۱۰۵۳۰۹۶

بسم الله الرحمن الرحیم

تحلیل سازه های خاکی و بتنی به روش نقاط محدود

سیدامیرالدین صدرنژاد

استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

www.ketab.ir

سرشناسه	: صدرنژاد، امیرالدین، ۱۳۳۳ -
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل سازه‌های خاکی و بتنی به روش نقاط محدود / امیرالدین صدرنژاد.
مشخصات نشر	: تهران : دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، ۱۳۸۸.
مشخصات ظاهری	: ۲۹۹ ص. : مصور، جدول، نمودار.
فروست	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ؛ ۲۵۵.
شابک	: ۵۷۵۰۰ریال : 978-964-8703-69-6
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۷۹ - ۲۸۴.
موضوع	: روش المان‌های محدود -- نرم‌افزار
موضوع	: سازه، تجزیه و تحلیل -- نرم‌افزار
موضوع	: روش المان‌های مرزی -- داده‌پردازی
موضوع	: روش گلرکین
موضوع	: الگوهای مهندسی
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
رده بندی کنگره	: TA۳۴۷/ ر۹ ص۳ ۱۳۸۸
رده بندی دیویی	: ۶۳۰/۰۱۵۱۵۳۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۸۸۸۰۴۹۱

نام کتاب: **تحلیل سازه‌های خاکی و بتنی به روش نقاط محدود**

تألیف: دکتر سید امیرالدین صدرنژاد، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نوبت چاپ : اول

تاریخ چاپ : اسفند ۱۳۸۸

تیراژ : ۱۰۰۰جلد

قیمت : ۵۷۵۰ تومان (به انظمام لوح فشرده)

کدکتاب : ۲۵۵

شابک : ۶-۶۹-۸۷۰۳-۹۶۴-۹۷۸ *ISBN: 978- 964-8703-69-6*

لیتوگرافی چاپ و صحافی: امیر نقش

تلفن مرکز پخش : ۸۸۷۷۲۲۷۷(۰۲۱)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

www.ketab.ir

چکیده :

با وجود کارائی روش اجزاء محدود، یکی از مشکلاتی که در رابطه با آن مطرح است، مثبت معیّن باقی ماندن ماتریس ضرائب در تغییرشکلهای بزرگ و همچنین میزان وقت مورد نیاز رایانه برای تحلیل است، که جهت عملیّات شبکه بندی و آماده سازی اطلاعات لازم برای تحلیل مسائل از رایانه گرفته می شود. به هدف بهترنمودن شرائط دربرخورد با این مشکلات، روشهای دیگری ابداع شدند که در آنها حل معادلات دیفرانسیل حاکم تنها با استفاده از مجموعه ای از نقاط محدود صورت می گیرد و در آنها نیازی به شبکه اجزاء جهت تقریب متغیّرهای محلی نمی باشد. این روشها، روشهای "بدون جزء (Mesh Free)" نامیده می شوند. از مهمترین مزایای این روشها امکان ادامه تحلیل درهنگام تغییرشکلهای بزرگ است.

تاکنون روشهای بدون جزء به طور نسبتاً زیادی در تحلیل محیطهای آبی، مسائل ارتجاعی خطی در مکانیک جامدات، مکانیک شکست و مسائل انتشار ترکها بکار رفته اند. با این وجود، استفاده از این روشها در تحلیل محیط های خاکی و مصالح دارای رفتار ارتجاعی خمیری اندک بوده است.

یکی از روشهای بی نیاز از شبکه به نام روش بدون جزء گلرکین که به اختصار روش EFG نامیده می شود جهت تحلیل ارتجاعی خمیری یک سد خاکی استفاده شده است. به همین منظور، یک برنامه رایانه ای به زبان فرترن ۹۰ نوشته شده است که قابلیت تحلیل فوق را به دو روش EFG و روش اجزاء محدود در حالت دو بعدی داراست. تحلیلهای انجام شده نشان می دهند که، در صورت گره گذاری مناسب و انتخاب درست فراسنج ها، نتایج تحلیل EFG از دقّت بالاتری نسبت به روش اجزاء محدود برخوردارند امّا زمان زیاد محاسبات و همچنین حسّاسیّت نتایج نسبت به این فراسنج ها موجب می شود که با وجود مزایای روشهای بدون جزء، هنوز نتوان آنها را جایگزین مناسبی برای روش اجزاء محدود به حساب آورد.

www.ketab.ir

ازسویی دیگر، امروزه بتن یکی از مهمترین مصالح ساختمانی مورد مصرف در ساخت و سازها می باشد و این ماده که ترکیبی از سیمان و سنگدانه می باشد به لحاظ ویژگیهای مکانیکی مانند مقاومت و دوام و به دلیل ارزانی تهیه آن در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی مانند فولاد از جایگاه مهمّی در صنعت ساختمان برخوردار است.

