بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

بررسی اثر شرایط مرزی بر نوار برشی با استفاده از روش المان منفصل

نگارش:

سیدمحمدحسین حسینی

استاد راهنما:

دکتر سیدمحمد بینش

استاد مشاور:

دکتر علی لشکری

شهریور ۹۳

بسمه تعالی

بررسی اثر شرایط مرزی بر نوار برشی با استفاده از روش المان منفصل

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

سیدمحمدحسین حسینی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: .....

دکتر سیدمحمد بینش استادیار در رشته مهندسی عمران (استاد راهنما)

دکتر علی لشکری استادیار در رشته مهندسی عمران (استاد مشاور)

دکتر حسین رهنما استادیار در رشته مهندسی عمران (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب سیدمحمدحسین حسینی دانشجوی رشته مهندسی عمران مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۹۱۱۵۴۰۱۱ تأیید می نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف ، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:
سیدمحمدحسین حسینی
تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

دکتر سیدمحمد بینش

تاریخ:

امضا:

تقدیم به پدرم،

به آن بزرگواری که دستان خسته‌اش رمزی شد بر موفقیت من،

تبریک می‌گویم و افتخار می‌کنم به چنین رمزی.

تقدیم به مادرم،

آن والامقامی که رسیدن به پله کنونی ارمغانی ست حاصل

فداکاری‌های دیروزش، هزاران آفرین بر این ارمغان باد.

تشکر و قدردانی

اکنون که با لطف و عنایت پروردگار پایان نامه خویش را به اتمام رسانده ام، لازم می دانم تا از زحمات عزیزانی که در این مدت راهنمای بنده بودند تشکر و قدردانی به عمل آورم.

از جناب آقای دکتر سید محمد بنش، استاد راهنمای گرامیم که در طول این تحقیق راهنمای من بودند کمال تشکر و سپاس را دارم.

همچنین از جناب آقای دکتر علی لشکری که مشاوره این پایان نامه را بر عهده داشتند سپاسگزارم.

همچنین بر خود لازم میدانم از سایر اساتید گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شیراز تشکر نمایم. و در نهایت از همراهی مهندس احسان اسلامی فیض آبادی تشکر مینمایم.

چکیده

بررسی اثر شرایط مرزی بر نوار برشی با استفاده از روش المان منفصل

نگارش :

سیدمحمدحسین حسینی

در این پایان‌نامه با بهره‌گیری از روش اجزا منفصل به بررسی اثر شرایط مرزی در آزمایش دو محوری بر نوار برشی در خاک‌های دانه‌ای پرداخته شده است. یکی از موارد مبهم در زمینه شبیه‌سازی این آزمایش، چگونگی تاثیر شرایط مرزی بر رفتار نمونه در مقیاس ماکرو در درصدهای کرنش بالا و روند تشکیل نوار برشی می‌باشد. در این راستا، چند نوع از شرایط مرزی مختلف شامل شرایط مرزی صلب، شرایط مرزی انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیلهای صورت گرفته برای هر یک از حالتهای مذکور نشان می‌دهد که استفاده از مرز صلب به عنوان مرزهای جانبی امکان تشکیل نوار برشی را ندارد. در مقابل، مرزهای انعطاف‌پذیر به علت آزادی عملی که برای ذرات تحت بار فراهم می‌کنند، قابلیت آشکار نمودن نوار برشی را دارا می‌باشند که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و با توجه به ماهیت آزمایش دو محوری، نمونه دومحوری همواره دچار پدیده نوار برشی می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: شرایط مرزی در آزمایش دومحوری، نوار برشی، روش المان منفصل

