

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پایان نامه کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی عمران - ژئوتکنیک

بررسی خواص ماسه مسلح شده با ژئوسل تحت آزمایش سه محوری

سیکلی بزرگ مقیاس

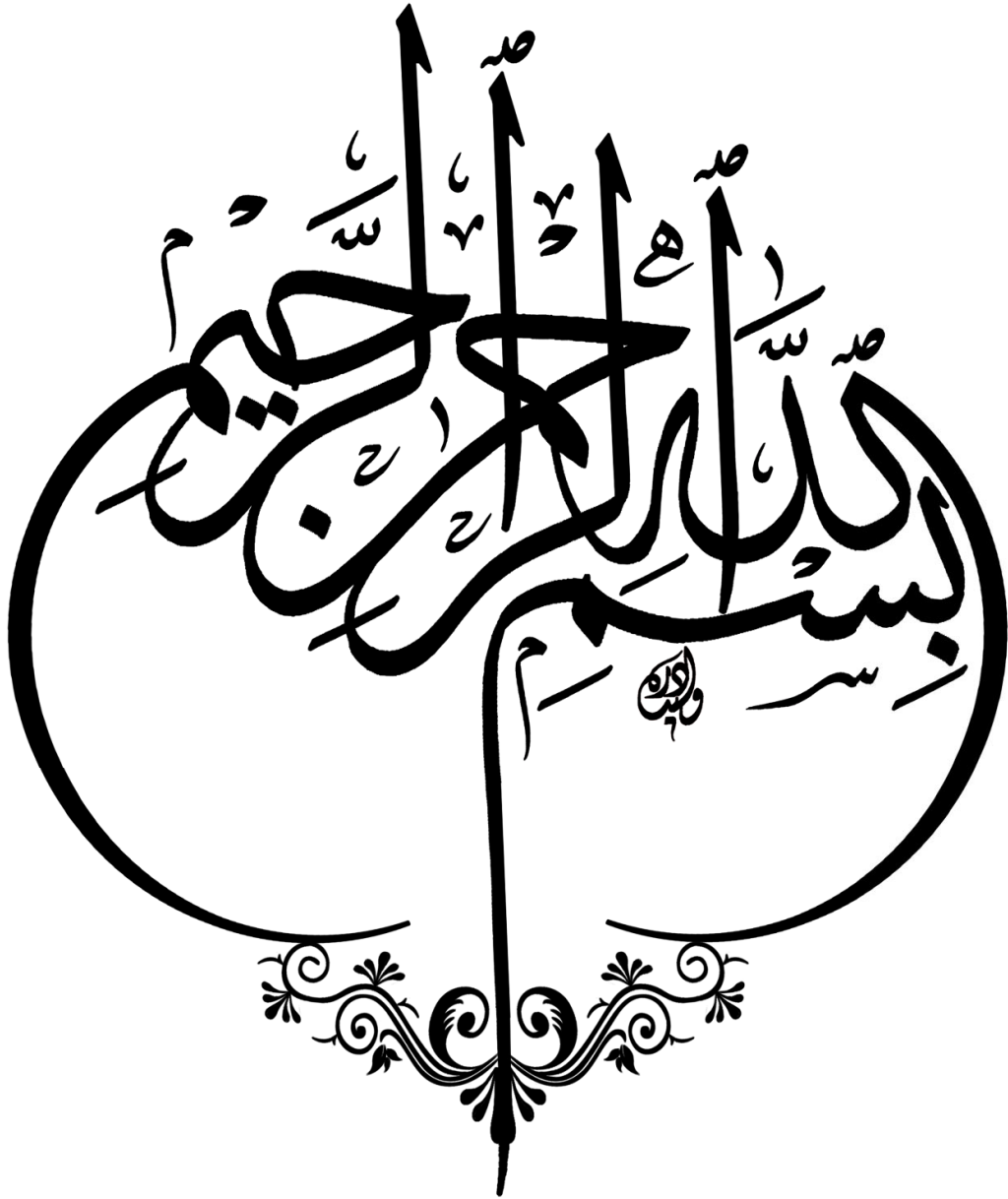
استاد راهنما:

جناب دکتر حسن قاسم زاده

نگارش:

محمد جعفرزاده

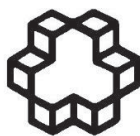
بهمن ۱۴۰۰



این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و اتقان تقدیم می نمایم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونه

زیستن را به من آموخته اند.



تأسیس ۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأیید هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان بررسی خواص ماسه مسلح شده با ژئوسل تحت آزمایش سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس توسط آقای محمد جعفرزاده صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی عمران گرایش عمران - ژئوتکنیک مورد تأیید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما آقای دکتر قاسم زاده امضاء

۲- ممتحن خارجی آقای دکتر رحمانی امضاء

۳- ممتحن داخلی آقای دکتر مقدس تفرشی امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آقای دکتر مقدس تفرشی امضاء

دانشکده عمران

تاریخ:

اظہارنامہ دانشجو

اینجانب محمد جعفرزادہ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان بررسی خواص خاک مسلح شده با ژئوسل تحت آزمایش سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زادہ، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید است و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است، به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری

به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده

مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و

بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نیست.

تشکر و قدردانی

پس از سپاس و تشکر خالصانه از خداوند متعال که همیشه یاری‌رسان اینجانب در تمام مراحل زندگی بوده است بر خود لازم می‌دانم که صمیمانه و خاضعانه قدردانی نمایم از:

استاد ارجمند جناب دکتر قاسم‌زاده که همواره مشوق و راهنمای بنده در به انجام رساندن این دورهٔ تحصیل و پایان‌نامه بودند.

خانواده عزیزم که با مشکلات موجود همواره پشتیبان من بودند و لحظه‌ای از حمایت خود دریغ نکردند.

آقایان بهادری، کاغذ کنانی و احمدی که بدون هیچ چشمداشت مرا در این مقطع تحصیلی یاری نمودند.

