



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

ژئوتکنیک

بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های سنگی تحت اثر بارهای سیکلی در آزمایش سه‌محوری

نگارش:

سعید احمدی

استاد راهنما:

جناب دکتر حسن قاسم‌زاده

بهمن ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اکنون که بیاری پروردگارویاری و رابنهایی اساید بزرگ موفق به پایان این رساله شده ام و خلیفه خود داشتم که نهایت پاسکزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده اند ربه عل آورم:

در آغاز از استاد گرانقدر دکتر حسن قاسم زاده که رابنهایی این پایان نامه ربه عمده داشته اند کمال تشکر را دارم.

از دو اوران گرامی که زحمت داورسی و تصحیح این پایان نامه ربه عمده داشته اند کمال سپاس را دارم.

خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده اند تشکر می کنم.

از کلیه هم دانشکامیان و بهراندان عزیز، دوستان خوبم آقایان بهادی، جعفرزاده و کاغذلانی نهایت سپاس را دارم.

و در پایان این پایان نامه را تقدیم می کنم به همسر عزیزم که با حضورش و بهرایی اش همیشه مرا در این راه استوار و ثابت قدم نموده است.



هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون های سنگی تحت اثر بارهای سیکلی در آزمایش سه محوری توسط آقای سعید احمدی 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 حسن قاسم زاده امضاء

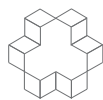
۲- ممتحن خارجی آقای دکتر عباس قلندرزاده امضاء

۳- ممتحن داخلی آقای دکتر فرزین کلانتری امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آقای دکتر فرزین کلانتری امضاء

دانشکده عمران

تاریخ:



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب سعید احمدی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه‌شده در پایان‌نامه با عنوان بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های سنگی تحت اثر بارهای سیکلی در آزمایش سه‌محوری با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده، توسط شخص اینجانب انجام‌شده 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 به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی‌برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین 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 خواجه‌نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل‌واگذاری نیست.
همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه 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 دوره

تحصیل و پایان‌نامه بودند.

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

آقایان بهادری، کاغذکنانی و جعفرزاده که بدون هیچ چشم‌داشتی 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

ستون سنگی عبارت است از جایگزینی قسمتی از خاک ضعیف و نرم با مصالح دارای سختی و مقاومت بیشتر از قبیل شن و سنگ شکسته شده. ایده اصلی این روش کاهش نیروی وارد بر خاک نرم بدون تغییر اساسی در ساختار خاک است. در نتیجه تراکم پذیری خاک کاهش یافته و ظرفیت باربری و مقاومت برشی آن افزایش پیدا می کند. با پیشرفت های صورت گرفته در زمینه های علوم پلیمر و تولید ژئوسنتتیک ها و به کارگیری مسلح کننده های پلیمری، روش ستون سنگی دچار تحولات گسترده ای شده که در راستای افزایش بازدهی این سیستم است. در این پژوهش ابتدا به تجهیز و راه اندازی دستگاه سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی پرداخته شده است و در ادامه اقدام به مدل سازی فیزیکی ستون های سنگی در خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد شده است. برای ارتقا ظرفیت باربری ستون سنگی از روکش ژئوتکستایل و الیاف شیشه استفاده گردیده است. آزمایش ها نشان دادند استفاده از روکش برای ستون سنگی بدلیل کنترل کرنش جانبی تا ۲ برابر ظرفیت باربری را در تنش های همه جانبه پایین تر (۵۰ کیلو پاسکال) افزایش داده است. همچنین بکارگیری ستون سنگی در خاک ماسه ای باعث ایجاد چسبندگی ظاهری تا ۱۴ کیلو پاسکال و افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۲۹ درجه تا ۳۵ درجه می گردد. پس از تعیین نتایج در حالت استاتیکی، آزمایش های سیکلی انجام گرفت. طی این آزمایش ها خاک ماسه ای غیرمسلح و خاک مسلح شده با ستون سنگی روکش شده با الیاف شیشه تحت تنش های همه جانبه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان می دهند استفاده از ستون سنگی باعث افزایش میزان مدول برشی در خاک می گردد. با در نظر گرفتن محدوده تنش های اعمالی در آزمایش های سیکلی تغییرات محسوسی در نسبت میرایی صورت نگرفت.

واژه های کلیدی: ستون سنگی، آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس، الیاف شیشه

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه و کلیات	۸
۱-۱- مقدمه	۸
۱-۲- اهمیت موضوع	۸
۱-۳- اهداف تحقیق	۹
۱-۴- دامنه تحقیق	۹
۱-۵- ساختار تحقیق	۹
فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده	۱۰
۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲- ستون سنگی	۱۰
۲-۳- آزمایش های سیکلی	۱۷
۲-۴- الیاف شیشه	۲۵
۲-۵- جمع بندی	۲۶
فصل ۳ مشخصات مصالح مصرفی و برنامه کار آزمایشگاهی	۲۶
۳-۱- کلیات	۲۶
۳-۲- دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس	۲۷
۳-۳- اجزای دستگاه سه محوری سیکلی	۲۹
۳-۳-۱- قاب بارگذاری	۲۹
۳-۳-۲- سیستم بارگذاری	۲۹
۳-۳-۳- حسگر اندازه گیری جابجایی	۳۱
۳-۳-۴- حسگر سنجش جابجایی	۳۱
۳-۳-۵- لود سل	۳۲
۳-۳-۶- سلول سه محوری	۳۳
۳-۳-۷- قالب های ماسه و رس	۳۴
۳-۳-۸- کلاهک بالایی	۳۴

