. روش‌های عددی از جمله روش‌های المان مرزی، اجزاء محدود، و المان محدود از روش‌های پرکاربرد در این زمینه هستند که هر روش با رویکردی خاص به حل مسائل رشد ترک می‌پردازد. برای مثال روش اجزاء مجزا، محیط را به صورت اجزاء به هم پیوسته در نظر می‌گیرد که این اجزا در فصل مشترکشان قابلیت جدایش دارند. با کاربرد روابط ساختاری ویژه، مسیر رشد ترک شناسایی می‌گردد. روش المان محدود با به کارگیری روش‌های ویژه در نوک ترک و به کارگیری معیارهای انرژی، کرنشی و ... انتشار ترک را بررسی می‌کند. روش المان مرزی نیز با رویکرد مش‌بندی مرزها به مطالعه رشد ترک می‌پردازد که هدف این کتاب تشریح فرمولاسیون قابل کاربرد در این زمینه است.

این کتاب شامل نه فصل است. در فصل اول پیشرفت و توسعه انتگرال مرزی و نیز تاریخچه شکل‌گیری روش المان مرزی ارائه شده است. فصل دوم درباره مبانی مکانیک شکست است. روابط بنیادین مکانیک شکست الاستیک خطی براساس مطالعات گریفیث و ایروین در این فصل بررسی می‌شود. همچنین چندین مفهوم پایه و

اصطلاحات فنی درباره انواع ترک‌ها و شدت تنش نوک ترک تعریف می‌شود که در بحث‌های بعدی کاربردی خواهد بود.

در فصل سوم معادلات انتگرال مرزی بررسی می‌شود. در این فصل معادلات الاستیسیته دوبعدی و سه‌بعدی، حل معادلات بنیادین، حل بنیادی ایزوتروپیک دوبعدی و سه‌بعدی و تئوری کار دوجانبه بتی ارائه شده است. در ادامه با ذکر یک مثال، انواع المان‌ها، گره‌ها، و درجه آزادی معرفی و کاربرد روابط المان‌مرزی در تعیین فاکتور شدت تنش ارزیابی می‌شود.

فصل چهارم به مدل‌سازی انتگرال مرزی سطوح ترک می‌پردازد. در این فصل کاربردهای معادله انتگرال مرزی در چند ناحیه ارائه می‌شود. همچنین به نحوه مدل‌سازی نوک ترک بر مبنای انرژی کرنشی پرداخته می‌شود و قابلیت و توانایی روش المان‌مرزی در ارائه گرا دیان‌های تنش در بدنه‌های الاستیک را آشکار می‌کند. این فصل کاربرد ناحیه‌ای را نیز ارائه می‌کند که در آن جسم حداقل به دو ناحیه تقسیم می‌شود که در ناحیه یکی از سطوح ترک را در بر می‌گیرد و سپس به بررسی وضعیت رشد ترک می‌پردازد.

فصل پنجم فرمول‌بندی تابع گرین در حالت‌های دوبعدی را ارائه می‌دهد. در این فصل، فرمول‌بندی تابع گرین ناممسان، تنگ‌رها برای فرمول‌بندی تابع گرین ناهمسان، به‌کارگیری المان‌مرزی متغیر خطی و کاربرد آنها شرح داده می‌شود. در بخش‌های این فصل خواهیم دید که تا چه اندازه توابع گرین می‌تواند برای فرمول‌بندی‌های معادله انتگرال مرزی مفید باشد. در ادامه این فصل، با ذکر مثال، کاربرد مفاهیم این فصل در ارزیابی شدت تنش در نوک یک ترک محصور و یک ترک لبه‌ای توضیح داده شده است. فصل ششم به تحلیل مکانیک شکست الاستوپلاستیک می‌پردازد. در این فصل روابط الاستوپلاستیک بنیادین ارائه شده و کاربرد عددی فرمول‌بندی معادله انتگرال مرزی الاستوپلاستیک بیان می‌شود. در ادامه، یک مسئله کاربردی برای الگوریتم تابع گرین الاستوپلاستیک بررسی شده که در آن یک صفحه با ترک مرکزی در کشش بارگذاری شده است.

در فصل هفتم مدل‌سازی ناپیوستگی تغییر مکان ترک‌ها شرح داده می‌شود. در این فصل، فرمول‌بندی معادله انتگرال مرزی بردار تنش سه‌بعدی و دوبعدی برای ترک‌های مسطح ارائه می‌شود. در این فرمول‌بندی ترک مستقیماً به‌عنوان یک سطح منفرد در نظر گرفته می‌شود که تغییر مکان‌ها در آن ناپیوسته‌اند. همچنین در این فصل، عملگر

دیفرانسیل (محاسبه مقادیر گره‌ای گرادیان‌های تغییر مکان از تغییر مکان‌های گره‌ای) و گسسته‌سازی معادله‌المان مرزی بردار تنش باتوجه به گرادیان‌های تغییر مکان گره‌ای ارائه شده است.

در فصل هشتم تابع وزن و فرمول‌بندی معادله‌انتگرال مرزی وزن ارائه می‌شود. روشی که در اینجا ارائه می‌گردد، مسئله محاسباتی تولید توابع وزن به‌صورت مستقیم و کارآمد را نشان می‌دهد. در ادامه با ذکر سه مثال، قابلیت‌های عددی ضروری روش محاسبه تابع وزن نشان داده می‌شود. فصل نهم نیز به مقایسه نتایج عددی المان مرزی، اجزاء مجزا و آزمایشگاهی در مسائل انتشار ترک می‌پردازد و چگونگی رشد ترک را از دیدگاه سه روش آشکار می‌سازد.

در پایان ضمن درخواست هرگونه راهنمایی و پیشنهاد از متخصصان و صاحب‌نظران برای اصلاح در چاپ‌های بعدی، لازم می‌دانیم از زحمات اساتید و دوستان عزیز، آقای دکتر کورش شهریار و آقای دکتر سمیدرضا نحاتی که با خواندن فصل و یا فصل‌هایی از پیش‌نویس‌های این کتاب راهنمایی‌های ارزنده نمودند، صمیمانه سپاسگزاری نماییم.

هادی حائری

استادیار دانشکده مهندسی عمران
مؤسسه علوم و توسعه پایدار آریا

وهاب سرفرازی

استادار دادکده معدن
دارگاه صنعتی مدان

سعود کهوندی

علیرضا آفرشمیرانی