

١٧١١٠٦٥٥٥
١٧١٢١١

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

١١٠٢١٧

۸۷/۱/۱۰۶۰۰۰

۸۷/۱۲/۱۱



دانشکده مهندسی

پایان نامه دکتری در رشته مهندسی عمران (مکانیک خاک و پی)

تحلیل الاستو-پلاستیک خاکهای مسلح با استفاده از روش درون یابی نقطه‌ای

توسط

سید محمد بینش

اساتید راهنما:

دکتر ارسالان قهرمانی

دکتر نادر هاتف

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۱۵

معاونت اساتید راهنما
تسویه مدارک

دیماه ۱۳۸۷

۱۱۰۲۱۷

به نام خدا

تحلیل الاستو-پلاستیک خاکهای مسلح با استفاده از روش درون یابی
نقطه‌ای

به وسیله‌ی:

سید محمد بینش

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه دکتری

در رشته‌ی:

مهندسی عمران - گرایش مکانیک خاک و پی

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه عالی

دکتر ارسلان قهرمانی، استاد بخش مهندسی راه و ساختمان (رئیس کمیته)

دکتر نادر هاتف، استاد بخش مهندسی راه و ساختمان (رئیس کمیته)

دکتر فرهنگ دانشمند، دانشیار بخش مهندسی مکانیک

دکتر مجتبی جهان‌اندیش، دانشیار بخش مهندسی راه و ساختمان

دیماه ۱۳۸۷

سپاسگزاری

اکنون که به یاری خداوند متعال این رساله به پایان رسیده است بر خود واجب می‌دانم که از زحمات اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر قهرمانی و جناب آقای دکتر هاتف کمال تشکر را داشته باشم. همچنین لازم است که از تمامی اعضای خانواده‌ام بخصوص پدر و مادر عزیزم نهایت سپاسگزاری را بنمایم.

چکیده

تحلیل الاستو-پلاستیک خاکهای مسلح با استفاده از روش درون‌یابی نقطه‌ای

بوسیله‌ی:

سید محمد بینش

یکی از نوآوری‌های مهم در علوم مهندسی ژئوتکنیک استفاده از ژئوسینتتیکها برای بهبود خصوصیات خاک و در نتیجه پیدایش خاکهای مسلح می‌باشد. امروزه متداولترین روش برای تحلیل خاکهای مسلح، روش المان محدود است که از محدودیتهای ناشی از تعریف شبکه رنج می‌برد. در تحقیق حاضر از روش درون‌یابی نقطه‌ای که یکی از روشهای بدون شبکه می‌باشد برای تحلیل ارتجاعی-خمیری خاکهای مسلح استفاده شده است. در این روش یک تابع پیوسته توسط مجموع حاصلضرب یکسری توابع اساسی در ضرایب ثابت تقریب زده می‌شود. ضرایب ثابت از طریق درون‌یابی بین مقادیر گره‌ای در تکیه‌گاه هر نقطه مشخص می‌شوند. توابع اساسی مورد استفاده در این تحقیق از نوع توابع شعاعی می‌باشند. برای تضمین سازگاری روش تخمین، علاوه بر توابع شعاعی اساسی، توابع کثیرالجزئی تا مرتبه یک نیز در نظر گرفته شده‌اند. جهت تحلیل خاک مسلح از توصیف مجزای محیط استفاده شده است؛ لذا سه قسمت خاک، مسلح‌کننده‌ها و لایه‌های واسطه به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. در هر قسمت میدان جابجایی براساس روش درون‌یابی نقطه‌ای تشکیل می‌شود. سیستم نهایی معادلات از جایگذاری میدان جابجایی در فرم ضعیف معادلات حاکمه بدست می‌آید. معیار مور-کولمب به عنوان معیار زوال برای تحلیل ارتجاعی-خمیری قسمتهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. جهت شبیه‌سازی لایه‌های واسطه از مفهوم المان رابط بهره گرفته شده است و نیازی به تمهیداتی نظیر ضرایب لاگرانژ نمی‌باشد. برای انتگرالگیری از فرم ضعیف معادلات، ابتدا از روش گاوس استفاده شده است. مطالعه عددی نشان داد که استفاده از روش گاوس می‌تواند در دقت جوابها تاثیر زیادی داشته باشد. لذا از یک روش انتگرالگیری گره‌ای پایدار استفاده شده است که علاوه بر کاهش تاثیر روش انتگرالگیری بر نتایج، دقت خطی روش را نیز تضمین می‌کند. مطالعه عددی روش مطرح شده در این تحقیق، مطابقت بسیار خوبی را بین نتایج حاصل از این روش و حل‌های دقیق، نتایج آزمایشگاهی و حل‌های بدست آمده از روش المان محدود با تعداد المانهای زیاد نشان می‌دهد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۳	فصل دوم: مفاهیم کلی در حل عددی مسائل مهندسی
۳	۱-۲- بیان مساله
۴	۲-۲- فرم قوی و فرم ضعیف معادلات
۵	۱-۲-۲- روشهای انرژی
۵	۱-۲-۲-۱- اصل حداقل انرژی پتانسیل
۶	۱-۲-۲-۲- اصل هامیلتون
۶	۲-۲-۲- روشهای باقیمانده وزن دار شده
۸	۱-۲-۲-۲- روش گالرکین
۹	فصل سوم: مبانی روشهای بدون شبکه
۹	۱-۳- مفاهیم رایج در روشهای بدون شبکه
۹	۱-۱-۳- متغیر میدانی
۹	۲-۱-۳- دامنه تکیه گاهی
۱۰	۳-۱-۳- گره و نقطه
۱۰	۴-۱-۳- شبکه پس زمینه
۱۱	۵-۱-۳- درون یابی و تخمین
۱۱	۶-۱-۳- سازگاری و بازتولید
۱۲	۷-۱-۳- توابع اساسی
۱۲	۲-۳- مبانی حل مساله توسط روشهای بدون شبکه
۱۳	۳-۳- تقسیم بندی روشهای بدون شبکه
۱۳	۱-۳-۳- تقسیم بندی روشهای بدون شبکه براساس نحوه تشکیل سیستم معادلات
۱۴	۱-۱-۳-۳- روشهای بدون شبکه براساس فرم ضعیف
۱۴	۲-۱-۳-۳- روشهای بدون شبکه براساس فرم قوی
۱۴	۳-۱-۳-۳- روشهای بدون شبکه براساس ترکیب فرم قوی و فرم ضعیف
۱۵	۲-۳-۳- تقسیم بندی روشهای بدون شبکه براساس نحوه تشکیل تابع تقریب
۱۵	۱-۲-۳-۳- روشهایی که تابع تقریب را به صورت انتگرال معین در نظر می گیرند