۳۵	۳-۳-۹- محل اعمال نیرو و جابجایی نمونه
۳۶	۳-۳-۱۰- سیستم ایجاد خلاء
۳۷	۳-۳-۱۱- سیستم کنترل فشار همه‌جانبه و پس فشار
۳۸	۳-۳-۱۲- سیستم گاز CO ₂
۳۹	۳-۳-۱۳- دستگاه گیرنده داده
۳۹	۳-۳-۱۴- رایانه و نرم‌افزار پایش داده‌ها
۴۰	۳-۳-۱۵- حسگرهای اندازه‌گیری فشار آب
۴۰	۳-۳-۱۶- سیستم بالابر
۴۱	۳-۳-۱۷- پمپ هوای فشرده
۴۱	۳-۴- مصالح
۴۱	۳-۴-۱- خاک و سنگ
۴۳	۳-۴-۲- بررسی مصالح ستون سنگی
۴۴	۳-۴-۳- ژئوتکستایل
۴۴	۳-۴-۴- الیاف شیشه
۴۵	۳-۴-۵- آزمایش سه محوری بزرگ‌مقیاس
۴۵	۳-۴-۵-۱- نحوه آماده‌سازی نمونه ستون سنگی در خاک ماسه‌ای
۴۸	۳-۴-۵-۲- نحوه آماده‌سازی نمونه بدون ستون سنگی
۴۸	۳-۴-۵-۳- تعیین تست‌های آزمایشگاهی
۵۰	۳-۵- جمع‌بندی
۵۲	فصل ۴ بررسی و تفسیر نتایج
۵۲	۴-۱- مقدمه
۵۲	۴-۲- آزمایش سه‌محوری
۵۳	۴-۲-۱- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه
۵۴	۴-۲-۲- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی مصالح ستون سنگی
۵۶	۴-۲-۳- صحت سنجی نتایج آزمایش‌ها
۵۶	۴-۲-۴- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی ستون سنگی (قطر ۱۰ سانتی‌متر)

۵۸	 ۴-۲-۵- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی با ستون سنگی قطر ۱۵ سانتی‌متر
۶۰	 ۴-۲-۶- مقایسه نتایج
۶۳	 ۴-۲-۷- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی ستون سنگی روکش‌دار (قطر ۱۰ سانتی‌متر)
۶۵	 ۴-۲-۸- آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی ستون سنگی بزرگ روکش‌دار (قطر ۱۵ سانتی‌متر)
۶۷	 ۴-۲-۹- نتایج آزمایش‌های سیکلی
۶۷	 ۴-۲-۹-۱- آزمایش‌های سیکلی روی ماسه ۱۶۱
۷۱	 ۴-۲-۹-۲- آزمایش‌های سیکلی ستون سنگی با روکش الیاف شیشه
۷۴	 ۴-۲-۹-۳- مقایسه نتایج نمودارهای مدول برشی ماسه ۱۶۱ و ستون سنگی روکش‌دار
۷۶	 ۴-۲-۱۰- تغییرات حلقه هیستریزیس
۷۷	 ۴-۲-۱۱- جمع‌بندی
۸۰	 فصل ۵ جمع‌بندی و پیشنهادها
۸۰	 ۵-۱- مقدمه
۸۰	 ۵-۲- جمع‌بندی
۸۱	 ۵-۳- پیشنهادات
۸۲	 منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲ رفتار خاک در سطوح کرنش مختلف [۱۶].....	۱۸
جدول ۱-۳ جدول مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه.....	۴۳
جدول ۲-۳ برنامه آزمایش‌های استاتیکی	۴۸
جدول ۳-۳ برنامه آزمایش‌های سیکلی	۴۹
جدول ۱-۴ خلاصه نتایج آزمایش سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۵۴
جدول ۲-۴ مقایسه نتایج آزمایش‌ها	۵۶
جدول ۳-۴ خلاصه نتایج آزمایش سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به همراه ستون سنگی کوچک	۵۸
جدول ۴-۴ خلاصه نتایج آزمایش سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به همراه ستون سنگی بزرگ	۶۰
جدول ۵-۴ تغییرات ظرفیت باربری نهایی، زاویه اصطکاک و چسبندگی در تنش‌های همه‌جانبه مختلف.....	۶۰
جدول ۶-۴ تغییرات ظرفیت باربری در کرنش‌های ۰.۲٪ و ۰.۴٪	۶۱
جدول ۷-۴ تغییرات کرنش و نشست نسبت به خاک غیرمسلح.....	۶۲
جدول ۸-۴ نتایج نمودار تنش-کرنش برای ستون سنگی قطر ۱۰ سانتیمتر در فشار دورگیر ۵۰ کیلو پاسکال.....	۶۵
جدول ۹-۴ خلاصه نتایج نمودار تنش-کرنش برای فشار دورگیر ۵۰ کیلو پاسکال.....	۶۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ مدل سازی ستون سنگی در خاک رس [۱۰]..... ۱۱
- شکل ۲-۲ تغییرات نسبت تمرکز تنش به تغییرات نسبت جایگزینی مصالح [۱۰]..... ۱۲
- شکل ۳-۲ تغییرات نسبت تمرکز تنش با مقاومت زهکشی نشده خاک رس اطراف ستون سنگی [۱۰]..... ۱۲
- شکل ۴-۲ نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش [۱۱]..... ۱۳
- شکل ۵-۲ مدل فیزیکی دیناث . کنتی برای ستون سنگی جهت انجام آزمایش [۲۸] زرز..... ۱۴
- شکل ۶-۲ نمودار آزمایش سه محوری ستون سنگی در فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال [۱۳]..... ۱۵
- شکل ۷-۲ نمونه ستون سنگی در دستگاه برش بزرگ مقیاس الف: محصور نشده ب: محصور شده [۱۴]..... ۱۵
- شکل ۸-۲ نمودار تنش برشی جابجایی ستون سنگی در خاک ماسه ای الف: ستون بدون دورگیر ب: ستون دورگیردار..... ۱۶
- شکل ۹-۲ مدول برشی و نسبت میرایی در حله هیستریزیس..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲ اثر نسبت تخلخل بر مدول برشی حداکثر [۱۷]..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲ منحنی نسبت میرایی در برابر نسبت مدول برشی [۱۸]..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲ تغییرات ضریب میرایی و نسبت مدول برشی [۱۸]..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲ تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی در اثر افزایش کرنش برشی [۱۹]..... ۲۲
- شکل ۱۴-۲ اثر تنش محصورکننده بر مدول برشی..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲ اثر تنش همه جانبه بر کرنش های مختلف [۱۶]..... ۲۴
- شکل ۱۶-۲ تصویری از الیاف شیشه..... ۲۵
- شکل ۱-۳ نمای کلی دستگاه سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس..... ۲۸
- شکل ۲-۳ (الف) شماتیک قاب بارگذاری (ب) ساختار قاب بارگذاری..... ۲۹
- شکل ۳-۳ جک هیدرولیکی ۱۰ تن..... ۳۰
- شکل ۴-۳ پاورپک جک هیدرولیکی..... ۳۰
- شکل ۵-۳ حسگر اندازه گیری جابجایی..... ۳۱
- شکل ۶-۳ ریزسنگ..... ۳۲
- شکل ۷-۳ لودسل..... ۳۲
- شکل ۸-۳ ظرفیت لودسل..... ۳۳
- شکل ۹-۳ سلول سه محوری..... ۳۳
- شکل ۱۰-۳ قالب دوکفه ای الف) مناسب ماسه و رس ب) مناسب خاک رس..... ۳۴
- شکل ۱۱-۳ مجموعه زیرین سلول سه محوری..... ۳۵

