



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

وزارت علوم تحقیقات و فناوری  
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

# تحلیل پایداری شیروانی‌های مسلح با مسلح‌کننده‌های سه‌بعدی ژئوسل با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی

نگارش:

ایمان مهدی‌پور

استاد مشاور:

دکتر محمود قضاوی

استاد راهنما:

دکتر رضا ضیائی‌مؤید

پایان‌نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی

اسفند ۱۳۹۰

بسمه تعالی

دانشگاه بین المللی امام خمینی



دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)  
معاونت آموزشی دانشگاه - مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهد نامه اصالت پایان نامه

اینجانب ایمان مهری پور دانشجوی رشته عمران گرایش خاک ریزی مقطع تحصیلی اسفند با بدین وسیله اصالت کلیه مطالب موجود در مباحث مطروحه در پایان نامه / تز تحصیلی خود، با عنوان کنترل با پیچش تیرهای جدا شده با مصالح بتن مسلح سبک وزن بتنی با استفاده از الیاف کربن در تائید کرده، اعلام می نمایم که تمامی محتوی آن حاصل مطالعه، پژوهش و تدوین خودم بوده و به هیچ وجه رونویسی از پایان نامه و یا هیچ اثر یا منبع دیگری، اعم از داخلی، خارجی و یا بین المللی، نبوده و تعهد می نمایم در صورت اثبات عدم اصالت آن و یا احراز عدم صحت مفاد و یا لوازم این تعهد نامه در هر مرحله از مراحل منتهی به فارغ التحصیلی و یا پس از آن و یا تحصیل در مقاطع دیگر و یا اشتغال و ... دانشگاه حق دارد ضمن رد پایان نامه نسبت به لغو و ابطال مدرک تحصیلی مربوطه اقدام نماید. مضافاً اینکه کلیه مسئولیت ها و پیامدهای قانونی و یا خسارت وارده از هر حیث متوجه اینجانب می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو ایمان مهری پور

امضاء و تاریخ

  
۱۳۹۱/۲/۴



دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)  
 معاونت آموزشی - مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۳۰

فرم تأییدیه هیأت داوران جلسه دفاع از پایان‌نامه/رساله

بدین وسیله گواهی میشود جلسه دفاعیه از پایان‌نامه کارشناسی ارشد / دکتری ...  
 دانشجوی رشته ... گرایش ...  
 در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۱۹ در دانشگاه برگزار گردید و این پایان‌نامه با نمره ... و درجه ... مورد تأیید هیئت داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتب‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر رضاییان مرید		امام (ره)	
۲	استاد مشاور	دکتر قضاوی		دانشگاه ...	
۳	داور خارج	دکتر قنبری	دانشیار	دانشگاه ...	
۴	داور داخل	دکتر سیدابراکن نماینی		امام (ره)	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن ستوده نیا			

به پدر عزیز،

مادر دلسوز،

برادر و خواهر مهربانم

و به امید یار و همراه همیشگی ام

به پاس تمام فداکاری‌ها، صبرها و تشویق‌ها

## چکیده

مسلح‌کننده ژئوسل نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای، به دلیل داشتن ارتفاع، مانند یک تیر عمل می‌کند که علاوه بر مقاومت کششی دارای مقاومت برشی و ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی نیز می‌باشد. در بسیاری از مدل‌های عددی برای مدل کردن لایه‌ی ژئوسل از مدل مرکب معادل آن با افزایش سختی و چسبندگی استفاده شده است. هدف از این پایان‌نامه، آنالیز پایداری شیروانی مسلح-شده به ژئوسل، با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد. در روش عددی از دو روش مدل مرکب معادل و نیز روش المان تیر توسط نرم‌افزار FLAC2D صورت گرفته است. در روش تحلیلی از روش تعادل حدی با استفاده از قطعات افقی برای آنالیز پایداری شیروانی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌ی مرکب معادل مانند یک لنز خاکی عمل کرده و نمی‌تواند از گسترش سطح لغزش بحرانی جلوگیری کند. از طرفی افزایش سختی لایه مرکب تأثیری در افزایش ضریب اطمینان ندارد و تنها عامل چسبندگی سبب افزایش جزئی ضریب اطمینان شیروانی می‌گردد. درحالی‌که استفاده از روش المان تیر به خوبی می‌تواند از توسعه‌ی خط لغزش بحرانی جلوگیری کرده و سبب توزیع مجدد بار در سطح و عمق بیشتری از خاک شود. همچنین خصوصیت خمشی ژئوسل سبب کاهش جابجایی لایه‌ی ژئوسل و در نتیجه کاهش جابجایی افقی شیروانی می‌گردد. از طرفی بیشترین مقدار جابجایی افقی شیروانی در ترازوی از شیروانی که در قسمت بالای لایه ژئوسل قرار