در پایان از همه دوستان عزیزم که همیشه مشوق بنده بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

در این پژوهش ابتدا تجهیز و راه اندازی دستگاه سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، به منظور بررسی رفتار خاک ماسه ای مسلح شده با ژئوسل صورت پذیرفته است، آزمایش ها بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بر روی دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس انجام گرفته است. صفحه بارگذاری ۳۰۰ میلیمتر و نمونه خاک استوانه ای با قطر ۳۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۶۰۰ میلیمتر است. ژئوسل های مورد استفاده در آزمایش دارای ابعاد چشمه ۵۰×۵۰ میلیمتر و با ارتفاع های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلیمتر است. باتوجه به آزمایش های استاتیکی بهترین ارتفاع لایه ژئوسل به منظور ظرفیت باربری برابر ۵ سانتیمتر بود. با این ارتفاع آزمایش های مربوط به بهترین عمق قرارگیری ژئوسل انجام گرفت. عمق های قرارگیری ژئوسل ۳، ۹، ۱۵ و ۲۱ سانتیمتر قرار داده شد که بهترین عملکرد به لحاظ ظرفیت باربری در حالت بارگذاری استاتیکی در عمق ۱۵ سانتیمتر بود. باتوجه به آزمایش های استاتیکی افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح نسبت خاک غیرمسلح شده با ژئوسل به ارتفاع ۵ سانتیمتر و عمق قرارگیری ۱۵ سانتیمتر حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد است. در آزمایش های بارگذاری سیکلی مشاهده شد که بهترین عمق قرارگیری ژئوسل بین عمق های ۳، ۹ و ۱۵ سانتیمتر متعلق به عمق ۳ سانتیمتر در تراز کرنش حدود ۰/۲ درصد است که نشست های تجمعی حاصل از بارگذاری سیکلی نسبت به خاک غیرمسلح ۳۵٪ کاهش داشته است.

واژه های کلیدی: ظرفیت باربری، ژئوسل، دستگاه سه محوری، سیکلی، دینامیکی، ماسه ۱۶۱

فیروزکوه، بزرگ مقیاس

فهرست مطالب

فصل ۱ پیشگفتار	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- معرفی موضوع	۱
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۲
۴-۱- اهداف تحقیق	۲
۵-۱- سوال های تحقیق	۲
۶-۱- ساختار پایان نامه	۳
فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده	۴
۱-۲- مقدمه	۴
۲-۲- معرفی ژئوسل	۴
۳-۲- انواع ژئوسل	۵
۱-۳-۲- دسته بندی ژئوسل بر اساس جنس نوارها	۵
۲-۳-۲- دسته بندی ژئوسل بر اساس ساختار نوار	۵
۳-۳-۲- دسته بندی ژئوسل بر اساس نحوه اتصال نوارها	۶
۴-۲- ساخته شده با استفاده از ژئوگرید	۶
۵-۲- معرفی ژئو وب	۷
۶-۲- عملکرد لایه ژئوسل در خاک مسلح	۸
۱-۶-۲- اثر مقاومت جانبی	۸
۲-۶-۲- اثر توزیع تنش قائم	۸
۳-۶-۲- اثر غشاء و پوسته	۹
۷-۲- مطالعات دش و همکاران (۲۰۰۱)	۹
۸-۲- مطالعات دش و همکاران (۲۰۱۰)	۱۳
۹-۲- مطالعات دش و همکاران (۲۰۱۲)	۱۴
۱۰-۲- مطالعات لاثا و همکاران (۲۰۰۹)	۱۶
۱۱-۲- مطالعه شادمند و همکاران (۲۰۱۸)	۱۷
۱۲-۲- مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۸a)	۱۹
۱۳-۲- مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۸b)	۲۱
۱۴-۲- مطالعات مهرجردی و همکاران (۲۰۱۹)	۲۳

۲۵.....	۱۵-۲- مطالعات چودهاری و همکاران (۲۰۱۹).....
۲۵.....	۱۶-۲- مطالعات تفرشی و همکاران (۲۰۲۰).....
۲۷.....	۱۷-۲- مطالعات ونکاتسوارلو و هدج (۲۰۲۰).....
۲۸.....	۱۸-۲- مطالعات آروین و همکاران (۲۰۲۱).....
۳۰.....	۱۹-۲- مطالعات راجا و شوکلا (۲۰۲۱).....
۳۱.....	۲۰-۲- مطالعات چنگیزی و همکاران (۲۰۲۲).....
۳۳.....	۲۱-۲- مطالعات انجام شده استاتیکی بر روی دستگاه سه‌محوری.....
۳۴.....	۲۲-۲- جدول خلاصه مطالعات محققین.....
۳۶.....	۲۳-۲- نتیجه‌گیری.....
۳۷.....	فصل ۳ مصالح آزمایش، دستگاه آزمایش و روند آماده‌سازی نمونه.....
۳۷.....	۱-۳- مقدمه.....
۳۷.....	۲-۳- مصالح آزمایش.....
۳۷.....	۱-۲-۳- خاک ماسه.....
۳۸.....	۲-۲-۳- ژئوسل.....
۴۰.....	۳-۳- معرفی دستگاه آزمایش.....
۴۰.....	۱-۳-۳- کلیات دستگاه آزمایش.....
۴۲.....	۲-۳-۳- کلاهک و پایه.....
۴۴.....	۳-۳-۳- بلدر.....
۴۵.....	۴-۳-۳- پمپ و کیوم.....
۴۵.....	۵-۳-۳- کمپرسور هوا.....
۴۶.....	۶-۳-۳- قالب دوتکه.....
۴۶.....	۷-۳-۳- جرثقیل دروازه‌ای.....
۴۷.....	۸-۳-۳- پاور پک.....
۴۸.....	۹-۳-۳- جک بارگذاری.....
۴۸.....	۱۰-۳-۳- گپ سنسور.....
۴۹.....	۱۱-۳-۳- سلول سه محوری.....
۵۰.....	۱۲-۳-۳- لود سل.....
۵۰.....	۴-۳- روند و مراحل آماده‌سازی نمونه.....
۵۰.....	۱-۴-۳- شماره‌گذاری دقیق مراحل انجام آزمایش.....
۵۳.....	۲-۴-۳- اتمام آزمایش و برچیدن نمونه از دستگاه.....