نا گفته پیداست که اجرای موفق سازه های بتنی نیازمند تحلیل دقیق سازه تحت شرایط واقعی محیط می باشد تا به کمک نتایج حاصل از آن بتوان به طراحی مناسب سازه و در نهایت اجرای آن مبادرت ورزید.در این میان نقش نرم افزارهای تحلیل سازه ای برای تحلیل سازه های بتنی واقعی بر کسی پوشیده نیست.

امّا نکته مهمّ قابل اشاره در اینجا آن است که نرم افزارهای تجاری موجود در بازار که برای تحلیل سازه ها مورد استفاده مهندسان سازه قرار می گیرند فاقد الگوهای مناسب برای شبیه سازی رفتار بتن خصوصاً حین ترک خوردگی و خروج از شرائط پیوستگی ماده می باشند و لذا امکان محاسبات برای بتنهای ترک خورده از دیرگاه مورد نظر تحلیلگران عددی بوده، بطوریکه در برخی موارد پاسخ سازه های بتنی را نمی توان در مقابل بارهای وارده محاسبه کنند.

در این راستا باید عنوان نمود که اکثر الگوهای شبیه سازی رفتار بتن که دراختیار مهندسین مشاور قرار دارند، فراسنجهایشان تنها بر اساس نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه های استوانه ای بتن تحت آزمایشهای فشاری تک محوری و یا به طور محدودی تحت فشار سه محوری استوار هستند. بدیهی است که چنین الگوهایی قادر به پیش بینی آثار ویژگیهای رفتاری بتن تحت شرایط واقعی بارگذاری در سازه ها نمی باشند، زیرا در شرایط واقعی، ویژگیهای دیگری از رفتار ماده در طی مسیرهای پیچیده تنش فعال می شوند که به هیچ وجه در طول مسیرتنش ساده برروی نمونه های بتنی مورد آزمایش فعال نمی شوند. در الگوی پیشنهادی در این کتاب درجهت رفع مشکلات ذکرشده، الگوی چندصفحه ای

معرفی شده و با استفاده از نظریه صفحات ریزمقیاس و ترکیب آن با نظریه آسیب پیوسته به الگویی برای تحلیل پیشنهاد شده که قادر به پیش بینی رفتار بتن تحت هر مسیر تنش دلخواه می باشد .

در این الگو کلیه بارگذاریهای محتمل منجر به پیدایش پنج حالت مختلف آسیب متناظر با پنج وضعیّت مختلف بارگذاری روی هر ریز صفحه خواهد شد که به خوبی و با قدرت و دقّت بالایی می تواند رفتار بتن را حتی پس از پیدایش صدمات ناشی از ترک خوردن، تحت بارگذاریهای مختلف یکسویه و یا تناوبی پیش بینی و ارزیابی نماید. الگوی رفتاری یاد شده پس از آزمایش موفقیت آمیز، در دو نرم افزار تحلیل سازه ای سه بعدی به روش اجزاء محدود و روش نقاط محدود جایگذاری شده و مورد ارزیابی قرار گرفته اند. اعتبار نرم افزار فوق الذکر با حل مثالهای استاندارد موجود در مقالات علمی معتبر اثبات شد و سپس جهت تحلیل یک سد دو قوسی بتنی به کار گرفته شد.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اوّل	
۱- پیشگفتار	۱
فصل دوّم	
۲- مروری برروش تمرکز اطلاعات در نقاط	۵
۲-۱- مقدمه	۵
۲-۲- بررسی‌های روش تمرکز اطلاعات در نقاط	۸
۲-۳- شرائط برخورد با نقاط در روشهای عددی مختلف	۲۰
۲-۴- ویژگیهای روش نقاط محدود در کاربرد	۲۳
فصل سوّم	
۳- روشهای عددی بدون جزء بندی در حالت سه بعدی	۲۵
۳-۱- مقدمه	۲۵
۳-۲- مشکلات روشهای وابسته به اجزاء	۲۹
۳-۳- روش روشهای بدون جزء	۳۱
۳-۴- روشهای بدون جزء در مسائل مهندسی	۳۳
۳-۴-۱- پدیده های فیزیکی در مهندسی	۳۵
۳-۴-۲- مراحل حل	۳۵
۳-۴-۳- الگو سازی هندسه مسئله	۳۶
۳-۴-۴ - گره گذاری	۴۱
۳-۴-۵ - ایجاد تابع شکل	۴۴
۳-۴-۶- خصوصیات مصالح	۴۵
۳-۴-۷ - شرایط مرزی، اوّلیّه و بارگذاری	۴۶