گرفته می‌باشد. درحالی‌که مقادیر جابجایی افقی و کرنش برای ارتفاع شیروانی در زیر لایه ژئوسل به مقدار زیادی کاهش یافته است.

همچنین روابط تحلیلی بدست آمده با توسعه روش تعادل حدی به کمک روش قطعات افقی نشان می‌دهد که در نظر گرفتن ممان خمشی و نیروی برشی مسلح‌کننده ژئوسل تاثیر قابل توجهی در ضریب اطمینان شیروانی داشته و با نتایج بدست آمده از روش عددی المان تیر تطابق مناسبی داشته، درحالی‌که با نتایج روش عددی مدل مرکب معادل اختلاف قابل توجهی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** ژئوسل، مدل مرکب معادل، المان تیر، ضریب اطمینان شیروانی، تعادل حدی،

سختی خمشی، سطح لغزش بحرانی.



## تشکر و قدردانی

خداوند مهربان را شاکرم که مرا نیرو بخشید تا نگارش پایان‌نامه‌ی پیش‌رو را به اتمام برسانم. بر خود لازم می‌دانم کمال تقدیر و تشکر خود را نثار کسانی کنم که در این مسیر پر فراز و نشیب لحظه‌ای از راهنمایی، پشتیبانی و تشویق من دریغ نکردند. از استادان بزرگوام، جناب آقای دکتر رضا ضیائی مؤید و جناب آقای دکتر محمود قضاوی که تمامی روزها و مراحل پیشرفت این پایان‌نامه که تحت نظارت ایشان مشغول به کار بودم، سرشار از آموختن توأمان علم و اخلاق بود، کمال تشکر را دارم.

از استادان ارجمند آقای دکتر نائینی، آقای دکتر جسمانی و آقای دکتر حسنلوراد که مرا در دوره کارشناسی‌ارشد یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

همچنین از استاد بزرگوام، آقای دکتر نیکلاس علی لیبر که الگویی بی‌نظیر از یک پژوهشگر و بزرگمنشی را در ذهن من حک نموده‌اند نهایت قدردانی را دارم.

از خانواده‌ی عزیزم که از کودکی، شور دانستن و لذت کشف و جستجو را در من بیدار کردند، استقامت در تلاش را به من آموختند و در تمامی این سال‌ها با فراهم کردن آرامش فکری و آسایش روحی، بسیاری از دشواری‌ها را بر من آسان نمودند، با تمام وجود قدردانم.

در پایان لازم می‌دانم از دوستانی که در تدوین این پایان‌نامه همکاری نمودند، خانم مهندس خانجانی و همچنین آقایان مهندس امینی و مهندس حسینی قدردانی کنم.