۵۳.....	۵-۳- نحوه آماده سازی نمونه.....
۵۶.....	۶-۳- آزمایش سه محوری استاتیکی.....
۵۷.....	۷-۳- آزمایش سه محوری دینامیکی.....
۵۷.....	۸-۳- جمع بندی.....
۵۸.....	فصل ۴ نتایج.....
۵۸.....	۱-۴- مقدمه.....
۵۸.....	۲-۴- نتایج آزمایش های سه محوری استاتیکی.....
۵۸.....	۱-۲-۴- برنامه آزمایش های استاتیکی.....
۶۰.....	۲-۲-۴- نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۶۰ با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۲.....	۳-۲-۴- نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۹۵ با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۴.....	۴-۲-۴- تأثیر ارتفاع لایه ژئوسل با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۴.....	۵-۲-۴- تأثیر عمق قرارگیری لایه ژئوسل با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۵.....	۶-۲-۴- مقایسه خاک مسلح و غیرمسلح با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۶.....	۷-۲-۴- روند بهبود ظرفیت باربری خاک با دانسیته نسبی متوسط با آماده سازی نمونه به روش کوبش.....
۶۷.....	۸-۲-۴- مقایسه خاک مسلح و غیرمسلح با آماده سازی نمونه به روش بارش.....
۶۸.....	۹-۲-۴- تغییر شکل نمونه ها.....
۷۰.....	۳-۴- نتایج آزمایش های سه محوری دینامیکی.....
۷۰.....	۱-۳-۴- برنامه آزمایش های دینامیکی.....
۷۱.....	۲-۳-۴- نمایش نحوه بارگذاری و صحت سنجی بلدر.....
۷۳.....	۳-۳-۴- نمایش کلی از نمودار تنش - کرنش در طول آزمایش.....
۷۴.....	۴-۳-۴- مقایسه میزان کرنش در خاک مسلح و خاک غیرمسلح.....
۷۵.....	۵-۳-۴- بررسی مدول برشی در خاک مسلح و غیرمسلح.....
۷۷.....	۶-۳-۴- بررسی نسبت میرایی در خاک مسلح و غیرمسلح.....
۷۸.....	۷-۳-۴- لوپ هیستریزس.....
۷۹.....	۴-۴- جمع بندی.....
۸۰.....	فصل ۵ جمع بندی و پیشنهادها.....
۸۰.....	۱-۵- مقدمه.....
۸۰.....	۲-۵- جمع بندی.....
۸۱.....	۳-۵- پیشنهادها.....
۸۲.....	مراجع.....

فهرست جداول

جدول ۱-۲	مشخصات محیط زیستی و مکانیکی ژئوسل	۴
جدول ۱-۳	مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۳۸
جدول ۲-۳	مشخصات نوار ژئوگرید مورد استفاده در ساخت ژئوسل	۳۹
جدول ۳-۳	مشخصات و نتایج الگوهای مختلف بارش	۵۵
جدول ۱-۴	برنامه آزمایش‌های استاتیکی روش نمونه سازی کوبش	۵۹
جدول ۲-۴	برنامه آزمایش‌های استاتیکی روش نمونه سازی بارش	۶۰
جدول ۳-۴	خلاصه نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه (Dr۶۰٪)	۶۲
جدول ۴-۴	خلاصه نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه (Dr۹۵٪)	۶۳
جدول ۵-۴	برنامه آزمایش‌های دینامیکی روش متراکم سازی کوبش	۷۱
جدول ۶-۴	میزان کرنش هر آزمایش دینامیکی به تفکیک هر فاز	۷۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ الف) ژئوسل بدون سوراخ ب) ژئوسل سوراخ دار ۶
- شکل ۲-۲ نحوه اتصال سلول ها الف) ژئوسل ب) ژئو وب ۷
- شکل ۳-۲ اثر مقاومت جانبی از مسلح کننده ژئوسل [۳] ۸
- شکل ۴-۲ اثر توزیع تنش قائم از مسلح کننده ژئوسل [۳] ۹
- شکل ۵-۲ اثر غشاء و پوسته ناشی از تسلیح با ژئوسل [۳] ۹
- شکل ۶-۲ هندسه مدل آزمایش [۴] ۱۰
- شکل ۷-۲ نمودار فشار - نشست پی [۴] ۱۰
- شکل ۸-۲ هندسه پارامتر های مدل [۵] ۱۱
- شکل ۹-۲ تاثیر پارامتر مختلف مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی الف) عرض مسلح کننده ب) ارتفاع مسلح کننده [۵] ۱۲
- شکل ۱۰-۲ تاثیر پارامتر های مختلف مسلح کننده بر ظرفیت باربری پی الف) عمق مدفون ب) تراکم خاک [۵] ۱۳
- شکل ۱۱-۲ منحنی بار-نشست فونداسیون الف) غیرمسلح ب) مسلح ج) ضریب بهبود ظرفیت [۶] ۱۴
- شکل ۱۲-۲ ژئوگرید های استفاده شده در آزمایشات [۷] ۱۵
- شکل ۱۳-۲ منحنی نتایج الف) فشار-نشست برای ژئوگرید های مختلف ب) ضریب بهبود در اندازه سوراخ مسلح کننده ها در نشست های مختلف پی [۷] ۱۵
- شکل ۱۴-۲ نحوه چیدمان مسلح کننده ها الف) ژئوسل ب) مسلح کننده تصادفی ج) مسلح کننده صفحه ای [۸] ۱۶
- شکل ۱۵-۲ تأثیر استفاده از ژئوسنتتیک در افزایش ظرفیت باربری: مسلح کننده نمودار سمت راست (الف و ج) و چپ (ب و د) به ترتیب ژئونت و ژئوگرید [۸] ۱۷
- شکل ۱۶-۲ نمای شماتیک ژئوسل الف) FGR ب) GOR ج) مخزن و محل قرارگیری ژئوسل و پی و پارامتر های مربوطه د) مدل فیزیکی ه) ظرفیت باربری-نسبت نشست $D_f=35\%$ و) ظرفیت باربری-نسبت نشست $D_f=65\%$ ز) ضریب بهبود-نسبت نشست $D_f=35\%$ ح) ضریب بهبود-نسبت نشست $D_f=65\%$ [۹] ۱۹
- شکل ۱۷-۲ الف) توزیع اندازه ماسه ب) رفتار کششی ژئوگرید مورد آزمایش [۱۰] ۲۰
- شکل ۱۸-۲ الف) نمودار نشست-فشار فونداسیون در حالت خاک مسلح و غیرمسلح ب) نسبت افزایش باربری حالت های مختلف تسلیح خاک با میزان نشست ۱۰٪ عرض صفحه بارگذاری (عدد ها نمایانگر ظرفیت باربری فونداسیون ها است) [۱۰] ۲۰
- شکل ۱۹-۲ الف) تصویر شماتیک نمونه آزمایش و سنسور ها ب-ج-د) اضافه فشار قائم خاک تحت بار دینامیکی [۱۱] ۲۲
- شکل ۲۰-۲ خاک مسلح دیوار حائل در فرکانس های مختلف [۱۱] ۲۳
- شکل ۲۱-۲ ظرفیت باربری-صفحات بارگذاری آزمایش در خاک مسلح شده الف) GC110 ب) GC55 / تأثیر اندازه ذرات خاک بر ظرفیت باربری ج) غیرمسلح د) مسلح شده با ژئوسل GC110 ه) مسلح شده با ژئوسل GC55 [۱۲] ۲۴
- شکل ۲۲-۲ آزمایش و نمودار نتایج الف) نحوه قرارگیری ژئوسل ب) نمودار نیروی بالابرنده بر حسب جابجایی انکر [۱۳] ۲۵
- شکل ۲۳-۲ باکس آزمایش الف) محل قرارگیری لوله ب) نحوه قرارگیری ژئوسل [۱۴] ۲۶