۱۵	۲-۲-۳-۳- روشهایی که تابع تقریب را به صورت سری محدود در نظر می گیرند
۱۶	۲-۲-۳-۳- روشهایی که تابع تقریب را به صورت بسط تیلور در نظر می گیرند
۱۶	۳-۳-۳- تقسیم بندی براساس نوع برخورد با مساله
۱۶	۴-۳- مقایسه روشهای بدون شبکه با روش المان محدود
۱۸	فصل چهارم: مروری بر تحقیقات انجام شده
۱۸	۱-۴- تاریخچه روشهای بدون شبکه
۲۱	۲-۴- نگاهی اجمالی به برخی از روشهای رایج بدون شبکه
۲۱	۱-۲-۴- روش ذرات هیدرودینامیکی صاف
۲۲	۲-۲-۴- روش ذره ای با هسته بازتولید کننده
۲۲	۳-۲-۴- روش بدون المان گالرکین
۲۴	فصل پنجم: روش درون یابی نقطه ای
۲۴	۱-۱- روش درون یابی نقطه ای با استفاده از کثیرالجمله ای ها (PIM)
۲۷	۱-۱-۵- خصوصیات توابع شکل در روش درون یابی نقطه ای با استفاده از کثیرالجمله ای ها
۲۷	۱-۱-۱-۵- سازگاری
۲۸	۲-۱-۱-۵- بازتولید
۲۸	۳-۱-۱-۵- استقلال خطی
۲۹	۴-۱-۱-۵- خاصیت دلتای کرانکر
۲۹	۵-۱-۱-۵- جز بندی یکپارچه
۳۰	۶-۱-۱-۵- بازتولید خطی
۳۰	۷-۱-۱-۵- فرم کثیرالجمله ای
۳۱	۸-۱-۱-۵- دامنه تکیه گاهی
۳۱	۹-۱-۱-۵- تابع وزن
۳۱	۱۰-۱-۱-۵- همسازی
۳۱	۲-۱-۵- روشهای جلوگیری از منفرد شدن ماتریس گشتاور
۳۱	۱-۲-۱-۵- تغییر مکان کوچک اتفاقی برای نقاط موجود در تکیه گاه
۳۲	۲-۲-۱-۵- انتقال مختصات
۳۲	۳-۲-۱-۵- استفاده از الگوریتم مثلثی سازی ماتریس
۳۳	۴-۲-۱-۵- استفاده از توابع اساسی شعاعی
۳۳	۲-۲- روش درون یابی نقطه ای با استفاده از توابع اساسی شعاعی (RBPIM)
۳۵	۱-۲-۵- خصوصیات روش RBPIM
۳۵	۱-۱-۲-۵- وارون پذیر بودن ماتریس گشتاور
۳۵	۲-۱-۲-۵- سازگاری