شکل ۳-۱۲	تصویری از مجموعه پایین سلول و نمونه	۳۶
شکل ۳-۱۳	پمپ مکش	۳۷
شکل ۳-۱۴	محفظه اعمال فشار	۳۷
شکل ۳-۱۵	کیسول گاز CO ₂	۳۸
شکل ۳-۱۶	شیر تنظیم خروج گاز	۳۸
شکل ۳-۱۷	دستگاه جمع‌آوری داده‌ها	۳۹
شکل ۳-۱۸	رایانه متصل به دستگاه گیرنده	۴۰
شکل ۳-۱۹	حسگر اندازه‌گیری فشار	۴۰
شکل ۳-۲۰	بالابر برقی ظرفیت ۱ تن	۴۱
شکل ۳-۲۱	کمپرسور باد	۴۱
شکل ۳-۲۲	نمودار دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ستون سنگی	۴۲
شکل ۳-۲۵	ژئوتکستایل	۴۴
شکل ۳-۲۶	الیاف شیشه	۴۵
شکل ۴-۱	نمودار تنش کرنش نمونه سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۵۳
شکل ۴-۲	نمودار دواير مور و پوش گسيختگی مور کولمب	۵۴
شکل ۴-۵	نمودار تنش-کرنش نمونه سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به همراه ستون سنگی کوچک	۵۷
شکل ۴-۶	نمودار دواير موهر رسم شده و پوش گسيختگی موهر-کولمب	۵۷
شکل ۴-۷	نمودار تنش-کرنش نمونه سه‌محوری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به همراه ستون سنگی بزرگ	۵۹
شکل ۴-۸	نمودار دواير موهر رسم شده و پوش گسيختگی	۵۹
شکل ۴-۹	نمودار تنش انحرافی-کرنش نمونه‌های دور گیر ۵۰ کیلو پاسکال	۶۳
شکل ۴-۱۱	نمودار تنش انحرافی - کرنش نمونه‌های دور گیر ۵۰ کیلو پاسکال	۶۶
شکل ۴-۱۲	نمودار بارگذاری آزمایش‌های سیکلی	۶۸
شکل ۴-۱۳	نمودار تغییر کرنش نسبت به زمان طی تنش‌های مساوی در ماسه ۱۶۱	۶۸
شکل ۴-۱۴	نمودار تغییرات تنش همه جانبه در طول تست	۶۹
شکل ۴-۱۵	نمودار تغییرات مدول برشی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۷۰
شکل ۴-۱۶	نمودار تغییرات نسبت میرایی ماسه	۷۰
شکل ۴-۱۷	نمودار تغییر کرنش نسبت به زمان طی تنش‌های مساوی در ماسه ۱۶۱ مسلح شده با ستون سنگی ...	۷۱
شکل ۴-۱۸	نمودار تغییرات تنش همه جانبه در طول تست	۷۲
شکل ۴-۱۹	نمودار مدول برشی به سیکل ماسه	۷۳
شکل ۴-۲۰	نمودار تغییرات نسبی میرایی ماسه	۷۳

- شکل ۴-۲۱ نمودار مدول برشی به سیکل در فشار همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال ۷۴
- شکل ۴-۲۲ نمودار مدول برشی به سیکل در فشار همه‌جانبه ۷۵ کیلوپاسکال ۷۵
- شکل ۴-۲۳ نمودار مدول برشی به سیکل در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال ۷۵
- شکل ۴-۲۵ مقایسه حلقه‌های هیستریزیس خاک و ستون سنگی در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال ۷۷