- شکل ۲-۲۴ نمودار های آزمایش الف) تغییر قطرلوله-سیکل بارگذاری ب) نشست سطحی خاک-سیکل بارگذاری [۱۴]..... ۲۶
- شکل ۲-۲۵ نمای شماتیک خاک و سیستم آزمایش [۱۵]..... ۲۷
- شکل ۲-۲۶ الف) تأثیر عمق قرارگیری لایه ژئوسل ب) تأثیر مواد مختلف پرکننده لایه ژئوسل ج) اثر فرکانس بر دامنه جابه‌جایی [۱۵]..... ۲۸
- شکل ۲-۲۷ آزمایش برش مستقیم الف) دستگاه بزرگ مقیاس ب) نمونه و ابعاد ژئوفوم [۱۶]..... ۲۹
- شکل ۲-۲۸ نتایج آزمایش الف) جابجایی عمودی-جابجایی افقی ب) تنش برشی-جابجایی افقی [۱۶]..... ۲۹
- شکل ۲-۲۹ نمای شماتیک از تانک آزمایش در حالت الف) ژئوسنتتیک صفحه ای ب) ژئوسنتتیک کمربندی شده ج) نمای شماتیک از نوع بارگذاری دینامیکی [17]..... ۳۰
- شکل ۲-۳۰ میزان نشست پی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری در نسبت تنش اعمالی به تنش نهایی الف) ۵۰٪ ب) ۷۰٪ ج) ۹۰٪ [۱۷]..... ۳۱
- شکل ۲-۳۱ الف) شکل شماتیک از تانک آزمایش ب) نمودار فشار-نشست برای طول های مختلف سلول ژئوسل [۱۸]..... ۳۲
- شکل ۲-۳۲ نمودار فشار-نشست در فاصله های مختلف قرارگیری لایه های ژئوسل با یکدیگر نسبت ارتفاع کل نمونه الف) ۰/۲۴ ب) ۰/۱۹ ج) ۰/۱۶ [۱۸]..... ۳۲
- شکل ۳-۱ منحنی دانه بندی خاک ماسه ای ۱۶۱ فیروزکوه..... ۳۸
- شکل ۳-۲ تصویر ژئوسل بافته شده..... ۳۹
- شکل ۳-۳ نمای کلی از دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس..... ۴۰
- شکل ۳-۴ رایانه..... ۴۱
- شکل ۳-۵ تصویر سامانه جمع آوری داده ها..... ۴۲
- شکل ۳-۶ تصویر الف) کلاهک ب) پایه دستگاه سه محوری..... ۴۳
- شکل ۳-۷ تصویری از مجموعه پایین سلول و پایه..... ۴۳
- شکل ۳-۸ دستگاه بلدر..... ۴۴
- شکل ۳-۹ دستگاه پمپ و کیوم..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰ دستگاه کمپرسور هوا..... ۴۶
- شکل ۳-۱۱ قالب دو تکه..... ۴۶
- شکل ۳-۱۲ جرثقیل دروازه ای..... ۴۷
- شکل ۳-۱۳ دستگاه پاور پک..... ۴۷
- شکل ۳-۱۴ جک بارگذاری..... ۴۸
- شکل ۳-۱۵ الف: گپ سنسور ب: نحوه جانمایی سنسور و گیج مکانیکی نیرو روی بدنه دستگاه..... ۴۹
- شکل ۳-۱۶ سلول سه محوری..... ۴۹
- شکل ۳-۱۷ لود سل..... ۵۰
- شکل ۳-۱۸ قرار دادن ژئوسل در خاک..... ۵۱