صفحه	عنوان
۳۶	۵-۲-۱-۳- خاصیت دلتای کرانکر
۳۶	۵-۲-۱-۴- دامنه تکیه گاهی
۳۶	۵-۲-۱-۵- همسازی
۳۶	۵-۲-۲- مزایا و معایب استفاده از توابع شعاعی به جای کثیرالجمله ای ها
۳۷	۵-۲-۳- روش RBPIM تقویت شده بوسیله کثیرالجمله ای ها
۳۹	فصل ششم: مدل سازی خاک مسلح با استفاده از روش بدون شبکه
۳۹	۶-۱- معادلات کلی برای مسائل صفحه ای
۳۹	۶-۱-۱- معادلات تعادل استاتیکی
۴۰	۶-۱-۲- روابط کرنش- جابجایی
۴۰	۶-۱-۲-۱- خاک و مسلح کننده ها
۴۱	۶-۱-۲-۲- لایه واسطه
۴۳	۶-۱-۳- رابطه تنش-کرنش
۴۳	۶-۱-۳-۱- خاک و مسلح کننده ها
۴۳	۶-۱-۳-۱-۱- رفتار ارتجاعی
۴۳	۶-۱-۳-۱-۲- رفتار ارتجاعی خمیری
۴۷	۶-۱-۳-۱-۳- لایه واسطه
۴۷	۶-۱-۳-۱-۴- رفتار ارتجاعی
۴۷	۶-۱-۳-۱-۵- رفتار ارتجاعی خمیری
۴۸	۶-۱-۳-۲-۳- لغزش و جدایی در لایه واسطه
۴۹	۶-۲- اصول تغییراتی محیطهای گسسته و تشکیل سیستم معادلات
۵۱	۶-۳- نکات اساسی در حل مساله
۵۱	۶-۳-۱- تشکیل هندسه مساله
۵۱	۶-۳-۲- انتخاب تابع شعاعی اساسی
۵۲	۶-۳-۳- شبکه پس زمینه
۵۳	۶-۳-۴- تشکیل دامنه تکیه گاهی
۵۵	۶-۳-۵- معیار زوال
۵۸	۶-۳-۶- نحوه حل مساله با رفتار غیرخطی ماده
۶۰	۶-۳-۷- نحوه حل مساله با شرایط مرزی اساسی
۶۱	۶-۴- نمودار روش حل
۶۶	فصل هفتم: تصدیق برنامه با حل چند مثال
۱۱۳	فصل هشتم: انتگرالگیری گره ای
۱۱۳	۸-۱- مقدمه

صفحه	عنوان
۱۱۶	۸-۲- روش هموارسازی کرنش
۱۱۹	۸-۳- حل چند مثال
۱۴۱	۸-۴- راهکار کلی حل مسائل مربوط به خاکهای مسلح براساس روش درونیابی نقطه‌ای
۱۴۳	فصل نهم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۵	منابع و مراجع

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان و شماره
۳۴	جدول (۱-۵) نمونه‌هایی از توابع شعاعی مختلف
۸۳	جدول (۱-۷) نتایج تحلیل روش بدون شبکه برای ستون مسلح

فهرست شکلها

صفحه	عنوان و شماره
۴	شکل (۱-۲) میله ارتجاعی تحت تاثیر نیروی \bar{F}
۱۰	شکل (۱-۳) : دامنه تکیه‌گاه، که می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد
۱۱	شکل (۲-۳) تخمین تابع
۱۳	شکل (۳-۳) : مدل‌سازی هندسی
۱۵	شکل (۴-۳) تابع $f(x)$
۱۷	شکل (۵-۳) مقایسه بین روش المان محدود و روش بدون شبکه
۲۵	شکل (۱-۵) : مثلث پاسکال برای تک جمله‌ای‌ها در فضای دو بعدی
۳۲	شکل (۲-۵) : (الف) چینش منظم ۶ گره (ب) جابجایی اتفاقی گره‌ها
۴۲	شکل (۱-۶) مدل‌سازی لایه واسطه در روش بدون شبکه
۴۴	شکل (۲-۶) مدل‌سازی رفتار ارتجاعی-خمیری بر اساس وضعیت تنش نقطه
۵۳	شکل (۳-۶) ایجاد شبکه توسط (الف) المانهای پس‌زمینه (ب) استفاده از سلول
۵۴	شکل (۴-۶) نحوه تعیین دامنه تکیه‌گاه با استفاده از ضابطه رویت
۵۴	شکل (۵-۶) نحوه تعیین دامنه تکیه‌گاه با استفاده از روش انکسار
۵۵	شکل (۶-۶) ضابطه رویت در یک دامنه تکیه‌گاهی
۵۵	شکل (۷-۶) نحوه در نظر گرفتن دامنه‌های تکیه‌گاهی برای محیط خاک و مسلح‌کننده
۵۸	شکل (۸-۶) روش نیوتن-رافسون
۵۹	شکل (۹-۶) روش نیوتن-رافسون اصلاح شده
۵۹	شکل (۱۰-۶) روش تنش اولیه
۶۵	شکل (۱۱-۶) نمودار روند حل مساله
۶۷	شکل (۱-۷) تیر طره تحت بارگذاری سهموی در انتهای آزاد
۶۷	شکل (۲-۷) مدل بدون شبکه تیر طره
۶۸	شکل (۳-۷) تغییر فرم تیر در راستای محور x
۶۸	شکل (۴-۷) (الف) تنش برشی (ب) تنش نرمال در مقطع میانی تیر
۶۹	شکل (۵-۷) (الف) مدل‌سازی آزمایش ادنومتر (ب) منحنی تنش-کرنش اصلی در آزمایش ادنومتر
۷۰	شکل (۶-۷) (الف) مدل‌سازی بدون شبکه (ب) شبکه‌بندی پس‌زمینه در آزمایش ادنومتر