در آخر، بار دیگر از خداوند متعال به منظور هماهنگ و موزون کردن تمام صحنه‌های زندگی‌ام قدردانی می‌نمایم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱ مقدمه
۱-۱	۱- مقدمه
۲-۱	۲- بیان مسئله و ضرورت تحقیق
۳-۱	۳- هدف از انجام تحقیق
۴-۱	۴- قلمرو تحقیق
۵-۱	۵- ساختار تحقیق
۶	فصل ۲ بررسی ادبیات فنی
۶-۱	۱- مقدمه
۷-۲	۲- معرفی ژئوسنتتیک‌ها و بررسی مکانیزم رفتاری ژئوسل
۱۴-۲	۳- بررسی تحقیقات آزمایشگاهی روی مسلح کننده ژئوسل
۲۶-۲	۴- بررسی تحقیقات عددی و تحلیلی روی مسلح کننده ژئوسل
۴۱-۲	۵- بررسی تحقیقات تحلیلی روی شیروانی و دیوار مسلح شده
۴۶-۲	۶- بررسی ظرفیت باربری پی مستقر بر شیروانی مسلح شده
۵۱-۲	۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۵۲	فصل ۳ مدل سازی عددی
۵۳-۳	۱- مقدمه
۵۴-۳	۲- معرفی مدل مرکب معادل
۵۴	الف) مقاومت برشی معادل
۵۷	ب) سختی معادل
۵۹-۳	۳- معرفی نرم افزار FLAC
۶۲-۳	۴- معرفی مدل موهر-کولمب
۶۴-۳	۵- تعریف مدل، شرایط مرزی و المان بندی مدل

۶۷	۳-۶ تعریف المان تماسی میان مسلح کننده ژئوسل و خاک
۷۰	۳-۷ بارگذاری مدل
۷۰	الف) تحلیل پایداری شیروانی مسلح شده با ژئوسل
۷۱	ب) محاسبه ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر شیروانی مسلح شده با ژئوسل
۷۲	۳-۸ صحت سنجی مدل
۷۳	۳-۸-۱ خاکریز مسلح شده با لایه ژئوسل مستقر بر بستر خاکی نرم
۷۸	۳-۸-۲ پی نواری مستقر بر خاک ماسه ای مسلح شده با ژئوسل
۸۱	۳-۸-۳ پی نواری مستقر بر شیروانی ماسه ای مسلح شده با ژئوگرید
۸۳	۳-۹ جمع بندی و نتیجه گیری

## ۸۴ فصل ۴ بررسی نتایج بدست آمده

۸۴	۴-۱ مقدمه
۸۵	۴-۲ بخش اول: استفاده از مدل مرکب معادل در شیروانی مسلح شده با ژئوسل
۸۵	۴-۲-۱ فرضیات، مشخصات مصالح و پارامترهای متغیر
۸۷	۴-۲-۲ بررسی نتایج بخش اول
۹۱	الف) تاثیر عمق قرارگیری اولین لایه ژئوسل
۹۷	ب) تاثیر نسبت ارتفاع به قطر
۹۹	ج) تاثیر عمق مسلح کنندگی و تعداد لایه ژئوسل
۱۰۱	د) جمع بندی و نتیجه گیری
۱۰۳	۴-۳ بخش دوم: استفاده از روش تیر در شیروانی مسلح شده با ژئوسل
۱۰۳	۴-۳-۱ فرضیات، مشخصات مصالح و پارامترهای متغیر
۱۰۵	۴-۳-۲ بررسی نتایج بخش دوم
۱۰۵	الف) تاثیر عمق قرارگیری اولین لایه ژئوسل
۱۱۱	ب) تاثیر تعداد لایه ژئوسل
۱۱۴	ج) تاثیر طول، ضخامت و مدول الاستیسیته لایه ژئوسل
۱۱۹	د) تاثیر تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک
۱۲۱	ه) جمع بندی و نتیجه گیری
۱۲۳	۴-۴ بخش سوم: استفاده از روش تحلیلی برای شیروانی مسلح شده با ژئوسل

- ۱۲۳.....۴-۴-۱ فرضیات، روابط اصلی و مشخصات مصالح
- ۱۳۲.....۴-۴-۲ بررسی نتایج بخش سوم
- ۱۳۲..... الف) ارتباط میان نیروی برشی ژئوسل با عمق قرارگیری آن
- ۱۳۳..... ب) ارتباط میان نیروی کششی ژئوسل با طول آن
- ۱۳۴..... ج) ارتباط میان لنگر خمشی ژئوسل با طول آن
- ۱۳۵..... د) مقایسه ضریب اطمینان بدست آمده از روش عددی و تحلیلی
- ۱۴۰..... و) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
- ۱۴۱..... ۴-۵-۵ بخش چهارم: استفاده از روش تیر در محاسبه ظرفیت باربری
- ۱۴۱..... ۴-۵-۱ فرضیات، مشخصات مصالح و پارامترهای متغیر
- ۱۴۴..... ۴-۵-۲ بررسی نتایج بخش چهارم
- ۱۴۴..... الف) بررسی رفتار فشار- نشست
- ۱۴۹..... ب) تاثیر عمق اولین لایه ژئوسل در زیر پی
- ۱۵۰..... ج) تاثیر تعداد لایه ژئوسل
- ۱۵۱..... د) تاثیر فاصله پی از لبه شیروانی
- ۱۵۲..... و) تاثیر طول لایه ژئوسل
- ۱۵۴..... ی) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