- شکل ۳-۱۹ نمونه آماده برای بیرون آوردن از زیر جک بعد از اتمام مرحله وکیوم..... ۵۲
- شکل ۳-۲۰ قرار دادن سلول بر روی نمونه آزمایش..... ۵۲
- شکل ۳-۲۱ الگوهای مختلف بارش ماسه..... ۵۴
- شکل ۳-۲۳ نمودار دانسیته نسبی بر حسب فاصله سوراخ ها در الگوهای مختلف بارش..... ۵۶
- شکل ۴-۱ نمای شماتیک از نمونه آزمایش..... ۵۹
- شکل ۴-۲ نمودار تنش- کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۶۰٪..... ۶۱
- شکل ۴-۳ نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب با دانسیته نسبی ۶۰٪..... ۶۱
- شکل ۴-۴ نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۹۵٪..... ۶۲
- شکل ۴-۵ نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب با دانسیته نسبی ۹۵٪..... ۶۳
- شکل ۴-۶ بررسی تأثیر ضخامت لایه ژئوسل..... ۶۴
- شکل ۴-۷ تأثیر عمق قرارگیری لایه ژئوسل در خاک..... ۶۵
- شکل ۴-۸ مقایسه خاک مسلح و غیرمسلح..... ۶۶
- شکل ۴-۹ روند بهبود ظرفیت باربری خاک از دانسیته نسبی ۶۰٪ تا خاک مسلح دانسیته نسبی ۹۵٪..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰ نمودار تنش-کرنش خاک مسلح و غیرمسلح با عمق قرارگیری مختلف ژئوسل با روش آماده‌سازی نمونه با بارش..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ نمونه خاک (الف) قبل از آزمایش (ب) بعد از آزمایش..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲ شکل نمونه (الف) اندازه‌گیری شروع تغییرشکل و شکم‌دادگی (ب) شکل شماتیک تغییرشکل نمونه..... ۶۹
- شکل ۴-۱۳ نمودار تنش همه جانبه-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴ نمودار بارگذاری-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵ نمودار تنش-کرنش در کل زمان آزمایش دینامیکی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶ نمودار کرنش بر حسب زمان آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷ میزان کرنش بر حسب زمان در نمونه‌های مختلف خاک..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸ مدول برشی در خاک مسلح و غیرمسلح..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹ روند تغییرات مدول برشی در خاک مسلح و غیرمسلح..... ۷۶
- شکل ۴-۲۰ نسبت میرایی در خاک مسلح و غیرمسلح..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱ روند تغییرات نسبت میرایی در خاک مسلح و غیرمسلح..... ۷۸
- شکل ۴-۲۲ نمودار هیستریزيس آزمایش GC5D3..... ۷۸

فصل ۱ پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

انسان‌ها از گذشته دور برای بهبود کیفیت زندگی دست به ساخت سازه‌های گوناگون عمرانی زده‌اند. ساخت سازه‌های پیچیده و دشوار همانند سکوی پرتاب موشک، پل‌های معلق، برج‌های مرتفع و ... همگی بیانگر تلاش بشر است. کاملاً مشخص است که خاک نقش مهمی در این میان دارد و بار تمام این سازه‌ها در نهایت به خاک منتقل خواهد شد و بررسی نحوه عملکرد خاک همیشه مورد توجه است. بسیاری از دانشمندان ژئوتکنیک در مورد رفتار خاک به منظور اصلاح و بهبود رفتار خاک تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی مطالعه و تحقیق‌های گسترده نموده‌اند. قابل ذکر است که استفاده از انواع ژئوسنتتیک‌ها در بهبود رفتار خاک نقش مؤثری دارند. در حال حاضر از انواع ژئوسنتتیک‌ها که غالباً از مواد پلیمری ساخته می‌شوند به منظور طراحی و اجرا خاکریزها، سازه نگهبان خاک، راه‌ها، پی ساختمان‌ها، زهکشی و آب بندی استفاده می‌شود. یکی از انواع خانواده ژئوسنتتیک‌ها، ژئوسل است، که امروزه عمدتاً برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر استفاده می‌شود.

۱-۲- معرفی موضوع

در برخی از پروژه‌ها به دلیل وجود بار سیکلی همانند پی ماشین الات صنعتی مرتعش یا عبور مرور اتومبیل‌ها در بستر راهسازی یا سازه‌های دریایی در مجاورت امواج دریا و یا بار دینامیکی مانند زلزله که امکان استفاده از خاک غیرمسلح نیست باید تمهیدات ویژه‌ای اتخاذ شود و مطالعه رفتار دینامیکی خاک تقویت شده نیاز است تا امکان طراحی مناسب و علمی برای بستر خاک صورت بگیرد. یکی از روش‌های متداول که در سال‌های اخیر برای مسلح کردن خاک‌ها مدنظر بوده، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها بوده است. در حال حاضر خاک مسلح یک نوع صنعت ساختمانی است که شامل خاکی است که در آن به صورت لایه به لایه با موادی که دارای مقاومت کششی بالایی هستند، تقویت می‌شود. یکی از موارد استفاده در خاک مسلح، خانواده ژئوسنتتیک‌ها است که از دو کلمه زمین (Geo) و مصنوعی (Synthetic) تشکیل شده است و به معنی مواد مصنوعی استفاده شده در خاک است. ژئوسنتتیک‌ها از ورق‌های پلیمری یکپارچه تشکیل شده‌اند و انواع گوناگونی مانند ژئوگرید، ژئوتکستایل، ژئونت، ژئوممبران، ژئوکامپوزیت، ژئومت و ژئوسل است.

در این تحقیق سعی شده است تا با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر تسلیح خاک با ژئوسل را مورد بررسی قرار گیرد. عملکرد ژئوسل‌ها به این نحو است که داخل چشمه های یک نوع فشار همه جانبه تشکیل می‌شود و ضمن جلوگیری از حرکت جانبی لایه های خاک اثر بارهای وارده موجب افزایش باربری و کاهش نشست می‌گردند. در این تحقیق تلاش شده است به وسیله مدلسازی فیزیکی در سلول سه‌محوری به ارزیابی تجربی رفتار دینامیکی خاک ماسه ای مسلح شده به وسیله ژئوسل پرداخته شود.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

در خاک‌های مسلح شده با ژئوسل روابط دقیق برای تعیین رفتار خاک هنوز وجود ندارد و بنابراین روش های تحلیلی و عددی هنوز توانایی کامل در بررسی رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل ندارند، بنابراین نیاز به انجام مدلسازی فیزیکی در حالت استاتیکی و دینامیکی برای تعیین رفتار خاک مسلح شده با ژئوسل است.