- شکل (۷-۷) منحنی‌های تنش-کرنش اصلی برای نقطه گاوس شماره (الف) ۵ (ب) ۲۱ (ج) ۲۶ ۷۱
- شکل (۸-۷) ستون متشکل از ۲ ماده ارتجاعی ۷۲
- شکل (۹-۷) مدل بدون شبکه ستون دو تکه با ۹۰ گره ۷۳
- شکل (۱۰-۷) نحوه تغییر شاخصهای e_n و e_d با تغییر شعاع دامنه تکیه‌گاهی ۷۴
- شکل (۱۱-۷) نحوه تغییر e_n و e_d با تعداد تعدادگره‌ها در دامنه تکیه‌گاهی ۷۵
- شکل (۱۲-۷) نحوه تغییر $\text{Log}(e_d)$ با پارامترهای C و q ۷۶
- شکل (۱۳-۷) نحوه تغییر $\text{Log}(e_n)$ با پارامترهای C و q ۷۶
- شکل (۱۴-۷) مدل بدون شبکه برای ستون دو تکه با (الف) ۳۰ گره (ب) ۳۰۶ گره ۷۷
- شکل (۱۵-۷) نحوه تغییر شاخصهای e_n و e_d با تغییر در فاصله گره‌ها در مدل بدون شبکه ۷۸
- شکل (۱۶-۷) ستون مسلح ارتجاعی تحت بار متمرکز ۷۹
- شکل (۱۷-۷) مدل‌های المان محدود برای ستون مسلح با افزایش تعداد المانها از چپ به راست ۸۰
- شکل (۱۸-۷) نحوه تغییر پارامتر η با افزایش تعداد المانها ۸۰
- شکل (۱۹-۷) مدل‌های بدون شبکه برای ستون مسلح با (الف) ۱۸ (ب) ۴۰ (ج) ۱۰۰ گره ۸۱
- شکل (۲۰-۷) شبکه پس‌زمینه جهت انتگرالگیری ۸۱
- شکل (۲۱-۷) نحوه تغییر e_d نسبت به فاصله بین گره‌ای در مدل‌های بدون شبکه ستون مسلح ۸۲
- شکل (۲۲-۷) مدل دو بعدی آزمایش بیرون کشیدن مسلح کننده ۸۴
- شکل (۲۳-۷) مدل بدون شبکه برای آزمایش بیرون کشیدن مسلح کننده ۸۵
- شکل (۲۴-۷) شبکه پس‌زمینه برای انتگرالگیری ۸۵
- شکل (۲۵-۷) نحوه توزیع تنش (الف) نرمال (ب) برشی برای $F_h = 0$ ۸۵
- شکل (۲۶-۷) نحوه توزیع تنش (الف) نرمال (ب) برشی برای $F_h = 25 \text{ kN}$ ۸۵
- شکل (۲۷-۷) نحوه توزیع تنش (الف) نرمال (ب) برشی برای $F_h = 50 \text{ kN}$ ۸۶
- شکل (۲۸-۷) نحوه توزیع تنش (الف) نرمال (ب) برشی برای $F_h = 57.5 \text{ kN}$ ۸۶
- شکل (۲۹-۷) الگوهای خاک مسلح با (الف) ۱ (ب) ۲ (ج) ۳ مسلح کننده ۸۷
- شکل (۳۰-۷) افزایش تعداد المانها برای تولید شبکه ۸۸
- شکل (۳۱-۷) مدل‌های المان محدود ۸۹
- شکل (۳۲-۷) مدل‌های بدون شبکه برای مدل‌هایی با (الف) ۱ (ب) ۲ (ج) ۳ لایه مسلح کننده ۹۰
- شکل (۳۳-۷) شبکه پس‌زمینه جهت انتگرالگیری ۹۰
- شکل (۳۴-۷) نمودار بار-تغییر فرم برای مدل‌های خاک مسلح با $R_{inter} = 1$ ۹۲
- شکل (۳۵-۷) نمودار بار-تغییر فرم برای مدل‌های خاک مسلح با $R_{inter} = 0.7$ ۹۳