www.ketab.ir

۳-۴-۸- شبیه سازی ۴۷
۳-۴-۸-۱- معادلات گسسته مجموعه ۴۷
۳-۴-۸-۲- روشهای حل دستگاه معادلات ۴۹
۳-۵- روند کلّی حل در روش های بدون جزء ۵۲
۳-۵-۱- گامهای اوّلیّه ۵۲
۳-۵-۱-۱- گام اوّل : الگوسازی هندسه کلّی مساله ۵۲
۳-۵-۱-۲- گام دوّم : درونیابی تغییر شکلها ۵۳
۳-۵-۱-۳-گام سوّم : تشکیل دستگاه معادلات ۵۶
۳-۵-۱-۴-گام چهارم : حل دستگاه معادلات کلّ بدون جزء ۵۶
۳-۶-۱- تعیین بعد دامنه حمایتی ۵۸
۳-۶-۲- تعیین میانگین فاصله گرهی ۵۹
۳-۶-۳- مفهوم دامنه تاثیر ۶۱
۳-۶-۴- خصوصیات توابع شکل بدون جزء ۶۲
۳-۷- جمع بندی و نتیجه گیری ۶۳

فصل چهارم

۴- روش بدون جزء گلرکین ۶۵
۴-۱ مقدمه و تاریخچه ۶۵
۴-۲- درونیاب حدّاقلّ مربّعات متحرّک(MLS) ۶۷
۴-۳- تابع وزنی ۷۲
۴-۴- سازگاری ۷۷
۴-۵- روابط حاکم در روش بدون جزء گلرکین (EFG) ۷۸
۴-۶- اعمال شرایط تکیه گاهی ۸۱
۴-۶-۱- روش ضرایب لاگرانژ ۸۲
۴-۶-۲- روش پنالتی ۹۴

www.ketab.ir

۴-۶-۳- تعیین ضریب پنالتی ۹۶
۴-۷- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۳

فصل پنجم
۵- روش EFG در مسائل ارتجاعی- خمیری ۱۰۷
۵-۱- مقدمه ۱۰۷
۵-۲- روابط عمومی ارتجاعی- خمیری ۱۰۸
۵-۳- تطبیق فراسنجهای رفتاری مصالح با رفتار آزمایشگاهی ۱۱۶
۵-۴- الگوریتم تحلیل ارتجاعی- خمیری در روش EFG ۱۲۲
۵-۵- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۶

فصل ششم
۶- معرفی برنامه رایانه ۱۲۷
۶-۱- مقدمه ۱۲۷
۶-۲- ساختار برنامه ۱۲۸
۶-۲-۱- ورودی ۱۲۸
۶-۲-۲- زیر برنامه ها ۱۲۹
۶-۲-۳- خروجی ۱۳۴

فصل هفتم
۷- تحلیل سد خاکی ۱۳۵
۷-۱- مقدمه ۱۳۵
۷-۲- مشخصات هندسی سد ۱۳۵
۷-۳- الگوسازی ۱۳۶
۷-۳-۱- گره گذاری ۱۳۶

www.ketab.ir

۷-۳-۲- شرایط مرزی ۱۳۷
۷-۴- الگوسازی ساخت مرحله ای سد ۱۳۸
۷-۵- تحلیل ارتجاعی- خمیری سد خاکی ۱۳۹
۷-۵-۱- کلیات تحلیل ۱۳۹
۷-۵-۲- مقایسه نتایج تحلیل بدست آمده از دو روش EFG و روش اجزاء محدود ۱۴۱
۷-۵-۳- بررسی تغییرشکل ها ۱۴۲
۷-۵-۴- بررسی تنشها ۱۴۶
۷-۵-۵- بررسی کرنش ها ۱۵۳
۷-۵-۶- بررسی تأثیر فرضهای موجود در روش EFG در نتایج ۱۵۵
۷-۵-۶-۱-بررسی تاثیر دامنه تأثیر تابع وزنی ۱۵۷
۷-۵-۶-۲- بررسی تأثیر ضریب حالت ۱۶۱
۷-۵-۶-۳- بررسی تأثیر نسبت تعداد نقاط گوسی شبکه انتگرالگیری به تعداد گره ها ۱۶۳
۷-۷- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۶۷

فصل هشتم

۸- الگوسازی رفتار بتن و نظریه آسیب ۱۶۹
۸-۱- نظریه صفحات ریز مقیاس ۱۶۹
۸-۱-۱- از صفحات لغزش (صفحات برشی) تا صفحات ریز مقیاس ۱۷۱
۸-۱-۲- الگو ریز مقیاس $M1^0$ ۱۷۳
۸-۱-۳- الگو ریز مقیاس M1 ۱۷۵
۸-۱-۴- الگو ریز مقیاس M2 ۱۷۷
۸-۱-۵- الگو ریز مقیاس M3 ۱۷۸
۸-۱-۶- الگو ریز مقیاس M4 ۱۷۹

www.ketab.ir

۸-۲- نظریه آسیب پیوسته ۱۷۹
۸-۲-۱- الگوهای آسیب همسانگرد موضعی ۱۸۱
۸-۲-۲- الگوهای آسیب همسانگرد غیر موضعی ۱۸۴