فهرست مطالب

۱.فصل اول:مبانی روش المان منفصل **۱**

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مبانی روش المان منفصل ۲

۱-۲-۱- چرخه محاسبات در روش المان منفصل ۳

۱-۲-۲- قیود بین ذرات در روش المان منفصل ۳

۱-۲-۳- قانون نیرو-جابجایی ۵

۱-۲-۴- قانون دوم نیوتن ۵

۱-۳- معرفی نرم افزار PFC 2D ۷

۱-۴-۱- دایره های اندازه گیری ۸

۲.فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده **۱۱**

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲-آزمایش دومحوری ۱۲

۲-۲- شبیه سازی آزمایش دومحوری در محیط المان منفصل ۱۴

۲-۳- مشاهده نوار برشی در آزمایشگاه: ۲۳

۲-۴- مروری بر مطالعات نوار برشی ۲۴

۲-۴-۱- اثر دانه بندی، تراکم و شکل دانه ها بر نحوه شکل گیری نوار برشی ۲۵

۲-۴-۲- ضخامت نوار برشی ۲۶

۲-۴-۳- جهت گیری نوار برشی ۲۷

۳.فصل سوم: مدلسازی **۲۹**

۳-۱- مقدمه ۳۰

۳-۲- آزمایش دو محوری ۳۰

۳-۳- ابعاد نمونه، نسبت تخلخل و تنش همه جانبه ۳۱

۳-۴- انتخاب تعداد و قطر دانه ها ۳۲

۳-۵- روش توزیع تصادفی دانه ها ۳۳

۳-۶- نحوه ساخت نمونه همگن ۳۴

۳-۷- میکرو پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی ۳۶

۳-۸- شرایط مرزی در آزمایش دو محوری ۳۷

۳-۸-۱- مرز صلب ۳۷

۳-۸-۲- مرز انعطاف پذیر رشته ای ۳۹

۳-۸-۳- مرز انعطاف پذیر بدون غشا لاستیکی ۴۴

۳-۹- نحوه اعمال نیروی وزن: ۴۶

۳-۱۰- اعمال تنش همه جانبه ۴۶
۳-۱۱- اعمال برش ۴۷
۳-۱۲- فلوچارت آزمایش دو محوره ۴۷
۳-۱۳- رفتارهای محلی ۴۸

۴.فصل چهارم: نتایج شبیه سازی و تفسیر آنها **۵۰**
4-1- مقدمه ۵۱
۴-۲- رفتار تنش-کرنشی نمونه ها ۵۱
4-3- نمونه های با شرایط انتهایی ثابت در جهت افقی ۶۰
۴-۴- مرز انعطاف پذیر رشته ای بسته ۶۲
۴-۵- رفتار قسمت مرکزی نمونه ۶۷
۴-۶- رفتار نمونه ها در مقیاس میکرو ۷۶
۴-۷- آزمون های با شرایط انتهایی بسته ۸۷
۴-۸- راستا و زاویه نوار برشی ۹۵
۴-۹- آسیب های مرز انعطاف پذیر رشته ای ۹۷

۵.فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات **۱۰۰**
5-1- نتیجه گیری ۱۰۱
۵-۲- پیشنهادات ۱۰۳

مراجع **۱۰۴**

پیوست‌ها **۱۰۷**

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ چرخه محاسبات در روش المان منفصل ۳
شکل ۱-۲ قید نقطه ای بین دو ذرهA, B (Itasca,2008) ۴
شکل ۱-۳ قید موازی بین دو ذرهA, B (Itasca,2008) ۴
شکل ۲-۱ رفتار ماسه تویورا در آزمایش دومحوری(Iwashita and Oda, 2000) ۱۴
شکل ۲-۲ نمونه برش ساده با مرز دانهای(Cundall, 1989) ۱۵
شکل ۲-۳a -نسبت تنش برشی به تنش میانگین b - تغییرات حجم در نمونه برش ساده با مرزصلب (Cundall, 1989) ۱۵
شکل ۲-۴a -نسبت تنش برشی به تنش میانگین b - تغییرات حجم درنمونه برش ساده با مرز دانه ای(Cundall, 1989) ۱۶
شکل ۲-۵ مرز اتخاذ شده توسط باردت و پرابت ۱۷
شکل ۲-۶ شکل ۲-۶: رفتار مقاومتی نمونه های دومحوری در مطالعات باردت وپرابت ۱۸
شکل ۲-۷ رفتار تغییرحجمی نمونه های دومحوری در مطالعات باردت وپرابت ۱۸
شکل ۲-۸ رفتار مقاومتی و نسبت تخلخل نمونه های با مرز صلب و انعطاف پذیر(Kuhn, 1995) ۱۹
شکل ۲-۹ نسبت تنش و کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری(Iwashita and Oda, 1998) ۲۰
شکل ۲-۱۰ مرز ارائه شده توسط ونگ و تونون ۲۱
شکل ۲-۱۱ رفتار مقاومتی مرز ارائه شده توسط ونگ و تونون ۲۲
شکل ۲-۱۲ اثر تنش همه جانبه بر محل وقوع نوار برشی در نمونه ماسه متراکم ۲۴
شکل ۳-۱ دستگاه آزمایش دومحوری ۳۱
شکل ۳-۲ منحنی توزیع قطر دانه ها ۳۲
شکل ۳-۳ تولید نمونه در چند لایه توسط روش تراکمی ۳۵
شکل ۳-۴ پارامترهای مورد نیاز بین تماسها ۳۶
شکل ۳-۵ نمونه دومحوری با مرزهای صلب ۳۹
شکل ۳-۶ مرزجانبی انعطاف پذیر غشای لاستیکی ۴۰
شکل ۳-۷ اعمال نیرو نرمال بر مرز غشای لاستیکی ۴۱
شکل ۳-۸ مرز جانبی انعطاف پذیر با ۲ دانه بهم چسبیده شده ۴۲
شکل ۳-۹ مرز انعطاف پذیر رشته ای بسته ۴۳
شکل ۳-۱۰ نمونه سه محوری در آزمایشگاه ۴۳