- شکل (۳۶-۷) نمودار بار-تغییرفرم برای مدل سه لایه‌ای خاک مسلح با $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ۹۴
- شکل (۳۷-۷) (الف) محیط نیمه بینهایت ارتجاعی تحت تاثیر پی صلب (ب) نحوه توزیع تنش ۹۵
- شکل (۳۸-۷) مدل‌های بدون شبکه برای محیط ارتجاعی نیمه بینهایت با (الف) ۲۳۳ (ب) ۸۶۱ گره ۹۶
- شکل (۳۹-۷) شکل تغییرفرم داده برای مدل‌های بدون شبکه با (الف) ۲۳۳ (ب) ۸۶۱ گره ۹۶
- شکل (۴۰-۷) نسبت تنش قائم به کل نیروی عکس العمل برای نقاط زیر پی ۹۷
- شکل (۴۱-۷) پروفیل جابجایی قائم برای نیمی از مرز فوقانی مدل ۹۸
- شکل (۴۲-۷) مدل المان محدود برای خاک مسلح ۹۹
- شکل (۴۳-۷) مدل بدون شبکه برای خاک مسلح با ۵۴۱ گره ۹۹
- شکل (۴۴-۷) منحنی بار-تغییرفرم ۹۹
- شکل (۴۵-۷) تعیین جابجایی برای دو انتهای قطعه ۱۰۰
- شکل (۴۶-۷) نیروی محوری در لایه مسلح کننده (الف) بالایی (ب) میانی (ج) پایینی ۱۰۱
- شکل (۴۷-۷) تنش عمودی در لایه‌های واسطه برای مسلح کننده (الف) بالای (ب) میانی (ج) پایینی ۱۰۲
- شکل (۴۸-۷) توزیع تنش برشی در بالاترین مسلح کننده برای لایه واسطه (الف) فوقانی (ب) زیرین ۱۰۳
- شکل (۴۹-۷) توزیع تنش برشی در مسلح کننده میانی برای لایه واسطه (الف) فوقانی (ب) زیرین ۱۰۴
- شکل (۵۰-۷) توزیع تنش برشی در پایین‌ترین مسلح کننده برای لایه واسطه (الف) فوقانی (ب) زیرین ۱۰۴
- شکل (۵۱-۷) ابعاد هندسی شیب مسلح ۱۰۶
- شکل (۵۲-۷) مدل المان محدود برای شیب مسلح با ۱۵۹۵ عدد المان ۱۰۶
- شکل (۵۳-۷) مدل بدون شبکه برای شیب مسلح ۱۰۶
- شکل (۵۴-۷) شبکه سلولی پس‌زمینه 5×10 بلوکی با ۴ نقطه گاوس در هر بلوک ۱۰۷
- شکل (۵۵-۷) شبکه سلولی پس‌زمینه 5×10 بلوکی با ۱۶ نقطه گاوس در هر بلوک ۱۰۷
- شکل (۵۶-۷) شبکه سلولی پس‌زمینه 12×16 بلوکی با ۹ نقطه گاوس در هر بلوک ۱۰۷
- شکل (۵۷-۷) شبکه سلولی پس‌زمینه 10×15 بلوکی با ۱۶ نقطه گاوس در هر بلوک ۱۰۸
- شکل (۵۸-۷) شبکه سلولی پس‌زمینه 30×60 بلوکی با ۴ نقطه گاوس در هر بلوک ۱۰۸
- شکل (۵۹-۷) منحنی‌های بار-تغییرفرم برای مدل‌های بدون شبکه با سلول‌های پس‌زمینه مختلف ۱۰۹
- شکل (۶۰-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×10 و شبکه 5×10 با ۴ نقطه گاوس در هر المان ۱۱۰
- شکل (۶۱-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×10 و شبکه 5×10 با ۱۶ نقطه گاوس در هر المان ۱۱۰
- شکل (۶۲-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×10 و شبکه 10×10 با ۱۶ نقطه گاوس در هر المان ۱۱۱
- شکل (۶۳-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×10 و شبکه 7×10 با ۱۶ نقطه گاوس در هر المان ۱۱۱
- شکل (۶۴-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×30 و شبکه 15×30 با ۴ نقطه گاوس در هر المان ۱۱۱