فصل ۱ مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

بهسازی و اصلاح خاک عمدتاً به معنای بهبود پارامترهای مهم خاک در راستای اهدافی از جمله افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، افزایش سرعت تحکیم و کاهش پتانسیل روانگرایی است که به طور کلی به سه روش تثبیت، تراکم و تسلیح تقسیم می شود. از جمله زیرمجموعه این روش ها می توان به نیلینگ، میخ کوبی، شمع کوبی، اختلاط خاک در عمق، تراکم مکانیکی یا دینامیکی، ستون سنگی، وکیوم، برداشت و جایگزینی و... اشاره کرد. روش ستون سنگی به عنوان روشی کارآمد، سازگار با محیط زیست و کاملاً اقتصادی همواره مورد توجه بوده و توانایی بهسازی زمین های سست و خاک های غیر چسبنده را دارد. استفاده از ستون های سنگی برای بهبود خاک نرم یکی از مؤثرترین شیوه های اصلاح ظرفیت باربری خاک هایی است که از ظرفیت باربری کم برخوردارند و یا با نشست های زیاد همراه هستند. ستون سنگی ظرفیت باربری خاک را افزایش می دهد، نشست ها را کاهش می دهد. یکی از کاربردهای روش های بهسازی زمین مانند اختلاط عمیق و ستون های سنگی به منظور کاهش پتانسیل روانگرایی است. به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح ستون سنگی در هنگام زلزله موجب کاهش فشار آب منفذی می شود و همچنین به دلیل استفاده از ستون سنگی در خاک های سیلتی موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده و مقاومت خاک در برابر روانگرایی افزایش می یابد. با پیشرفت های صورت گرفته در زمینه های علوم پلیمر و تولید ژئوسنتتیک ها و به کارگیری مسلح کننده های پلیمری، روش ستون سنگی دچار تحولات گسترده ای شده که در راستای افزایش بازدهی این سیستم است.

۱-۲- اهمیت موضوع

یکی از مناسب ترین روش ها جهت افزایش باربری و کاهش نشست که سازگار با محیط زیست نیز هست، روش ستون سنگی است. از آنجایی که انبساط جانبی ستون های سنگی تنها دلیل عدم فشار جانبی در قسمت بالای آن رخ می دهد، از این رو قرار دادن ژئوسنتتیک در آن بخش نیز ممکن است مفید باشد [۱]. کومار (۲۰۱۲) یک تحقیق در زمینه استفاده از شمع های دانه ای برای بهسازی خاک متمایل به انبساط انجام داد. او نشان داد ظرفیت باربری ستون سنگی با افزودن تقویت ژئوسنتتیک افزایش می یابد [۲].

۳-۱- اهداف تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی و راه‌اندازی دستگاه سه‌محوری آزمایشگاه دینامیک خاک و سپس بررسی و مشاهده رفتار ستون‌های سنگی در آزمایش سه‌محوری سیکلی و تأثیر آن بر ظرفیت باربری و نشست در خاک ماسه‌ای است. از سوی دیگر اضافه کردن روکش به ستون سنگی موجب افزایش مقاومت ستون سنگی می‌گردد که در این آزمایش‌ها از پارچه الیاف شیشه و ژئوتکستایل برای روکش ستون سنگی در دستگاه سه‌محوری بزرگ‌مقیاس در ماسه برای اندازه‌گیری تغییرات ظرفیت باربری با ستون‌های سنگی در مقیاس بزرگ و تأثیر فشار همه‌جانبه متفاوت بر روی ظرفیت باربری و نشست در آزمایش‌های استاتیکی و مدول برشی و میرایی در آزمایش‌های سیکلی است.

۴-۱- دامنه تحقیق

با توجه به اینکه اکثر تحقیقات انجام‌شده به‌صورت عددی، تحلیلی و یا در مقیاس‌های کوچک انجام‌شده و بررسی ستون سنگی در شرایط محل مستلزم هزینه بسیار زیاد است، از این‌رو در این تحقیق روش ستون سنگی در مقیاس بزرگ و به‌صورت آزمایشگاهی در دستگاه سه‌محوری مورد بررسی قرار گیرد. به همین دلیل پس از تجهیز و راه‌اندازی دستگاه سه‌محوری سیکلی با طراحی یکسری آزمایش‌ها به بررسی عملکرد ستون سنگی در خاک ماسه‌ای ۱۶۱ فیروزکوه با استفاده از ژئوسنتتیک و همچنین پارچه الیاف شیشه در دو حالت استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌شده است.

۵-۱- ساختار تحقیق

در این فصل در آن کلیات و مقدمات روش ستون سنگی ذکر شده است. در فصل دوم این پژوهش به‌مرور ادبیات فنی ستون سنگی، جزئیات مربوط به ژئوسنتتیک‌ها و الیاف شیشه و تأثیر آن‌ها در افزایش مقاومت، کاهش نشست محوری و جانبی و اثرگذاری بار سیکلی پرداخته شده و تاریخچه پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود. در فصل سوم به جمع‌آوری اطلاعات در مورد مصالح مورد استفاده، خصوصیات روکش‌های ستون سنگی، دستگاه آزمایش سه‌محوری و اجزای آن، نحوه آماده‌سازی نمونه و آزمایش‌های صورت گرفته پرداخته می‌شود. فصل چهارم به نتایج و داده‌های خروجی آزمایش‌ها، نمودارها و گراف‌های حاصل از آن اختصاص دارد و در فصل پنجم به ارائه نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده پرداخته می‌شود.

فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

۱-۲- مقدمه

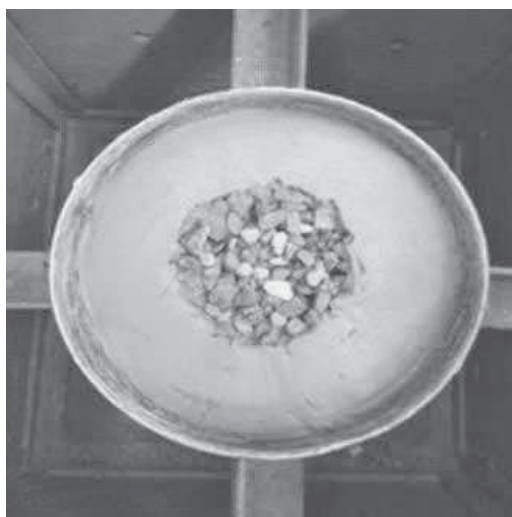
ظرفیت باربری و نشست دو معیار اصلی در مطالعه و طراحی فونداسیون سازه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. ساخت و سازه‌ها بر روی خاک‌های نرم باعث بوجود آمدن نشست‌های مخرب و عدم پایداری سازه می‌شود. بنابراین توسعه روش‌های بهسازی خاک‌های نرم و نامناسب مورد توجه مهندسان بوده است. ستون‌های سنگی به عنوان روشی مؤثر و دوستدار محیط زیست برای بهسازی خاک‌های نرم رسی، لای، ماسه لای‌دار و دیگر موارد بکار گرفته می‌شوند. نقش اصلی ستون‌های سنگی کمک به کاهش فشار آب حفره‌ای اضافه و کاهش سطح بار منتقل شده به خاک است. استفاده از ستون‌های سنگی از حدود سال ۱۹۶۰ میلادی در اروپا آغاز شد و امروزه نیز ادامه دارد بازسازی زمین‌های نامناسب جهت ساخت سازه‌های سبک و سنگین باعث شده که روش‌های با گسترش ساخت و ساز و افزایش سازه‌های بلند مرتبه، تحلیل پارامترهای مکانیکی و دینامیکی خاک بیش از پیش باید مورد توجه قرار گیرد. تغییرات نشست در اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی، تغییرات نسبت میرایی و مدول برشی خاک از جمله پارامترهایی هستند که از اهمیتی بالایی برخوردارند. در ادامه به بررسی مقالات و پژوهش‌های سالیان اخیر در مورد ستون سنگی و نحوه افزایش ظرفیت باربری آن با ژئوسنتتیک‌ها و آزمایش‌های سیکلی پرداخته می‌شود.

۲-۲- ستون سنگی

استفاده از ستون سنگی یکی از روش‌های اقتصادی و سازگار با محیط زیست در بهسازی انواع خاک است. ستون سنگی باعث افزایش پایداری شیروانی‌ها، ظرفیت باربری خاک زیر پی، مقاومت برشی در خاک‌های رسی و سیلتی و سرعت تحکیم و کاهش نشست‌پذیری خاک می‌گردد. در این روش حدود ۱۵ الی ۳۵ درصد خاک نامناسب با شن و یا سنگریزه تعویض می‌گردد [۳]. به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح ستون سنگی در هنگام زلزله موجب کاهش فشار آب منفذی می‌شود و همچنین به دلیل استفاده از ستون سنگی در خاک‌های سیلتی موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده و مقاومت خاک در برابر روانگرایی افزایش می‌یابد. از ستون سنگی در نواحی ساحلی برای کاهش روانگرایی استفاده می‌گردد. روانگرایی در ماسه شل و اشباع با لای غیر پلاستیک کمتر از ۱۵٪ و رس کمتر از ۲٪ رخ می‌دهد. همچنین ضریب نفوذپذیری ستون سنگی باید ۲۰۰ برابر بزرگ‌تر از نفوذپذیری خاک اطراف باشد تا در هنگام زلزله روانگرایی رخ ندهد [۴، ۵].

تحقیقات زیادی در خصوص ظرفیت باربری قائم ستون‌های سنگی در حالت آزمایشگاهی انجام شده است [۶-۹]. نتایج حاکی از آن است که مهمترین عامل در افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی نسبت ناحیه اصلاح شده، نوع خاک اطراف ستون سنگی، زاویه اصطکاک مصالح ستون سنگی و طول ستون‌های سنگی است.

کومار^۱ و سامانتا^۲ به بررسی تمرکز تنش در ستون سنگی پرداختند. مدلسازی فیزیکی ستون سنگی در خاک رس و یک لایه ماسه روی ستون سنگی و خاک رس داخل یک استوانه فلزی انجام شد (شکل ۱-۲). دو حسگر برای تعیین تنش وارد شده به خاک و ستون سنگی روی آنها قرار گرفته و سپس توسط جک هیدرولیکی بارگذاری اعمال گردید. پارامترهای تغییر یافته در این آزمایشات عبارتند از نسبت مساحت مصالح جایگزین شده، زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی، زاویه اصطکاک داخلی ماسه، ضخامت لایه ماسه و مقاومت زهکشی نشده خاک رس اطراف ستون. شکل ۲-۲ نشان می‌دهد با افزایش نسبت سطح جایگزینی مقدار نسبت تمرکز تنش افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند رابطه تغییرات نسبت تمرکز تنش (SCR^3) و تغییر بارگذاری بصورت غیرخطی است، بطوریکه با اعمال بار ابتدا نسبت تمرکز تنش افزایش یافته و سپس ثابت می‌شود و به حالت پایدار می‌رسد. آنها دریافتند با افزایش زاویه اصطکاک داخلی ماسه و سنگدانه‌ها نسبت تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد

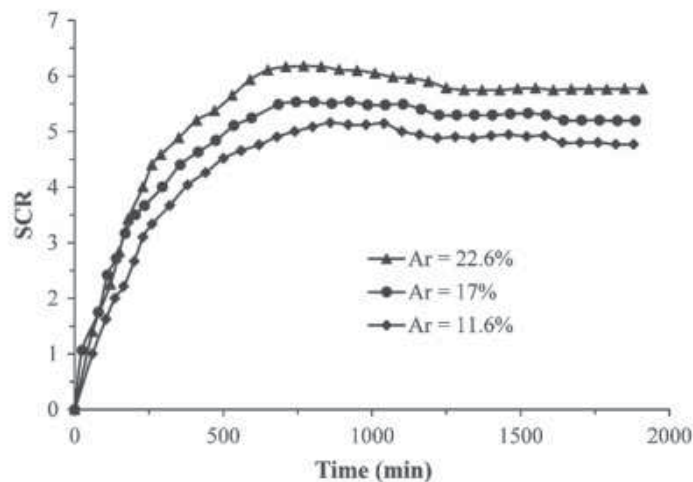


شکل ۱-۲ مدلسازی ستون سنگی در خاک رس [۱۰]

^۱ Kumar

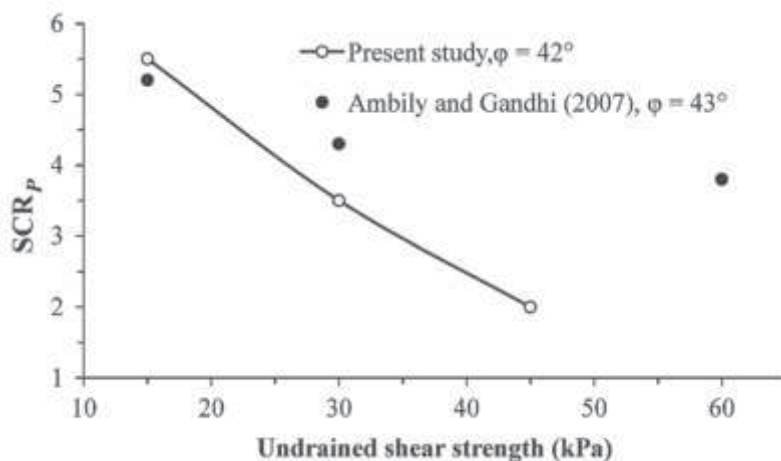
^۲ Samanta

^۳ Stress concentration ratio



شکل ۲-۲ تغییرات نسبت تمرکز تنش به تغییرات نسبت جایگزینی مصالح [۱۰]

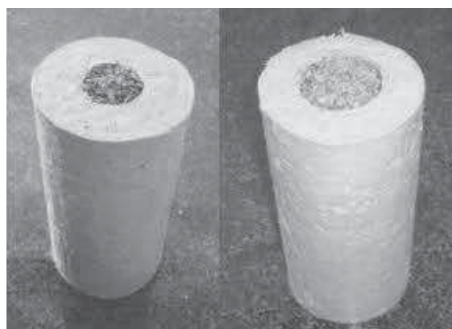
. مقاومت زهکشی نشده خاک اطراف نقش مهمی در تغییرات نسبت تنش ایفا می کند. همانطور که در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است، افزایش مقاومت زهکشی نشده خاک اطراف باعث کاهش نسبت تمرکز تنش می شود. این کاهش به دلیل افزایش سختی خاک و تحمل نیروی بیشتر از سمت خاک است [۱۰].



شکل ۲-۳ تغییرات نسبت تمرکز تنش با مقاومت زهکشی نشده خاک رس اطراف ستون سنگی [۱۰]

نظری افشار و همکاران به بررسی مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی معادل خاک بهسازی شده با ستون سنگی بر اساس روابط تحلیلی محاسبه و صحت روابط از طریق انجام آزمایش های آزمایشگاهی در دستگاه سه محوری پرداختند. در این تحقیق از دستگاه سه محوری با قابلیت ساخت نمونه با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع

۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. قطر ستون‌های سنگی موردبررسی برابر با ۳۷/۵ و ۵۱ میلی‌متر و آزمایش‌های انجام‌شده در حالت تحکیم نیافته-زهکشی نشده در ۳ فشار دورگیر ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام داده شدند.

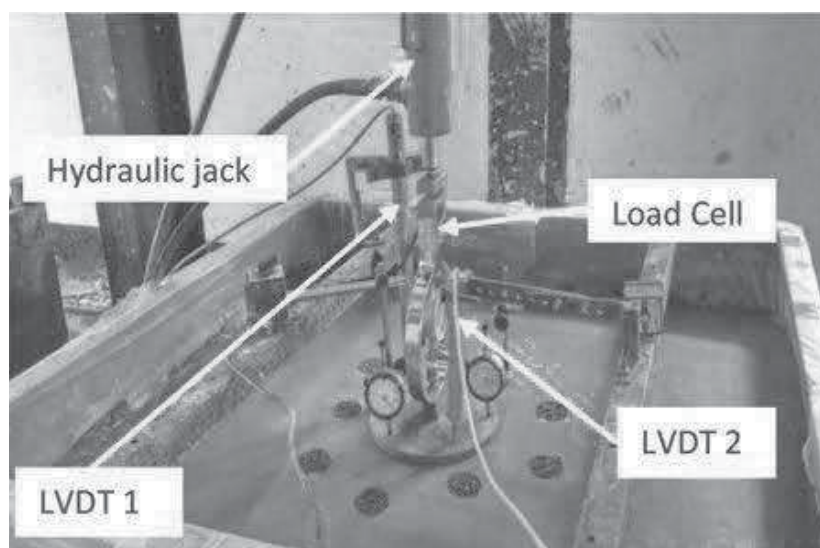


شکل ۲-۴ نمونه ساخته‌شده جهت انجام آزمایش [۱۱]