۱-۴- اهداف تحقیق

هدف کلی این تحقیق ارزیابی رفتار خاک مسلح شده به وسیله ژئوسل تحت بار دینامیکی و همچنین اهداف زیر است:

- ❖ راه اندازی دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس برای انجام آزمایش بر روی ماسه مسلح شده با ژئوسل
- ❖ تعیین عمق بهینه اولین لایه ژئوسل زیر بستر صفحه بارگذاری تحت بار استاتیکی
- ❖ تعیین عمق بهینه اولین لایه ژئوسل زیر بستر صفحه بارگذاری تحت بار دینامیکی
- ❖ اثر ارتفاع لایه ژئوسل بر ظرفیت باربری و نشست تحت بار استاتیکی
- ❖ مقایسه ظرفیت باربری و نشست ماسه مسلح و غیرمسلح تحت بار استاتیکی
- ❖ میزان نشست ماسه مسلح و غیرمسلح در حالت دینامیکی
- ❖ ارزیابی رفتار ماسه مسلح شده به وسیله ژئوسل تحت بار دینامیکی

۱-۵- سوال های تحقیق

سوال های اساسی که در این تحقیق برای پیدا کردن جواب مناسب آن ها تلاش می‌شود در زیر

بیان شده است:

- بررسی وضعیت مقاومت خاک در حالت مسلح شده با ژئوسل و غیرمسلح
- بهترین عمق قرارگیری لایه ژئوسل در حالت استاتیکی

- بررسی میزان نشست خاک مسلح و غیرمسلح در حالت دینامیکی
- بررسی میزان میرایی در خاک مسلح و غیرمسلح
- بررسی میزان مدول برشی در خاک مسلح و غیرمسلح

۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه از پنج فصل تشکیل شده است که در فصل دوم به معرفی ژئوسل و نحوه عملکرد آن پرداخته می شود، همچنین مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی خاک مسلح شده با ژئوسل و آزمایش های استاتیکی و دینامیکی انجام شود. در فصل سوم مشخصات خاک مورد آزمایش و ژئوسل شرح داده شده است و بخش دیگری از این فصل به معرفی کامل دستگاه و مراحل انجام آزمایش پرداخته شده است. در فصل چهارم جدول معرفی آزمایش های استاتیکی و دینامیکی وجود دارد و نتایج حاصل از آزمایش های استاتیکی و دینامیکی نشان داده شده است. در فصل پنجم، جمع بندی نتایج آورده شده است و پیشنهاد هایی برای مطالعات آتی ذکر گردیده است. در آخر بعد از فصل پنجم، منابع استفاده شده در پایان نامه ذکر گردیده است.

فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- مقدمه

با گسترش علم شیمی و استفاده بیشتر از مواد پلیمری در صنعت، محصولات جدیدتری از خانواده ژئوسنتتیک ها تولید شده است و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در پروژه‌های ساختمانی و راهسازی در سال‌های اخیر بیش‌ازپیش به چشم می‌خورد. یکی از برتری‌های ژئوسل نسبت به سایر ژئوسنتتیک‌ها نظیر ژئوگرید و ژئوتکستایل در این است علاوه بر مقاومت برشی بین خاک و مسلح کننده، به دلیل ماهیت سه‌بعدی ژئوسل حالت مقاوم خاک پشت دیواره ژئوسل نیز نقش مهمی در افزایش مقاومت برشی خاک دارد. باتوجه‌به مزایای گسترده ژئوسل در افزایش باربری و کاهش نشست خاک، در این تحقیق از ژئوسل استفاده شده است.

۲-۲- معرفی ژئوسل

تحقیقات و مطالعات اولیه بر روی سیستم‌های مسلح کننده لانه‌زنبوری یا همان ژئوسل‌ها در سال ۱۹۷۵ توسط گروه مهندسی ارتش امریکا شروع شد. در آن زمان مهندسان به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم استفاده از ژئوسل در مسلح کردن خاک بهتر از استفاده از مقاطع ستون سنگی خواهد بود. ژئوسل‌ها از اتصال نوارهایی همچون ژئوممبرین یا ژئوتکستایل به‌صورت لانه‌زنبوری ساخته می‌شوند که بسته به ضخامت نوارهای تشکیل‌دهنده می‌تواند ضخامت مشخصی از خاک، شن، ماسه و حتی بتن را از طریق محدودکردن حرکت جانبی در خانه‌های خود نگه دارد. بر اساس تحقیقات، ارتفاع متداول لایه ژئوسل از ۷۵ تا ۱۰۰ میلیمتر و قطر سلول‌های ژئوسل در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلیمتر است. جدول ۱-۲ ویژگی‌های محیط زیستی و مکانیکی در ساخت ژئوسل است [۱].

جدول ۱-۲ مشخصات محیط زیستی و مکانیکی ژئوسل

مشخصات مکانیکی	مشخصات محیط زیستی
مقاومت ساییدگی	مقاومت شیمیایی
مقاومت نفوذپذیری	مقاومت در برابر اشعه فرابنفش
مقاومت کششی	مقاومت حرارتی
مدول الاستیک	مقاومت بیولوژیکی
مشخصه خزش	-
مشخصات اصطکاکی بافت/بافت و بافت/خاک	-

۲-۳- انواع ژئوسل

ژئوسل‌های مختلف را می‌توان براساس نحوه اتصال نوارها (ساختار نقاط اتصال) و جنس نوارهای تشکیل دهنده چشمه‌ها و ساختار نوارها (یکپارچه یا سوراخدار) دسته‌بندی کرد.

۲-۳-۱- دسته‌بندی ژئوسل بر اساس جنس نوارها

به‌طور کلی جنس نوارهایی که در ساخت ژئوسل به کار می‌روند را به ۲ دسته نوارهای نمدی از جنس ژئوتکستایل بافته نشده و نوارهای پلاستیکی از جنس پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) تقسیم کرد. ژئوسل‌های نمدی معمولاً از جنس پلی‌استر ساخته شده‌اند که از ویژگی این نوع ژئوسل‌ها می‌توان به قابلیت فیلتری عمل کردن آن اشاره کرد که جریان آب را عبور می‌دهند و از عبور ذرات خاک جلوگیری می‌کند. از معایب این نوع جنس از نوارها می‌توان به گران بودن و عدم مقاومت در برابر اشعه فرابنفش خورشید اشاره کرد.