- شکل (۶۵-۷) المانهای پس‌زمینه با شبکه 1×12 و شبکه 9×12 با ۱۶ نقطه گاوس در هر المان
 شکل (۵۹-۷) منحنی‌های بار- تغییر فرم برای مدل‌های بدون شبکه با المانهای پس‌زمینه مختلف
 شکل (۱-۸) عدم تطابق شبکه پس‌زمینه و دامنه‌های تکیه‌گاهی
 شکل (۲-۸) ناپایداری در جواب مساله ناشی از انتگرالگیری گره‌ای برای یک مساله یک بعدی
 شکل (۳-۸) سلول ورونویی دربرگیرنده نقطه L
 شکل (۴-۸) (الف) توزیع گره‌ها در محیط (ب) نمودار ورونویی
 شکل (۵-۸) مدل بدون شبکه و نمودار ورونویی برای ستون دو تکه
 شکل (۶-۸) تغییرات e_n با اندازه شعاع دامنه تکیه‌گاهی برای دو روش مختلف انتگرالگیری
 شکل (۷-۸) تغییرات e_h با اندازه شعاع دامنه تکیه‌گاهی برای دو روش مختلف انتگرالگیری
 شکل (۸-۸) مدل‌های بدون شبکه برای ستون دو تکه با (الف) ۳۰ گره (ب) ۳۰۶ گره
 شکل (۹-۸) نحوه تغییر e_h و e_n با تغییر در فاصله گره‌ای
 شکل (۱۰-۸) ستون ارتجاعی مسلح
 شکل (۱۱-۸) مدل‌های المان محدود با افزایش تعداد المانها از چپ به راست
 شکل (۱۲-۸) نحوه تغییر پارامتر η با افزایش تعداد المانها
 شکل (۱۳-۸) مدل‌های بدون شبکه و نمودار ورونویی
 شکل (۱۴-۸) نحوه تغییر e_h با افزایش تعداد گره‌ها
 شکل (۱۵-۸) نحوه تغییر پارامتر e_h با اندازه‌های مختلف شعاع دامنه تکیه‌گاهی
 شکل (۱۶-۸) نحوه تغییر پارامتر e_h با تغییر در پارامترهای C و q در مدل بدون شبکه
 شکل (۱۷-۸) مدل ۲۲۵ گره‌ای ستون مسلح با آرایش نامنظم گره‌ها
 شکل (۱۸-۸) تاثیر بهم ریختگی بر پارامتر e_h برای شعاعهای تکیه‌گاهی مختلف
 شکل (۱۹-۸) مدل بدون شبکه و نمودار ورونویی برای خاک مسلح با سه لایه مسلح‌کننده
 شکل (۲۰-۸) نمودار بار-تغییر فرم برای نقطه میانی زیر پی
 شکل (۲۱-۸) مخزن مورد استفاده برای آزمایش بیرون کشیدن
 شکل (۲۲-۸) ابزارگذاری مسلح‌کننده
 شکل (۲۳-۸) مدل المان محدود برای آزمایش بیرون کشیدن
 شکل (۲۴-۸) توزیع بار در طول ژئوگرید با طول $1/1 m$
 شکل (۲۵-۸) توزیع کرنش در طول ژئوگرید با طول $1/1 m$
 شکل (۲۶-۸) مدل بدون شبکه همراه با شبکه ورونویی برای آزمایش بیرون کشیدن
 شکل (۲۷-۸) توزیع بار در طول مسلح‌کننده با $10 mm$ جابجایی محل کشیدن مسلح‌کننده

عنوان و شماره

صفحه

- شکل (۲۸-۸) توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده با ۱۰ mm جابجایی محل کشیدن مسلح‌کننده
۱۳۵
- شکل (۲۹-۸) توزیع بار در طول مسلح‌کننده با ۲۰ mm جابجایی محل کشیدن مسلح‌کننده
۱۳۵
- شکل (۳۰-۸) توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده با ۲۰ mm جابجایی محل کشیدن مسلح‌کننده
۱۳۶
- شکل (۳۱-۸) هندسه مساله
۱۳۷
- شکل (۳۲-۸) شمای کلی قطعه X شکل
۱۳۸
- شکل (۳۳-۸) مدل بدون شبکه مساله
۱۳۸
- شکل (۳۴-۸) شبکه ورونویی جهت انتگرالگیری گره‌ای
۱۳۹
- شکل (۳۵-۸) شکل تغییر فرم داده محیط پس از تحلیل با جابجاییهایی ۱۰ برابر مقدار واقعی
۱۳۹
- شکل (۳۶-۸) توزیع تنش σ_x در طول بازو
۱۴۰
- شکل (۳۷-۸) توزیع تنش σ_y در طول بازو
۱۴۰

فصل اول

مقدمه

یکی از نوآوریهای مهم در صنعت راه و ساختمان که در نیمه دوم قرن بیستم معرفی گردید، استفاده از ژئوسینتتیکها جهت بهبود خصوصیات خاک بوده است. با وجود اینکه تا اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ تنها تعداد معدودی از موارد استفاده از ژئوسینتتیکها گزارش شده بود، امروزه کاربرد این مواد مقبولیت جهانی یافته است و در بسیاری از سازه‌های خاکی نظیر دیوارها، تکیه‌گاه پلها، شیبهای تند، خاکریزها، پی‌ها، بستر راهها و راه‌آهن و حتی فرودگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از ویژگیهای جالب در استفاده از ژئوسینتتیکها آن است که ابتدا این مواد به صورت موفقیت‌آمیزی در عمل مورد استفاده قرار گرفتند سپس، کمی بعد، تحقیقات در زمینه ایجاد استاندارد، آنالیز و روشهای طراحی آنها آغاز گردید.