آنها دریافتند که با افزایش نسبت ناحیه اصلاح شده افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده و سختی نمونه در تمام آزمایش‌ها دیده می‌شود. در نمونه‌های آزمایش‌شده، خاک نرم با مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکال با استفاده از ستون دانه‌ای با قطر ۳۷/۵ میلی‌متر در فشارهای دورگیر ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نسبت تنش انحرافی نهایی خاک با ستون سنگی نسبت به خاک بهسازی نشده به ترتیب برابر ۱/۹ و ۲/۲ و ۲/۶ است. همچنین این نسبت در حالتی که قطر ستون دانه‌ای ۵۱ میلی‌متر باشد به ترتیب برابر ۲/۷ و ۳/۲ و ۶/۳ بدست آمد. در نمونه‌های آزمایش‌شده، خاک نرم با مقاومت برشی زهکشی نشده ۳۰ کیلوپاسکال با استفاده از ستون سنگی با قطر ۳۷/۵ میلی‌متر در تنش‌های جانبی ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نسبت تنش انحرافی نهایی خاک با ستون سنگی نسبت به خاک بهسازی نشده به ترتیب برابر ۱/۴ و ۲/۰ و ۲/۸ است. با افزایش فشار دورگیر، به طور کلی درصد افزایش مقاومت زهکشی نشده روند افزایشی دارد لیکن شیب تغییر درصد افزایش مقاومت زهکشی نشده در خاک با مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکال ملایمتر از خاک با مقاومت برشی زهکشی نشده ۳۰ کیلوپاسکال است و این شیب برای زمانی که فشار دورگیر کمتر از ۲۰۰ کیلوپاسکال است ملایمتر نیز می‌شود [۱۱].

دبناث و اکدی به بررسی عددی و آزمایشگاهی ظرفیت خمشی ستون سنگی روکش‌دار در خاک ماسه‌ای به صورت شناور در بستر رس پرداختند. این آزمایش‌ها در یک باکس مکعبی به ابعاد ۱ متر انجام گرفته است. مطابق تعداد ۱۲ ستون سنگی روکش شده با ژئوتکستایل به قطر ۵ سانتی‌متر با آرایش مثلی به فاصله محوری ۱۲/۵ سانتی‌متر

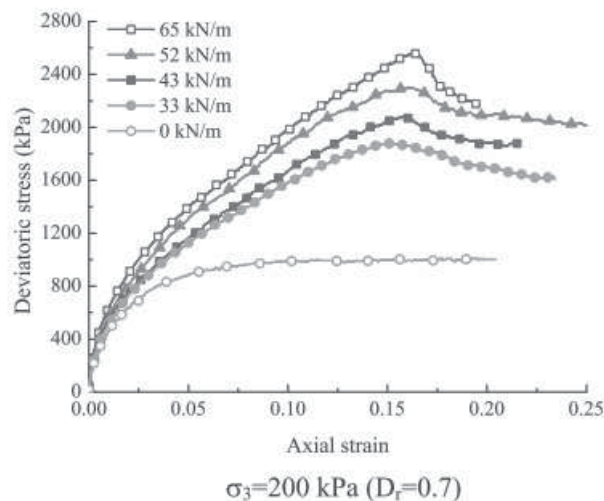
در کنار هم تحت بار قرار گرفتند. همچنین قطر صفحه بارگذاری برابر با ۲۰ سانتی‌متر در شکل ۲-۵ مشخص است.



شکل ۲-۵ مدل فیزیکی دپنات. کنتی برای ستون سنگی جهت انجام آزمایش [۲۸] زز

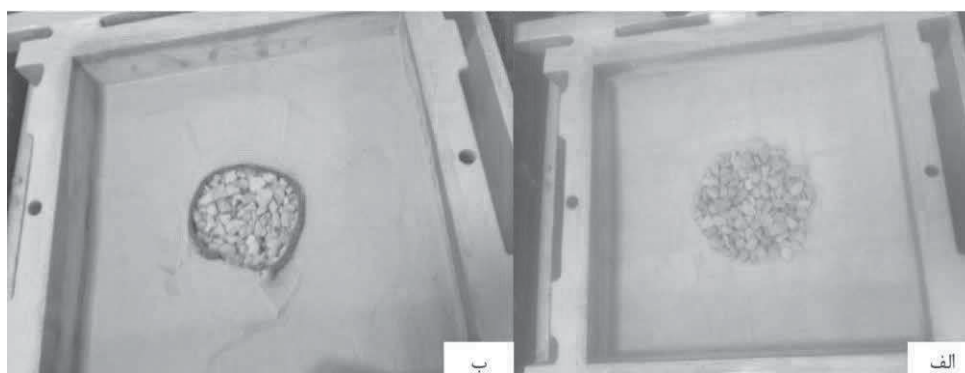
مشاهدات نشان می‌دهند استفاده از ستون سنگی معمولی تا $1/72$ برابر و استفاده از ستون سنگی روکش‌دار تا $2/68$ برابر ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند. همچنین دریافتند که عمق مطلوب برای مساحت محدوده ستون سنگی برابر با ۳ برابر قطر ستون است [۱۲].

ژو^۴ و همکاران با بررسی ستون سنگی با طراحی ستون سنگی در سه محوری با ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر در ۶۰۰ میلی‌متر به بررسی اثر انواع دورگیر در فشار همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال پرداختند در شکل ۲-۶ نمونه‌ای از منحنی تنش کرنش آزمایش برای ژئوتکستایل‌ها با کشش حداکثر متفاوت مشاهده می‌شود [۱۳].