## ۱۵۵ فصل ۵ جمع‌بندی و ارائه پیشنهادهایی برای ادامه کار

۱۶۲

مراجع

## فصل اول: مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

روش‌های مختلفی برای بهبود خواص مقاومتی خاک شامل زهکش‌های قائم، تثبیت به کمک مواد سیمانی، میخ‌کوبی و همچنین مسلح‌سازی به کمک مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک و غیره توسعه یافته‌اند. در این میان استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک به دلیل هزینه‌ی کم و سرعت اجرای بالا به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مسلح‌سازی خاک شناخته شده است.

میزان تأثیرپذیری و بازدهی مصالح ژئوسنتتیک تا حد زیادی به ساختار و نوع آن مسلح‌کننده بستگی دارد. برای مثال، زمانیکه از مصالح ژئوسنتتیک به عنوان لایه‌ی صفحه‌ای<sup>۱</sup> (دوبعدی) و یا به صورت الیاف گسسته<sup>۲</sup> و یا به صورت سه‌بعدی ژئوسل<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، به ازای مقدار یکسانی از مصالح نتایج مختلفی را در میزان بهبود مقاومتی ارائه می‌دهد. علت چنین تفاوتی را می‌توان ناشی از تفاوت موجود در مکانیزم شکست در خاک‌های مسلح شده به ژئوسنتتیک‌ها دانست. در میان انواع مصالح ژئوسنتتیک، مسلح‌کننده‌ی ژئوسل دارای ساختار سه‌بعدی بوده و می‌تواند خاک را درون خود محصور کند و از حرکت خاک به اطراف تا حد زیادی جلوگیری به عمل آورد. به این ترتیب، اتصال سلول‌های پر شده از خاک با یکدیگر، سبب می‌شود که لایه‌ی ژئوسل همچون یک دال گسترده عمل کرده و باعث انتقال و توزیع مجدد بار به قسمت‌های عمیق‌تری از خاک شود. همچنین لایه‌ی ژئوسل نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای، به دلیل داشتن ارتفاع، مانند یک تیر عمل می‌کند که دارای ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی نیز می‌باشد. نتایج کارهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ظرفیت

<sup>۱</sup> Planar

<sup>۲</sup> Discrete

<sup>۳</sup> Geocell

باربری پی قرار گرفته بر روی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل بسیار بیشتر از زمانی است که از مسلح‌کننده‌ی صفحه‌ای استفاده می‌شود.

همچنین استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی در شیروانی به منظور افزایش ضریب اطمینان شیروانی بسیار مفید بوده که در این راستا استفاده از مسلح‌کننده‌ی ژئوسل به منظور افزایش ضریب اطمینان شیروانی و همچنین کاهش جابجایی افقی شیروانی نیز می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بسیار محدود بوده و در اکثر تحقیقات صورت گرفته به بررسی تأثیر افزایش ظرفیت باربری پی بر روی زمین افقی مسلح شده با ژئوسل پرداخته شده است.