امروزه آنالیز و طراحی خاکهای مسلح عمدتاً بوسیله نرم افزارهای المان محدود انجام می‌گیرد. در این نرم افزارها که عموماً شرایط آنالیز به صورت دو بعدی (کرنش صفحه ای) در نظر گرفته می‌شود، محیط خاک به تعداد زیادی المان تقسیم‌بندی می‌گردد. سپس ژئوسینتتیکها به صورت المانهای یک بعدی سازگار با المانهای محیط معرفی می‌گردند و شرایط لایه واسطه خاک و ژئوسینتتیکها نیز مشخص می‌شود. نهایتاً پس از اعمال شرایط مرزی آنالیزها انجام می‌گیرد و تنشها و کرنشها در نقاط مختلف محیط و مسلح کننده‌ها بدست می‌آیند.

عمده ضعف روشهایی که براساس شبکه بندی آنالیز را انجام می‌دهند آن است که با هر تغییری در هندسه مساله، لازم است که تولید شبکه مجدداً انجام گیرد و این امر کاری زمان‌بر می‌باشد و علاوه بر وقت بیشتر، پیچیدگی کار را زیاد کرده و از دقت نتایج می‌کاهد. از جمله ضعفهای دیگر این روشها می‌توان به دقت کم در محاسبه تنشها، بخصوص در مورد پدیده‌های پیچیده‌ای نظیر گسترش ترک و یا تغییر فاز (به دلیل ناپیوستگی‌های شدید) اشاره کرد. علاوه براین، روشهایی که برای باز تولید شبکه^۱ استفاده می‌شوند تنها در فضای مسائل دو بعدی کاربرد دارند و در مسائل سه بعدی بدلیل ضعف تکنیکی قابل استفاده نمی‌باشند. با توجه به

^۱ Re-mesh

مطالب فوق محققین همواره به دنبال راهکارهایی بوده‌اند که بتوانند مشکلات ناشی از شبکه‌بندی را برطرف کرده و بر دقت و سرعت محاسبات بیافزایند.

روشهای عددی بدون شبکه یکی از راهکارهایی هستند که برای دوری از مشکلات مطرح شده در بالا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این روشها که عمر زیادی از مطرح شدنشان نمی گذرد تا حد زیادی معایب فوق را برطرف می کنند.

تحقیق حاضر تلاشی است برای ارزیابی کارآمدی یکی از روشهای بدون شبکه در تحلیل مکانیکی خاکهای مسلح. براساس روش عنوان شده می‌توان مسلح‌کننده‌ها را با هر ضخامتی به صورت دو بعدی مدلسازی کرد و وضعیت کلی تنش را در آنها تعیین نمود. با توجه به جدید بودن استفاده از روش بدون شبکه در خاک مسلح، این تحقیق تنها به بررسی رفتار ارتجاعی-خمیری خاک مسلح در شرایط کرنش صفحه‌ای و تحت بارگذاری استاتیکی محدود می‌شود.

فصل دوم

مفاهیم کلی در حل عددی مسائل مهندسی

۱-۲- بیان مساله

به طور کلی مسائل مهندسی را می‌توان به صورت مسائلی با شرایط مرزی در نظر گرفت. هر مساله با شرایط مرزی از یک معادله دیفرانسیل معمولی یا معادله دیفرانسیل جزئی با دسته‌ای از شرایط مرزی تشکیل شده است. به عنوان نمونه‌ای از اینگونه مسائل، میله‌ای ارتجاعی را در نظر می‌گیریم که در انتهای سمت راست تحت تاثیر نیروی \bar{F} قرار دارد و در انتهای سمت چپ جابجایی مشخص \bar{u} را تجربه می‌کند (شکل (۱-۲)). همچنین نیروی حجمی $b(x)$ در واحد طول میله وارد می‌شود. با فرض اینکه سطح مقطع میله و مدول ارتجاعی آن به ترتیب مقادیر ثابتی برابر با E و A باشند، می‌توان معادله تعادل برای جزء دیفرانسیلی از میله را به صورت زیر نوشت:

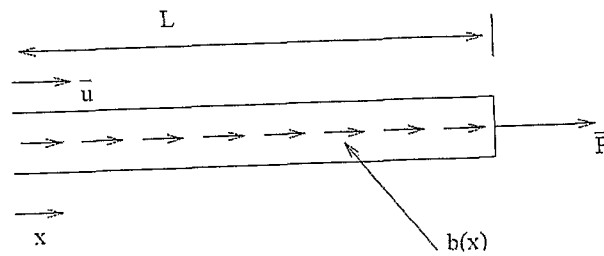
$$\frac{d\sigma_x}{dx} dx A + b(x) dx = 0 \quad (1-2)$$

با در نظر گرفتن قانون هوک و شرایط کرنش جزئی مساله مورد نظر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} AE \frac{d^2 u}{dx^2} + b(x) = 0 \\ u(0) = \bar{u} \quad (\text{الف}) \\ (AE \frac{du}{dx})|_{x=L} = \bar{F} \quad (\text{ب}) \end{cases} \quad (2-2)$$

در این معادلات u جابجایی در هر نقطه از میله مورد نظر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود این مساله به صورت یک معادله دیفرانسیل با تعدادی شرایط مرزی مطرح شده است. شرط مرزی (الف) که مربوط به جابجایی است اصطلاحاً شرط مرزی ضروری^۱ نامیده می‌شود و شرط مرزی (ب) که مربوط به شرایط نیرویی است اصطلاحاً شرط مرزی طبیعی^۲ نامیده می‌شود.