۲-۳-۲- دسته‌بندی ژئوسل بر اساس ساختار نوار

در این دسته‌بندی می‌توان دو نوع ژئوسل را در نظر گرفت:

- ژئوسل بدون سوراخ
- ژئوسل سوراخدار

ژئوسل‌های پلاستیکی ساخته شده از ژئوممبرین، از پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) بدون سوراخ هستند. بایستی در استفاده از ژئوممبرین‌ها در خاک‌های اشباع دقت نظر داشت به این خاطر که با اعمال بار بر روی این خاک‌ها به علت نفوذناپذیری و عدم امکان زهکشی با افزایش فشار منفذی روبرو خواهیم شد که باعث کاهش مقاومت برشی خاک خواهد شد. بهتر است در خاک‌های اشباع از نوارهای سوراخدار جهت سهولت در زهکشی استفاده نمود. از مزایای ژئوسل‌های سوراخدار می‌توان به اندرکنش خاک در دو طرف نوار اشاره کرد که باعث افزایش ظرفیت باربری خواهد شد و همچنین استفاده ژئوسل‌های سوراخدار در خاک‌های اشباع به دلیل سهولت در زهکشی توصیه می‌شود و حتی این نوع ژئوسل در کاربری کشاورزی قابلیت استفاده دارد. شکل ۱-۲ نمونه ای از ژئوسل سوراخ دار و بدون سوراخ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ الف) ژئوسل بدون سوراخ ب) ژئوسل سوراخ دار

نکته قابل توجه در استفاده از ژئوسل سوراخ دار طراحی بهینه با ارتفاع کمتر لایه ژئوسل مورد نیاز نسبت به ژئوسل بدون سوراخ است که دلیل این اتفاق اندرکنش بین ذرات خاک در دو طرف ژئوسل سوراخ دار است که مانند قفل و بست عمل می کنند.

۲-۳-۳- دسته بندی ژئوسل بر اساس نحوه اتصال نوارها

یکی از موارد مهم در بررسی و دسته بندی نوع ژئوسل نحوه اتصال نوارها به یکدیگر است. بعضی از نوار از طریق حرارت و بعضی از طریق چسب های مخصوص و یا به طریق ترکیبی و استفاده از هر دو روش نوارها به یکدیگر اتصال پیدا می کنند و به شکل شبکه لانه زنبوری در می آیند. لازم به ذکر است در پروژه های تحقیقاتی با ابعاد کوچک ممکن است از روش هایی مانند اتصال از طریق بست کمربندی از جنس پلاستیک، شبکه سازی لانه زنبوری انجام شود.

۲-۴- ساخته شده با استفاده از ژئوگرید

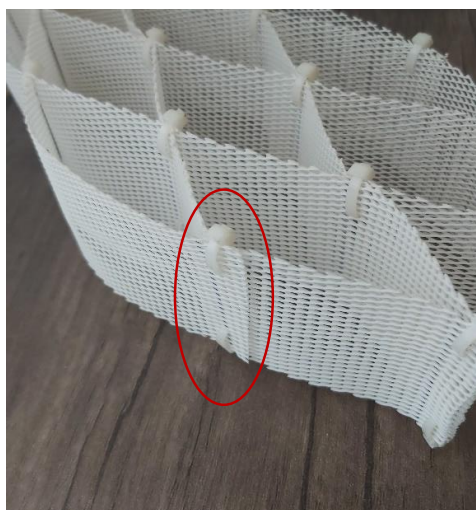
علاوه بر ژئوسنتتیک هایی مثل ژئوممبرین ها و ژئوتکتایل ها که در ساخت ژئوسل ها کاربرد دارند، می توان از ژئوگریدها هم ژئوسل ساخت. در این روش نوارهایی با ابعاد دلخواه از طاقه ژئوگرید بریده می شود و با روش های مختلفی مانند نوار پلاستیکی دوخته می شوند. استفاده از نوارهای ژئوگرید به علت وجود حفره در نوارها باعث اندرکنش و قفل شدگی سنگ دانه دو طرف نوار می شود و طراحی بهینه تری انجام می شود. مشخصات مقاومتی ژئوگریدها توسط استاندارد آزمایش کشش پهنای باند (ASTM D4595) به دست می آید [۲].

۲-۵- معرفی ژئو وب

در واقع ژئو وب‌ها زیر مجموعه‌ای از ژئوسل‌ها هستند که ساختار عملکردی آن مانند ژئوسل یک سیستم محصورکننده سلولی به شکل لانه‌زنبوری سه‌بعدی است. برای عملکرد بهتر درون سلول‌های ژئو وب با مصالح دانه‌ای پر می‌شود. ژئو وب‌ها با دو عملکرد افزایش باربری و کنترل فرسایش خاک یاد می‌شوند. سوراخ‌های موجود بر روی نوارهای ژئو وب دو نقش مهم دارند. اولین نقش ژئو وب‌ها، نقش مقاومتی آن است که عملکرد آن مانند دال نیمه صلب در توزیع بار جانبی است که به واسطه سوراخ‌هایی که در نوارهای ژئو وب وجود دارد یک اتصال و درگیری بین دانه‌های دو سمت نوار ایجاد می‌شود که این سوراخ‌ها باعث افزایش عملکرد توزیع بار می‌شود و همچنین این سوراخ‌ها موجب کاهش ضخامت ارتفاع ژئوسل مورد نیاز می‌گردد. دومین نقش سوراخ‌ها در ژئو وب، عملکرد به عنوان زهکش برای خاک محصور درون سلول‌ها است. در شکل ۲-۲ تفاوت میان نوع اتصال سلول‌ها در ژئوسل و ژئو وب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲ نحوه اتصال سلول‌ها (الف) ژئوسل (ب) ژئو وب

برای بیان جامع و کامل عملکرد ساختار مقاومتی مسلح‌کننده‌های سه‌بعدی همچون ژئو وب‌ها، باید این عملکرد را به ۲ دسته تقسیم نمود. در شرح عملکرد اول باید سیستم سه‌بعدی محصورکننده ژئو وب اشاره کرد که تنش افقی ناشی از تنش قائم اعمالی بر لایه ژئو وب به دیواره نوار وارد می‌شود و یک سیستم مقاومتی ایجاد می‌شود. عملکرد دوم به موجب اندرکنش خاک با مجموعه کلی مسلح‌کننده که شامل مصالح پرکننده داخل سلول‌ها و نوارهای ژئو وب است که کل تنش برشی بین این دو سطح به ژئو وب اعمال می‌شود و این مجموعه به صورت کلی به کشش می‌افتد.

