

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پایان نامه کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی عمران - ژئوتکنیک
بررسی اثر اپوکسی رزین بر مصالح ستون سنگی

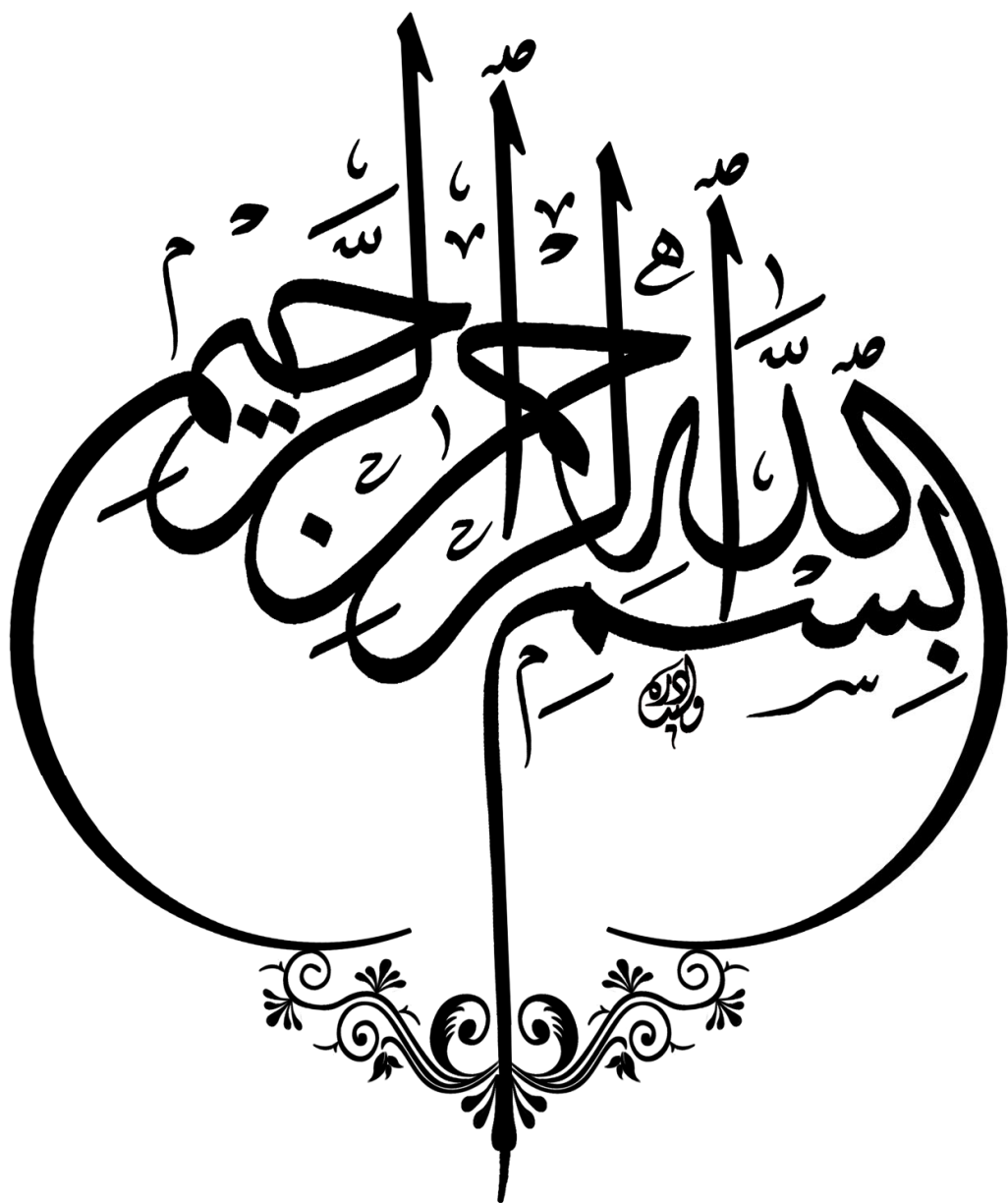
استاد راهنما:

جناب دکتر حسن قاسم زاده

نگارش:

علی بهادری

بهمن ۱۴۰۰



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

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

زیستن را به من آموخته اند.



تأسیس ۱۴۰۷
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 اثر اپوکسی رزین بر مصالح ستون سنگی توسط آقای علی بهادری 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 بارانی امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آقای دکتر بارانی امضاء

دانشکده عمران

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

اظهارنامه دانشجو

اینجانب علی بهادری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان نامه با عنوان بررسی اثر اپوکسی رزین بر مصالح ستون سنگی با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تأیید است و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است، به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه 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 پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی‌برداری

به‌صورت 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 دورهٔ تحصیل و پایان‌نامه بودند.