شکل ۳-۱۱ روند تشکیل مرز بدون غشای لاستیکی الف) انتخاب دانه های مستعد ب) سنجش فاصله دانه ها نسبت به خط هادی ج) انتخاب دانه های مرزی ۴۴
شکل ۳-۱۲ فلوچارت آزمایش دومحوری ۴۸
شکل ۴-۱ افزایش تعداد تماسهای دانه های مرزی با کاهش قطر آنها ۵۲
شکل ۴-۲ تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری برای بررسی اثر اندازه دانه های مرزی..... ۵۳
شکل ۴-۳ کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری برای بررسی اثر اندازه دانه های مرزی..... ۵۴
شکل ۴-۴ زاویه اصطکاک داخلی در مقابل کرنش محوری برای بررسی اثر اندازه دانه های مرزی ۵۴
شکل ۴-۵ تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری الف- مقایسه مرز صلب، غشای لاستیکی با نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با نیرو در راستای افقی و انعطاف پذیر بدون غشا ب- مرز غشای لاستیکی با دانه های به هم چسبیده شده ۵۷
شکل ۴-۶ کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری الف- مقایسه مرز صلب، غشای لاستیکی با نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با نیرو در راستای افقی و انعطاف پذیر بدون غشا ب- مرز غشای لاستیکی با دانه های به هم چسبیده شده ۵۸
شکل ۴-۷ زاویه اصطکاک داخلی در مقابل کرنش محوری الف- نمونه های با مرز صلب، غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با اعمال نیرو در راستای افقی ب- نمونه های با مرز غشای لاستیکی با دانه های بهم چسبیده شده ۵۹
شکل ۴-۸ تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری با شرایط انتهایی مرز جانبی بسته در جهت افقی الف- مرز غشای لاستیکی با قطر دانه های مرزی ۰/۵ ، ۲، ۱۰ و ۳۰ میلیمتر ب- مرز غشای لاستیکی با دانه های بهم چسبیده شده ۲ ، ۵ و ۱۰ دانه ۶۱
شکل ۴-۹ کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری با شرایط انتهایی مرز جانبی بسته در جهت افقی الف- مرز غشای لاستیکی با قطر دانه های مرزی ۰/۵ ، ۲، ۱۰ و ۳۰ میلیمتر ب- مرز غشای لاستیکی با دانه های بهم چسبیده شده ۲ ، ۵ و ۱۰ دانه ۶۲
شکل ۴-۱۰ مقایسه مرز انعطاف پذیر رشته ای با مرز انعطاف پذیر رشته ای با انتهایی ثابت و آزاد در جهت افقی الف- تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری ب- کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری ج- سینوس زاویه اصطکاک در مقابل کرنش محوری ۶۴
شکل ۴-۱۱ زاویه اصطکاک بسیج شده در مقابل کرنش محوری(O'Sullivan et al., 2002) ۶۷
شکل ۴-۱۲ تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری بر مبنای دایره های اندازه گیری الف- نمونه با مرز جانبی صلب، غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با اعمال نیرو در راستای افقی و مرز بدون غشا ب- مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده ج- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف ۶۹