از طرف دیگر یکی از مسائل ویژه‌ای که گاهی با آن برخورد می‌شود، قرار گرفتن پی در مجاورت یا روی شیروانی‌های خاکی است. بررسی ظرفیت باربری پی قرار گرفته در مجاور شیروانی از جمله مسائل مهم ژئوتکنیک است که از دیر باز مورد توجه محققان مختلف بوده است. در زمینه‌ی بررسی رفتار پی‌های سطحی در مجاورت شیروانی مسلح نشده و یا مسلح شده با مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. به نظر می‌رسد که استفاده از مسلح‌کننده‌ی ژئوسل علاوه بر افزایش پایداری شیروانی می‌تواند سبب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی بر روی شیروانی مسلح شده با ژئوسل گردد. تحقیقات در این زمینه نیز بسیار محدود بوده و در نتیجه بررسی عملکرد شیروانی مسلح شده با لایه‌ی ژئوسل نیز می‌تواند بسیار مفید باشد.

## ۲-۱ بیان مسئله و ضرورت تحقیق

مدل عددی خاک‌های مسلح شده با ژئوسل، با توجه به ساختار سه‌بعدی لایه‌ی ژئوسل و همچنین خاصیت محصورکنندگی خاک داخل سلول‌های ژئوسل به یک مدل سه‌بعدی نیاز دارد. پیچیدگی شکل هندسی مدل ژئوسل در مش‌بندی و همچنین المان‌های تماسی میان خاک و سلول‌های ژئوسل سبب می‌گردد تا ساخت مدل سه‌بعدی لایه‌ی ژئوسل بسیار زمان‌بر شود. از این‌رو، استفاده از مدل‌های

دوبعدی معادل که ماهیت سه‌بعدی لایه‌ی ژئوسل را ایجاد کند، می‌تواند بسیار مفید بوده و سبب صرفه‌جویی در زمان گردد. نتایج کارهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد، استفاده از لایه‌ی ژئوسل سبب افزایش چسبندگی و سختی خاک محصور شده توسط لایه‌ی ژئوسل می‌گردد به طوری که زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن ثابت می‌ماند. این نتایج سبب شد تا محققان از مدل مرکب معادل<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی رفتار مسلح‌کننده‌ی ژئوسل استفاده کنند. به این ترتیب با استفاده از مدل مرکب معادل، لایه‌ی ژئوسل توسط یک لایه خاک که سختی (مدول الاستیسیته) و چسبندگی آن افزایش یافته است، مدل می‌گردد. تحقیقات زیادی برای بیان اینکه مدل مرکب معادل مدل مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار مسلح‌کننده‌ی لایه ژئوسل بوده، صورت گرفته است. اما در تمامی این مطالعات، از مدل مرکب معادل برای پیش‌بینی ظرفیت باربری و نشست پی‌های مسلح به ژئوسل استفاده شده است. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که در زمینه‌ی تأثیر استفاده از لایه‌ی ژئوسل در شیروانی تحقیقات زیادی صورت نگرفته و تاکنون از مدل مرکب معادل برای بدست آوردن ضریب اطمینان شیروانی و جابجایی افقی شیروانی استفاده نشده است. بنابراین با توجه به اینکه ساختار و عملکرد مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در مسلح کردن شیروانی می‌تواند دارای بازدهی بیشتری نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای باشد، تحقیق در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

### ۱-۳ هدف از انجام تحقیق

هدف از این پایان‌نامه بررسی عملکرد و بازدهی مسلح‌کننده‌ی ژئوسل در پایداری شیروانی مسلح‌شده با لایه‌ی ژئوسل از طریق روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد. در این تحقیق ابتدا از مدل مرکب معادل برای شبیه‌سازی رفتار ژئوسل در شیروانی مسلح شده با ژئوسل استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه لایه‌ی ژئوسل نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای، به دلیل داشتن ارتفاع، مانند یک تیر