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

آقایان احمدی، کاغذ کنانی، جعفرزاده و شکاری 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

ستون‌های سنگی یکی از روش‌های اصلاح و تقویت خاک است و به دلیل مزیت‌های فنی و اقتصادی در طی چند دهه اخیر رایج‌تر از سایر روش‌ها شده‌اند. از این روش در خاک‌های ماسه‌ای برای افزایش دانسیته خاک اطراف ستون و کاهش پتانسیل روانگرایی استفاده می‌شود. همچنین اپوکسی رزین‌ها مقاومت خوبی نسبت به محیط‌های اسیدی دارند و نسبت به شمع‌های فلزی و بتنی در محیط‌های مرطوب ساحلی از مقاومت مطلوب‌تری برخوردارند. در این پژوهش ستون سنگی در دستگاه سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی مدل‌سازی شده است. جهت ارتقای ظرفیت باربری مدل‌سازی ستون‌های سنگی در خاک‌های ماسه‌ای با تراکم نسبی ۶۰ و ۹۰ درصد انجام شده است. همچنین به بررسی اثر اپوکسی رزین بر روی سنگ‌دانه ستون سنگی پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر دانه‌بندی از مخلوط درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۴) به همراه اثر اضافه‌شدن ماسه D11 در درصدهای متفاوت اپوکسی (۱، ۳ و ۵) استفاده شده است و آزمایش‌های تک‌محوری، نفوذپذیری، برزیلی و مدل‌سازی ستون سنگی در خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دستگاه سه محوری بزرگ‌مقیاس در آزمایش استاتیکی و دینامیکی استفاده شده است. در تست‌های تک‌محوری مشاهده شد که با افزایش درصد اپوکسی از ۱ درصد به ۵ درصد مقدار قابل‌توجهی مقاومت فشاری محصور نشده افزایش یافته است و با اضافه‌کردن ماسه شاهد افزایش مقاومت تا حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه مشابه رخ داد اما با اضافه‌کردن ماسه بیش از ۲۰ درصد، کاهش مقاومت مشاهده شد. نتایج نشان داد تغییر دانه‌بندی مهم‌ترین تأثیر را بر نفوذپذیری دارد اضافه‌کردن اپوکسی رزین موجب کاهش نفوذپذیری سنگ‌دانه‌ها نگردید و در تست‌های سه محوری استاتیکی نیز به مقایسه ستون‌های به همراه ماسه و بدون ماسه در درصد اپوکسی ثابت پرداخته شد که نسبت افزایش ۲ تا ۲/۵ برابری ظرفیت باربری و کاهش نشست اتفاق افتاد. در آزمایش سه محوری دینامیکی نیز به بررسی ستون اپوکسی (55D0E3) و مقایسه نشست، مدول برشی و نسبت میرایی پرداخته شد. مدول برشی به طور متوسط $2\% \pm 58\%$ افزایش پیدا می‌کند و نسبت میرایی خاک مسلح شده با ستون اپوکسی رزین افزایش نامحسوسی پیدا می‌کند. نشست‌های نمونه در آزمایش دینامیکی ماسه به‌صورت تجمعی است اما در نمونه‌های ستون اپوکسی رزین این مقادیر بسیار ناچیز و حالت ارتجاعی دارند.

واژه‌های کلیدی: اپوکسی، رزین، ستون سنگی، آزمایش سه محوری، خاک، تک‌محوری، برزیلی

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه و کلیات.....	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهمیت موضوع	۲
۳-۱- اهداف تحقیق	۲
۴-۱- سؤالات تحقیق	۳
۵-۱- ساختار پایان نامه	۳
فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده	۵
۱-۲- مقدمه	۵
۲-۲- معرفی کمیت‌ها مهم در ادبیات موضوع	۶
۱-۲-۲- ابعاد هندسی	۶
۱-۲-۲-۱- قطر مؤثر (De)	۶
۲-۲-۲-۱- چیدمان	۶
۳-۲-۲-۱- فاصله (S)	۷
۴-۲-۲-۱- نسبت بهسازی شده (As)	۷
۵-۲-۲-۱- طول بحرانی (Le)	۸
۳-۲- مصالح ستون سنگی	۸
۴-۲- مکانیسم‌های گسیختگی ستون سنگی	۹
۵-۲- تحلیل رفتار ستون‌های سنگی	۱۰
۵-۲-۱- ظرفیت باربری ستون سنگی	۱۰
۶-۲- انواع روش‌های بهبود عملکرد ستون‌های سنگی	۱۳
۶-۲-۱- بررسی استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در ستون‌های سنگی	۱۴
۶-۲-۲- جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی	۱۷
۶-۲-۳- استفاده از مواد افزودنی جهت تقویت ستون‌های سنگی	۱۹
۷-۲- مروری بر پلیمرهای نوین در ژئوتکنیک	۲۲
۸-۲- رزین اپوکسی	۲۳
۸-۲-۱- تاریخچه اپوکسی	۲۳
۸-۲-۲- طبقه‌بندی رزین اپوکسی بر اساس ساختار شیمیایی	۲۴