^۱ Essential Boundary Condition
^۲ Natural Boundary Condition



شکل (۱-۲) میله ارتجاعی تحت تاثیر نیروی \bar{F}

مشابه مثال ذکر شده هر مساله مهندسی را می توان به صورت یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی بر حسب متغیرهای مورد نیاز تعریف کرد. هدف روشهای عددی حل تقریبی معادله دیفرانسیل تولید شده با توجه به ارضاء شرایط مرزی می باشد.

۲-۲- فرم قوی^۱ و فرم ضعیف^۲ معادلات

معادلات دیفرانسیلی که برای بیان مساله بدست می آیند (نظیر معادله ۱-۲)، فرمهای قوی از سیستم معادلات می باشند. حالت ایده آل آن است که حل دقیق برای چنین معادلاتی را بدست آوریم اما این امر برای مسائل عملی مهندسی با طبیعت پیچیده دشوار و بعضاً غیر ممکن است. لذا لازم است از روشهای عددی برای حل معادله دیفرانسیل بهره برد. برخی از روشهای عددی نظیر روش تفاضل محدود مستقیماً از فرم قوی معادلات استفاده می کنند. هرچند که اینگونه روشها نیز امروزه در حال تکامل می باشند اما عمده مشکل در حل عددی فرمهای قوی معادلات پایداری روشها در حالت کلی می باشد زیرا در فرمولبندی فرمهای قوی فرض بر آن است که توابع مجهول تقریبی (به عنوان مثال تقریب برای u در مثال بخش ۱-۲) باید تا درجه کافی سازگاری^۳ داشته باشند و تا درجه مورد نظر در معادله دیفرانسیل جزئی مشتق پذیر باشند. بر این اساس دسته وسیعی از روشهای عددی از فرم ضعیف معادلات استفاده می کنند که در آنها سازگاری کمتری مورد نیاز است. فرم ضعیف راههای مختلفی را برای فرمولبندی حل تقریبی سیستمهای پیچیده فراهم می آورد. فرمولبندی براساس فرمهای ضعیف معمولاً می تواند مجموعه ای از سیستمهای معادلاتی مجزای پایدار را ایجاد کند که به جوابهای بسیار دقیق منجر می شوند. برای تشکیل این سیستمهای معادلاتی دو دسته روش کلی مورد

^۱ Strong Form

^۲ Weak Form

^۳ Consistency

استفاده قرار می‌گیرند که این روشها شامل روشهای انرژی و روشهای باقیمانده وزن دار شده می‌باشند.

۲-۲-۱- روشهای انرژی

در این روشها برای تشکیل سیستم معادلات نیازی به استفاده از فرم قوی معادلات حاکمه نمی‌باشد. از جمله این روشها می‌توان به استفاده از اصل حداقل انرژی پتانسیل کل^۱ و یا استفاده از اصل هامیلتون^۲ اشاره کرد.

۲-۲-۱-۱- اصل حداقل انرژی پتانسیل

بر طبق این اصل در یک سیستم سازه‌ای که در تعادل قرار دارد انرژی پتانسیل کل سیستم برای تغییرات در جابجاییهای مجاز^۳، حالت ایستا^۴ دارد. با استفاده از این اصل روند تشکیل سیستم معادلات را می‌توان به صورت زیر بیان داشت:

(الف) تخمین متغیرهای میدانی^۵ (به عنوان مثال جابجایی) بر اساس مقادیر آن در گره‌ها.

(ب) بیان انرژی پتانسیل کل بر حسب مقادیر گره‌ای^۶.

برای جامدات در حالت ارتجاعی می‌توان انرژی پتانسیل کل را به صورت زیر بیان داشت:

$$\Pi = \Pi_s - W_f \quad (۳-۲)$$

که Π_s انرژی کرنشی سیستم و W_f کار انجام شده توسط نیروهای خارجی می‌باشد.

(ج) استفاده از شرایط ایستایی برای تشکیل سیستم معادلات مجزا.

با فرض بردار جابجایی گره‌ای d این گام را می‌توان به صورت زیر بیان داشت:

^۱ Total Potential Energy

^۲ Hamilton

^۳ Admissible

^۴ Stationary

^۵ Field Variable

^۶ Nodal Value