<sup>1</sup> Equivalent Composite Model

عمل کرده و دارای ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی نیز می‌باشد، از مدل المان تیر نیز برای شبیه‌سازی رفتار ژئوسل استفاده گردیده است. علاوه بر استفاده از روش‌های عددی، در این پایان‌نامه سعی شده است تا از روش‌های تحلیلی نظیر روش تعادل حدی برای محاسبه‌ی ضریب اطمینان مسلح شده با لایه‌ی ژئوسل نیز استفاده شود. در این قسمت می‌توان با توسعه‌ی روابط تعادل حدی و در نظر گرفتن ممان خمشی برای لایه‌ی ژئوسل، ضریب اطمینان شیروانی را محاسبه کرد. در این صورت می‌توان مقادیر بدست آمده از روش‌های عددی نظیر استفاده از مدل مرکب معادل و المان تیر را با نتایج بدست آمده از روش تحلیلی تعادل حدی مقایسه کرد. همچنین استفاده از مدل تیر برای محاسبه ظرفیت باربری پی نواری بر روی شیروانی مسلح شده با ژئوسل نیز در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته تا صحت رفتاری روش المان تیر در زمانیکه بارگذاری پی نیز وجود دارد، مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۴-۱ قلمرو تحقیق

در این پایان‌نامه، بارگذاری به صورت استاتیکی در نظر گرفته شده است. همچنین در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته اثر آنالیز به صورت لایه لایه و متراکم کردن خاک در نظر گرفته نشده است. در این پایان‌نامه اثر وجود آب و شرایط اشباع شدگی خاک نیز در نظر گرفته نشده و تمامی آنالیزها برای خاک خشک صورت گرفته است.

## ۵-۱ ساختار تحقیق

این پایان‌نامه شامل پنج فصل می‌باشد. پس از مقدمه که در فصل اول بیان گردید، در فصل دوم به بررسی ادبیات فنی پرداخته شده است. در این فصل تحقیقات صورت گرفته بر روی مسلح‌کننده‌های



ژئوسل به صورت مجزا در سه بخش آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی صورت گرفته است. همچنین تحقیقات تحلیلی صورت گرفته برای محاسبه ضریب اطمینان شیروانی نیز در ادامه این فصل مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتهای فصل نیز تأثیر استفاده از مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای در ظرفیت باربری پی مستقر بر روی شیروانی بیان گردیده است.

در فصل سوم نحوه مدل‌سازی دوبعدی لایه‌ی ژئوسل، به ترتیب به کمک مدل مرکب معادل و نیز المان تیر در شیروانی، توسط نرم‌افزار تفاضل محدود<sup>۱</sup> FLAC2D بیان گردیده و مراحل مختلف این مدل‌سازی به تفصیل اشاره گردیده است. در انتهای این فصل جهت بررسی کارایی و عملکرد مدل‌سازی انجام شده، از نتایج سه آزمایش جهت صحت سنجی مدل استفاده گردیده است.

در فصل چهارم نتایج بدست آمده از روش‌های عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرند. این فصل شامل چهار بخش می‌باشد. در بخش اول نتایج بدست آمده از نرم‌افزار FLAC2D برای مدل مرکب معادل لایه‌ی ژئوسل در شیروانی مسلح شده با ژئوسل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم نتایج بدست آمده از نرم‌افزار FLAC2D برای المان تیر که برای شبیه‌سازی رفتار ژئوسل در شیروانی بکاررفته، بررسی می‌شود و با نتایج بدست آمده در بخش اول مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در بخش سوم، نتایج بدست آمده از روش تحلیلی تعادل حدی برای محاسبه ضریب اطمینان شیروانی مسلح شده با لایه‌ی ژئوسل مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی مقایسه گردیده است. در نهایت در بخش چهارم، نتایج بدست آمده از ارزیابی استفاده از روش عددی مدل تیر برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر شیروانی مسلح شده با ژئوسل ارائه شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری‌های نهایی از این پایان‌نامه ارائه گردیده و در قسمت آخر نیز پیشنهادهایی در خصوص امکان ادامه این تحقیق مطرح شده است.