شکل ۴-۱۳ تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری بر مبنای دایره های اندازه گیری الف- مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده با انتهای بسته ب- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف با انتهای بسته ۷۰
شکل ۴-۱۴ کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری بر مبنای دایره های اندازه گیری الف- نمونه با مرز جانبی صلب، غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با اعمال نیرو در راستای افقی و مرز بدون غشا ب- مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده ج- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف ۷۱
شکل ۴-۱۵ کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری بر مبنای دایره های اندازه گیری الف – مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده با انتهای بسته ب- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف با انتهای بسته ۷۲
شکل ۴-۱۶ زاویه اصطکاک داخلی بر مبنای دایره های اندازه گیری در مقابل کرنش محوری الف- نمونه با مرز جانبی صلب، غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز، غشای لاستیکی با اعمال نیرو در راستای افقی و مرز بدون غشا ب- مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده ج- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف ۷۴
شکل ۴-۱۷ زاویه اصطکاک داخلی بر مبنای دایره های اندازه گیری الف - مرز غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده با انتهای بسته ب- مرز غشای لاستیکی با اندازه دانه های مختلف با انتهای بسته ۷۵
شکل ۴-۱۸ مقایسه مرز انعطاف پذیر رشته ای با مرز انعطاف پذیر رشته ای با انتهایی ثابت و آزاد در جهت افقی در قسمت مرکزی نمونه الف-تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری ب- کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری ۷۶
شکل ۴-۱۹ راستای حرکت ذرات در نمونه با مرزهای صلب ۷۸
شکل ۴-۲۰ نمونه با مرز صلب الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج- بردار جابجایی ذرات ۷۹
شکل ۴-۲۱ نمونه با مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال بر مرز الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۰
شکل ۴-۲۲ نمونه با مرز غشای لاستیکی و نیرو در راستای افقی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۱
شکل ۴-۲۳ نمونه با مرز انعطاف پذیر بدون غشا الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۲
شکل ۴-۲۴ مرز غشای لاستیکی با ۲ دانه بهم چسبیده شده با انتهای باز الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۳

شکل ۴-۲۵ مرز غشای لاستیکی با ۵ دانه بهم چسبیده شده و انتهای باز الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۴
شکل ۴-۲۶ مرز غشای لاستیکی با ۱۰ دانه بهم چسبیده شده و انتهای باز الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۵
شکل ۴-۲۷ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای باز و قطر ۲ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات..... ۸۶
شکل ۴-۲۸ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای باز و قطر ۲۰ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۷
شکل ۴-۲۹ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای بسته و قطر ۰/۵ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۸
شکل ۴-۳۰ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای بسته و قطر ۲ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۸۹
شکل ۴-۳۱ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای بسته و قطر ۱۰ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۰
شکل ۴-۳۲ مرز غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز و انتهای بسته و قطر ۳۰ میلیمتر ذرات مرزی الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۱
شکل ۴-۳۳ مرز غشای لاستیکی با ۲ دانه بهم چسبیده شده با انتهای بسته الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۲
شکل ۴-۳۴ مرز غشای لاستیکی با ۵ دانه بهم چسبیده شده با انتهای بسته الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۳
شکل ۴-۳۵ مرز غشای لاستیکی با ۱۰ دانه بهم چسبیده شده با انتهای بسته الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۴
شکل ۴-۳۶ مرز غشای لاستیکی بسته الف- شبکه تغییر شکل یافته ب- زنجیره های قوی نیرویی ج-بردار جابجایی ذرات ۹۵
شکل ۴-۳۷ آسیبهای مرز انعطاف پذیر غشای لاستیکی با اعمال نیرو نرمال بر مرز..... ۹۸
شکل ۴-۳۸ آسیبهای مرز انعطاف پذیر غشای لاستیکی با ذرات بهم چسبیده شده ۹۸
شکل ۴-۳۹ آسیبهای مرز انعطاف پذیر غشای لاستیکی با اعمال نیرو در راستای افقی ۹۹