شکل ۲-۶ نمودار آزمایش سه محوری ستون سنگی در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال [۱۳]

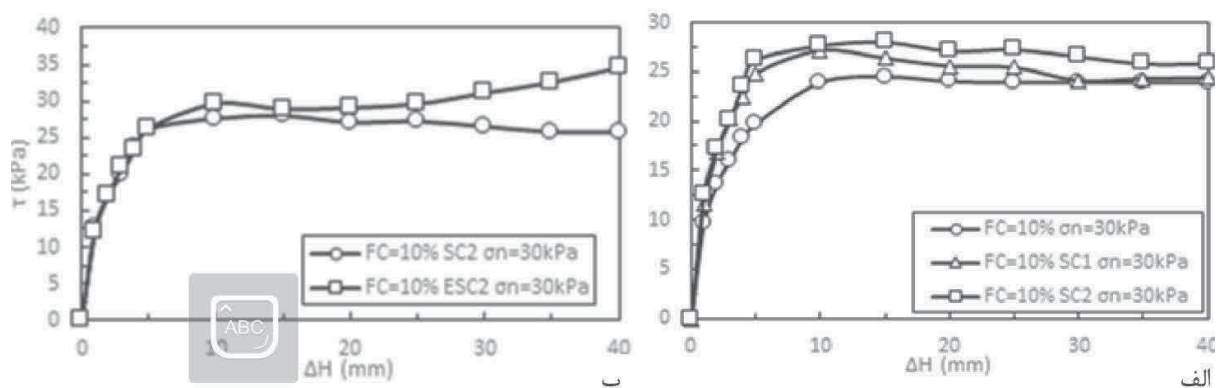
اردکانی و دیناروند به بررسی ستون سنگی محصورشده با ژئوسنتتیک‌ها در خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار پرداختند برای مدل‌سازی از ستون تک و گروه ستون پرداختند خاک ماسه‌ای سست با درصد ریزدانه لای تا ۳۰ درصد که با ستون دانه‌ای به‌سازی در تنش نرمال ۱۰ کیلو پاسکال تا ۸۰ درصد و در تنش نرمال ۳۰ کیلو پاسکال تا ۳۵ درصد، به ترتیب مقاومت پسماند و پیک افزایش می‌یابد. افزایش نسبت سطح مقطع ستون به سطح مقطع کل نمونه (A_{rr}) افزایش مقاومت برشی را به همراه داشت. با محصور کردن ستون دانه‌ای به وسیله الیاف ژئوتکستایل (ESC) مقاومت نهایی مجموعه بین ۱۵٪ تا ۴۰٪ نسبت به ستون دانه‌ای محصور نشده افزایش پیدا کرد در شکل ۲-۷ نحوه نمونه‌سازی ستون منفرد در دستگاه برش نمایش داده شده است.



شکل ۲-۷ نمونه ستون سنگی در دستگاه برش بزرگ مقیاس الف: محصور نشده ب: محصورشده [۱۴].

با افزایش بعد دانه‌های ستون منفرد محصورشده در تنش نرمال ۶۰ کیلو پاسکال، مقاومت برشی نرمالیزه شده تا ۳۶٪ نسبت به ستون منفرد محصور نشده افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از این است که با افزایش ریزدانه

خاک، راندمان تأثیر حضور ستون دانه‌ای در افزایش مقاومت برشی کمتر می‌شود. در شکل ۲-۸ تنش برشی جابجایی نمونه‌ها در خاک فاقد ریزدانه با مسلح کننده و بدون آن نمایش داده شده است.



شکل ۲-۸ نمودار تنش برشی جابجایی ستون سنگی در خاک ماسه‌ای الف: ستون بدون دورگیر ب: ستون دورگیردار

دانه‌بندی ستون سنگی نشان داد که با بزرگ‌تر شدن دانه‌های ستون، مقاومت افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در خاک‌های با ریزدانه کم در حالت محصورشده، بیشتر است [۱۴].

در کنار محاسن قابل‌توجه استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای محصور کردن ستون‌های سنگی این روش بهسازی دارای معایب قابل‌توجهی نیز است که استفاده از آن را محدود می‌کند. عدم امکان ایجاد تراکم در این ستون‌ها به علت از هم باز شدن ژئوسنتتیک‌ها در نقطه اتصال باعث می‌شود که نشست‌های نسبتاً زیادی در خاک ایجاد شود. از دیگر معایب اساسی این روش افزایش محدود در ظرفیت باربری ستون سنگی است به طور مثال مطالعات که به مقایسه رفتار ستون سنگی محصورشده و ستون سنگی معمولی می‌پردازد نشان می‌دهد که ستون سنگی مسلح با نسبت طول به قطر ۵ معادل ۱/۱۶ برابر ستون سنگی بدون مسلح کننده از خود مقاومت نشان می‌دهد. همچنین مطالعات ملارویزی^۵ و ایلامپاروتی^۶ نیز گزارش می‌دهد که با استفاده از مقاوم‌ترین نوع ژئوسنتتیک افزایش در ظرفیت باربری برای نسبت طول به قطرهای ۱۰، ۷/۵ و ۵ نسبت به ستون معمولی به ترتیب ۲، ۱/۷ و ۱/۴ بوده است [۱۵]. در میان روش‌های متعدد ارتقاء ظرفیت باربری ستون‌های سنگی مانند ایجاد تسلیح به صورت لایه‌های افقی میله‌های مسلح کننده عمودی، ریختن گروت به جای سنگ‌دانه پوشاندن ستون سنگی و ... محصور کردن ستون سنگی با ژئوسنتتیک‌ها روش ایده‌آل است که فواید دیگری را نیز دارا است که عبارت‌اند از: ایجاد محصورکنندگی بیشتر تبدیل ستون سنگی به یک المان نیمه صلب که قادر است بار را به

5 Malarvizhi

6 Ilamparuthi