<sup>۱</sup> Fast Lagrangian Analysis of Continua

## فصل دوم: بررسی ادبیات فنی

### ۱-۲ مقدمه

تحلیل پایداری شیروانی یکی از مهمترین مسائل مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک است، از این رو حجم زیادی از مطالب در ادبیات فنی به این موضوع اختصاص داده شده است. مشکل کمبود زمین در مناطق شهری ضرورت استفاده از زمین‌هایی با خاک‌های سست‌تر را مطرح ساخته است. در بسیاری موارد به کمک روش‌های بهبود خاک می‌توان از این زمین‌ها برای پروژه‌های موردنظر استفاده کرد. تعداد روش‌های مورد استفاده و یا گزارش شده بسیار زیاد بوده و در یک محل خاص می‌توان برای دستیابی به نتیجه‌ی مورد نظر از ترکیب چند روش استفاده نمود. روش‌های مختلفی برای بهبود خواص مقاومتی خاک شامل زهکش‌های قائم، تثبیت به کمک مواد سیمانی، میخ‌کوبی و همچنین مسلح‌سازی به کمک مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی و غیره توسعه یافته‌اند. در این میان استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی به دلیل هزینه‌ی کم و سرعت اجرای بالا، به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مسلح‌سازی خاک شناخته شده است. در میان انواع مصالح ژئوسنتتیکی، مسلح‌کننده‌ی ژئوسل دارای ساختار سه‌بعدی بوده و می‌تواند خاک را درون خود محصور کند و از حرکت خاک به طرف تا حد زیادی جلوگیری به عمل آورد. در نتیجه مسلح‌کننده‌ی ژئوسل بازدهی بیشتری نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای دارد. در این فصل ابتدا به بررسی مکانیزم و عملکرد مسلح‌کننده‌های ژئوسل پرداخته شده و کارهای آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی صورت گرفته در این راستا بررسی می‌گردد. سپس به بررسی تحلیلی پایداری شیروانی و دیوارهای حائل در حالت مسلح‌شده با مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای به کمک روش قطعات افقی پرداخته می‌شود. در انتها نیز تعدادی از مطالعاتی که توسط

محققان مختلف بر روی اثر شیب بر ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیروانی مسلح‌شده صورت گرفته، ارائه می‌شود.

## ۲-۲ معرفی ژئوسنتتیک‌ها و بررسی مکانیزم رفتاری ژئوسل

ژئوسنتتیک‌ها در واقع نوعی محصولات مصنوعی هستند که از ترکیبات پلیمری ساخته شده و در خاکریزها و دیگر فعالیت‌های عمرانی از آن‌ها استفاده می‌شود. این مواد اغلب از پلی‌اتیلن و پلی-پروپیلن ساخته می‌شوند و با نام‌های تجاری گوناگون به بازار عرضه می‌شوند. میزان تأثیرپذیری و بازدهی مصالح ژئوسنتتیک تا حد زیادی به ساختار و نوع آن مسلح‌کننده بستگی دارد. برای مثال، زمانیکه از مصالح ژئوسنتتیک به عنوان لایه‌ی صفحه‌ای (دوبعدی) و یا به صورت الیاف گسسته و یا به صورت سه‌بعدی ژئوسل استفاده می‌شود، به ازای مقدار یکسانی از مصالح، نتایج مختلفی را در میزان بهبود مقاومتی ارائه می‌دهد. علت چنین تفاوتی را می‌توان ناشی از تفاوت موجود در مکانیزم شکست در خاک‌های مسلح‌شده به ژئوسنتتیک‌ها دانست. بر اساس نوع کاربرد، ژئوسنتتیک‌ها به گروه‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است:

- ژئوتکستایل‌ها

- ژئوگریدها

- ژئونت‌ها

- ژئوممبرین‌ها

- ژئوپایپ‌ها

- ژئوکامپوزیت‌ها

- ژئوسل‌ها



شکل ۱-۲- انواع مصالح ژئوسنتتیک

در این میان برای بهبود خواص مقاومتی و افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست، استفاده از ژئوگرید و ژئوسل در میان دیگر مصالح ژئوسنتتیکی رواج بیشتری یافته است که در ادامه به بررسی مکانیزم آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ژئوگرید

ژئوگریدها به عنوان یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها، محصولاتی پلیمری هستند که معمولاً به شکل شبکه‌های منظم در یک یا دو جهت ساخته می‌شوند (شکل ۲-۲). این شبکه‌ها، به خصوص حفره‌های میان آن‌ها موجب می‌شوند که ذرات خاک و یا مصالح سنگی به خوبی با آن‌ها درگیر شده و مجموعه‌ی