به‌طور کلی جنس ژئو وب‌ها از پلی‌اتیلن با دانسیته بالا است که نحوه اتصال نوارها با جوش اولتراسونیک است. از کاربردهای مهم ژئو وب‌ها می‌توان به استفاده این مسلح کننده‌ها در دیوارهای حایل، پایداری شیروانی‌ها، پایدارسازی بستر جاده و ریل اشاره کرد.

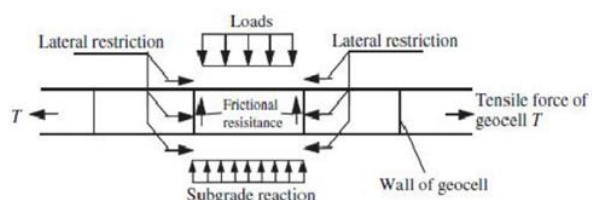
۶-۲- عملکرد لایه ژئوسل در خاک مسلح

آقای ژائو^۱ در مطالعات مبسوطی که بر روی عملکرد و نقش لایه مسلح کننده ژئوسل در خاک داشته، عملکرد اصلی لایه ژئوسل را در سه مورد زیر ارزیابی کرده است.

- اثر مقاومت جانبی
- اثر توزیع تنش قائم
- اثر غشاء و پوسته

۶-۲-۱- اثر مقاومت جانبی

با نگاه دقیق به یک لایه ژئوسل، نشان داده شد که باتوجه به ساختار سه‌بعدی سلول‌ها، امکان لغزش جانبی مصالح پر شده درون سلول‌ها وجود ندارد و این موضوع باعث افزایش مقاومت برشی مصالح پرکننده سلول‌ها می‌شود. نکته قابل توجه این است که اندرکنش به وجود آمده بین لایه ژئوسل و خاک بالا و پایین آن موجب افزایش محدودیت جانبی و کاهش کرنش جانبی می‌شود. نکات ذکر شده باعث کاهش توزیع تنش قائم بر روی بستر خاک خواهد شد. شکل ۲-۳ تأثیر اثر مقاومت جانبی به موجب تسلیح با ژئوسل را نشان می‌دهد.

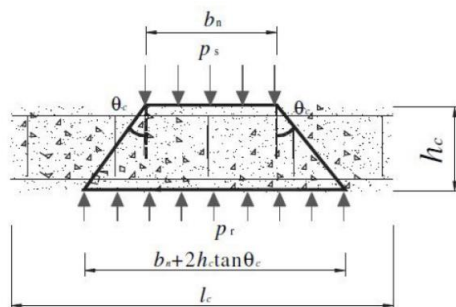


شکل ۲-۳ اثر مقاومت جانبی از مسلح کننده ژئوسل [۳]

۶-۲-۲- اثر توزیع تنش قائم

با توجه به عملکرد لایه مسلح کننده به‌صورت نسبتاً صلب، این رفتار باعث بازتوزیع بار پی در یک سطح گسترده‌تری می‌شود. یعنی در مقایسه با حالتی که لایه ژئوسل وجود ندارد فشار در تراز خاک زیرلایه ژئوسل کاهش می‌یابد. شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که ژئوسل موجب افزایش شیب توزیع تنش (θ) می‌شود و به عبارتی تنش کاهش پیدا می‌کند.

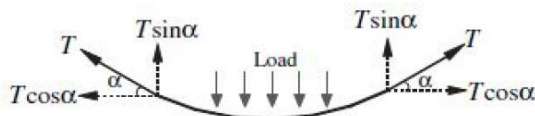
¹ Zhao



شکل ۲-۴ اثر توزیع تنش قائم از مسلح کننده ژئوسل [۳]

۲-۶-۳- اثر غشاء و پوسته

شکل ۲-۵ اثر غشاء و پوسته را نشان می‌دهد که وقتی بارگذاری بر روی لایه مسلح کننده ژئوسل انجام می‌شود، لایه مسلح کننده دچار قوس می‌شود و یک نیروی کششی در مسلح کننده به وجود می‌آید. این نیروی کششی دو مولفه قائم و افقی دارد که مولفه قائم باعث کاهش نشست بستر خاک می‌شود و به موجب آن افزایش باربری را خواهیم داشت [۳].



شکل ۲-۵ اثر غشاء و پوسته ناشی از تسلیح با ژئوسل [۳]

۲-۷- مطالعات دش و همکاران (۲۰۰۱)

در این تحقیق آقای دش و همکاران (2001a) به صورت آزمایشگاهی به بررسی خاک ماسه‌ای مسلح شده به وسیله ژئوسل پرداخته است. باکس آزمایش استفاده شده در این تحقیقات دارای ابعاد با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۱۲۰۰، ۳۳۲ و ۷۰۰ میلیمتر بوده است، همچنین صفحه فولادی صلب بارگذاری دارای ابعاد با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۳۳۰، ۱۰۰ و ۲۵ میلیمتر است. در این تحقیق پارامترهای دانسیته نسبی خاک، سختی کششی ورق ژئوگرید مورد استفاده در ساخت ژئوسل، شکل ژئوسل، اندازه سلول‌ها، ارتفاع لایه ژئوسل و ارتفاع خاک بر روی لایه ژئوسل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. خاک ماسه‌ای استفاده شده