فصل نهم
۹- معرفی الگو صفحات ریز مقیاس پیشنهادی بتن و تطبیق آن ۱۸۵
۹-۱ مقدمه ۱۸۵
۹-۲- الگو سازی پیشنهادی بتن ۱۸۵
۹-۲-۱ - الگو صفحات ریز مقیاس با قید حرکتی ۱۸۶
۹-۲-۲- نظریه آسیب همسانگرد همراه با توابع آسیب پیشنهادی ۱۹۲
۹-۲-۲-۱- توابع آسیب پیشنهادی روی ریز صفحات ۱۹۵
۹-۳- تطبیق الگو رفتاری بتن ۱۹۹
۹-۳-۱- آزمایش فشاری تک محوری (UC) ۱۹۹
۹-۳-۲- آزمایش فشاری سه محوری (CTC) ۲۰۴
۹-۳-۳- آزمایش کششی تک محوری (UT) ۲۰۸
۹-۳-۴- بارهای تناوبی ۲۱۰

فصل دهم
۱۰- درونیابی نقطه ای چند جمله ای در روش عددی بدون جزء بندی (PPIM) ۲۱۳
۱۰-۱- مقدمه ۲۱۳
۱۰-۲- روشهای درونیابی نقطه ای ۲۱۵
۱۰-۳- روش درونیابی نقطه ای چند جمله ای ۲۱۶

www.ketab.ir

فصل یازدهم

۱۱- نرم افزار بدون جزء بندی سه بعدی و الگو رفتاری بتن توسعه یافته در آن ۲۲۳
۱۱-۱- مقدمه ۲۲۳
۱۱-۲- معرفی نرم افزار تحلیل سازه ای بدون جزء بندی ۲۲۳
۱۱-۲-۱- نرم افزار اجزاء محدود توسعه یافته ۲۲۴
۱۱-۲-۲- نحوه توسعه نرم افزار اجزاء محدود به نرم افزار بدون جزء بندی ۲۲۴
۱۱-۲-۲-۱- بخش ورود اطلاعات ۲۲۸
۱۱-۲-۲-۲- بخش محاسبه تشکیل بردار بار معادل گرهی خارجی ۲۲۹
۱۱-۲-۲-۳- بخش تشکیل ماتریس سختی ۲۳۰
۱۱-۲-۲-۴- بخش محاسبه تشکیل بردار بار معادل گرهی داخلی ۲۳۱
۱۱-۳- کاربرد الگو رفتاری صفحات ریز مقیاس بتن در نرم افزار مورد مطالعه ۲۳۲
۱۱-۴- تحلیل برگشتی ۲۳۳
۱۱-۴-۱- آزمایش خمش سه نقطه ای ۲۳۳
۱۱-۴-۲- آزمایش کشش مستقیم ۲۳۸
۱۱-۴-۳- آزمایش کشش + برش نمونه دو شکافی ۲۴۰
۱۱-۵- اثر اندازه سازه در مقاومت مکانیکی ۲۴۴
۱۱-۵-۱- الگو ریز صفحه ای آسیب پیشنهادی و اثر اندازه ۲۴۶

فصل دوازدهم

۱۲- تحلیل یک سد دو قوسی بتنی به کمک نرم افزار ارائه شده ۲۵۱
۱۲-۱- مقدمه ۲۵۱
۱۲-۲- الگوسازی سد و تکیه گاهها و مشخصات مصالح ۲۵۳

www.ketab.ir

۱۲-۳- تحلیل سد تحت بارهای وزن و فشار هیدرواستاتیک مخزن ۲۵۵
۱۲-۳-۱- جابجائی ها ۲۵۵
۱۲-۳-۲- تنشها ۲۶۰
۱۲-۳-۳- تنشهای ریز صفحات و بررسی وضعیّت ترکها ۲۶۲

فصل سیزدهم
۱۳- نتایج ۲۷۳
۱۳-۱- نتایج حالت دوبعدی ۲۷۳
۱۳-۲- مقایسه روش در حالت دو بعدی ۲۷۵
۱۳-۳- شکست نمونه ها در آزمایشگاهی درحالت سه بعدی ۲۷۷
۱۳-۳-۱- نمونه های استفاده ای ۲۷۷
۱۳-۳-۲- آزمایش فشاری سه محوری ۲۷۷
۱۳-۳-۳- آزمایش کشش محوری ۲۷۸
۱۳-۳-۴- هندسه سد و درّه ۲۷۸

مراجع ۲۷۹

پیوست ها (مراجعه شود به لوح فشرده ملحق شده به کتاب)

www.ketab.ir