شکل ۵-۱ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۲ دانه بهم چسبیده شده و انتهای جانبی بسته ۱۰۸
شکل ۵-۲ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۵ دانه بهم چسبیده شده و انتهای جانبی بسته ۱۰۸
شکل ۵-۳ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۱۰ دانه بهم چسبیده شده و انتهای جانبی بسته ۱۰۹
شکل ۵-۴ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۲ دانه بهم چسبیده و انتهای جانبی باز ۱۰۹
شکل ۵-۵ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۵ دانه بهم چسبیده و انتهای جانبی باز ۱۱۰
شکل ۵-۶ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز با ۱۰ دانه بهم چسبیده و انتهای جانبی باز ۱۱۰
شکل ۵-۷ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی بسته (قطر ذرات مرزی ۰/۵ میلیمتر) ۱۱۱
شکل ۵-۸ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی بسته (قطر ذرات مرزی ۲ میلیمتر) ۱۱۱
شکل ۵-۹ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی بسته (قطر ذرات مرزی۱۰ میلیمتر) ۱۱۲
شکل ۵-۱۰ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی بسته (قطر ذرات مرزی ۳۰ میلیمتر) ۱۱۲
شکل ۵-۱۱ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی باز (قطر ذرات مرزی۲ میلیمتر) ۱۱۳
شکل ۵-۱۲ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی باز (قطر ذرات مرزی۱۰ میلیمتر) ۱۱۳
شکل ۵-۱۳ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و نیروی نرمال برآن و انتهای جانبی باز (قطر ذرات مرزی۲۰ میلیمتر) ۱۱۴
شکل ۵-۱۴ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز صلب ۱۱۴
شکل ۵-۱۵ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز بدون غشای لاستیکی ۱۱۵
شکل ۵-۱۶ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی و اعمال نیرو در جهت افقی و انتهای جانبی باز (قطر ذرات مرزی۱۰ میلیمتر) ۱۱۵
شکل ۵-۱۷ کرنش جانبی در مقابل کرنش محوری در مرز غشای لاستیکی بسته (قطر ذرات مرزی۱۰ میلیمتر) ۱۱۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ تعداد دانه‌های در شعاع‌های مختلف ۳۳
جدول ۳-۲ میکرو پارامترهای درنظر گرفته شده برای مدل ساخته شده ۳۷
جدول ۳-۳ مشخصات ذرات غشای لاستیکی ۴۱
جدول ۳-۴ فهرست آزمایش‌های انجام گرفته در این پایان‌نامه ۴۵
جدول ۴-۱ مقایسه تمامی مرزهای ساخته شده ۶۵
جدول ۴-۲ راستا و ضخامت نوار برشی برای تمامی آزمایشات ۹۶

فهرست کلمات اختصاری

DEM	Discrete Element Method
MDEM	Modified Discrete Element Method
UCM	Under Compaction Method

فصل اول:مبانی روش المان منفصل

۱-۱- مقدمه

هدف از ارائه این فصل بیان روش عددی المان منفصل و روابط حاکم بر آن می‌باشد. در ابتدای فصل، مبانی روش المان منفصل و تاریخچه کوتاهی از آن آورده شده است. سپس به ارائه چرخه محاسباتی در روش المان منفصل پرداخته شده است. پس از آن مباحث هندسی و فیزیکی حاکم بر المان‌های مسئله شامل قیود بین ذرات، قانون نیرو-جابجایی، قانون دوم نیوتن آورده شده‌اند. در قسمت پایانی فصل، نرم‌افزار انتخاب شده برای انجام شبیه سازی‌ها و برخی روابط پرکاربرد شامل نحوه محاسبه تنش و نرخ کرنش معرفی شده است.

۱-۲-مبانی روش المان منفصل

روش المان منفصل اولین بار توسط کاندال (Cundall, 1971) برای تحلیل مسائل مکانیک سنگ ارائه شد و در سال ۱۹۷۹ توسط کاندال و استراک (Cundall and Strack, 1979) برای مسائل مکانیک خاک به کار گرفته شد. در روش المان منفصل، اندرکنش بین ذرات به صورت یک روند حل دینامیکی با در نظر گرفتن حالت تعادل برای ذرات بکار گرفته می شود و این روند تا زمانی که نیرو-های داخلی به تعادل برسند ادامه می‌یابد. جابجایی ها و نیروهای مجموعه ای که تحت تنش خارجی قرار گرفته است به وسیله دنبال کردن حرکت و جابجایی ذرات به دست می‌آیند. جابجایی‌های ذرات می‌توانند در نتیجه اعمال نیرو به ذرات (کنترل تنش) یا اعمال جابجایی به ذرات و یا دیواره‌ها (کنترل کرنش) به وجود آیند. رفتار دینامیکی با یک الگوریتم مرحله‌ای وابسته به زمان (time stepping)، که در هر گام زمانی سرعت و شتاب ذرات در آن ثابت است، به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. روش المان منفصل بر این ایده استوار است که هر گام زمانی آنقدر کوچک انتخاب شود که در طول آن گام، اغتشاش ایجاد شده بر روی هر ذره به ذرات مجاور آن منتقل نشود. در روش المان منفصل از روش‌های صریح (explicit) برای حل مسئله استفاده می شود. برتری روش‌های صریح (explicit) بر روش‌های ضمنی (implicit) در روش المان منفصل آن است که این روش‌ها می‌توانند اندرکنش غیر خطی شمار زیادی از ذرات را بدون نیاز به حجم زیادی از حافظه و یا نیاز به حجم بالایی از تکرار حل کنند.