۲۴	۲-۸-۱- رزین اپوکسی بیس فنول A (دی گلیسیدیل اتر بیس فنول A).....
۲۵	۲-۸-۳- مروری بر استفاده از رزین اپوکسی در ژئوتکنیک.....
۲۸	۲-۹- جمع بندی.....
۳۰	فصل ۳ مشخصات مصالح مصرفی و برنامه کار آزمایشگاهی.....
۳۰	۳-۱- مقدمه.....
۳۰	۳-۲- معرفی اپوکسی رزین مورد استفاده.....
۳۱	۳-۳- انتخاب مصالح سنگی.....
۳۲	۳-۴- دانه بندی مصالح.....
۳۷	۳-۵- تعیین ضریب نفوذپذیری خاک:.....
۳۷	۳-۵-۱- دستور کار آزمایش اندازه گیری نفوذپذیری اشباع به روش بار افتان:.....
۳۹	۳-۵-۲- برنامه آزمایش های نفوذپذیری.....
۴۰	۳-۶- تست تک محوری.....
۴۰	۳-۶-۱- مراحل ساخت نمونه ها.....
۴۱	۳-۶-۲- برنامه تست های تک محوری.....
۴۳	۳-۷- آزمایش مقاومت کششی.....
۴۴	۳-۷-۱- برنامه آزمایش مقاومت کششی.....
۴۴	۳-۸- تست سه محوری بزرگ مقیاس.....
۴۴	۳-۸-۱- دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس.....
۴۶	۳-۸-۲- اجزای دستگاه سه محوری سیکلی.....
۵۵	۳-۸-۳- آزمایش های سه محوری بزرگ مقیاس.....
۵۵	۳-۸-۳-۱- نحوه ساخت و آماده سازی نمونه ستون سنگی در خاک ماسه ای.....
۵۷	۳-۸-۳-۲- نحوه ساخت نمونه ها.....
۶۰	۳-۸-۴- تعیین آزمایش های استاتیکی.....
۶۲	۳-۸-۵- آزمایش های سه محوری دینامیکی.....
۶۳	۳-۹- جمع بندی.....
۶۵	فصل ۴ بررسی و تفسیر نتایج.....
۶۵	۴-۱- مقدمه.....
۶۵	۴-۲- بررسی نتایج آزمایش های تک محوری.....
۶۵	۴-۲-۱- نحوه گسیختگی نمونه ها.....

۶۶.....	۴-۲-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت تک محوری
۶۷.....	۴-۲-۳- نمودارهای تنش کرنش برای درصدهای مختلف اپوکسی رزین
۶۸.....	۴-۲-۴- مقایسه نمودارهای تنش کرنش برای درصدهای مختلف ماسه
۷۱.....	۴-۲-۵- تنش و کرنش حداکثر در تست تک‌محوری محصور نشده
۷۲.....	۴-۲-۶- مدول الاستیسیته سری تست‌های 55DE
۷۳.....	۴-۳- نتایج تست کشش برزیلی
۷۶.....	۴-۴- جمع‌بندی رفتار مصالح با اپوکسی در کشش و فشار
۷۷.....	۴-۵- نتایج تست نفوذپذیری
۷۸.....	۴-۶- نتایج تست سه محوری استاتیکی
۷۸.....	۴-۶-۱- نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد
۸۰.....	۴-۶-۲- آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۹۰ درصد
۸۱.....	۴-۶-۳- آزمایش ستون سنگی بدون اپوکسی در خاک با تراکم ۶۰ درصد
۸۳.....	۴-۶-۴- آزمایش ستون سنگی بدون اپوکسی در خاک با تراکم ۹۰ درصد
۸۴.....	۴-۶-۵- آزمایش ستون سنگی 55D0E3 در خاک با تراکم ۶۰ درصد
۸۶.....	۴-۶-۶- آزمایش ستون سنگی 55D0E3 در خاک با تراکم ۹۰ درصد
۸۷.....	۴-۶-۷- آزمایش ستون سنگی 55D20E3 در خاک با تراکم ۶۰ درصد
۸۸.....	۴-۶-۸- نتایج آزمایش ستون سنگی 55D20E3 در خاک با تراکم ۹۰ درصد
۸۹.....	۴-۶-۹- نتایج آزمایش سه محوری استاتیکی (آماده سازی بارش)
۸۹.....	۴-۶-۹-۱- نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۵۷ درصد (بارش)
۹۰.....	۴-۶-۹-۲- آزمایش ستون سنگی 55D0E3P در خاک با تراکم ۴۵ درصد
۹۱.....	۴-۶-۹-۳- تغییر شکل نمونه پس از آزمایش استاتیکی
۹۳.....	۴-۶-۱۰- نتایج تست سه‌محوری بزرگ مقیاس
۹۳.....	۴-۶-۱۰-۱- تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم در تراکم ۶۰٪
۹۴.....	۴-۶-۱۰-۲- بررسی تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم در تراکم ۹۰٪
۹۴.....	۴-۶-۱۰-۳- مقایسه میان تنش انحرافی در فشار همه‌جانبه ثابت
۹۵.....	۴-۶-۱۰-۴- نحوه تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی در تست‌های سه محوری استاتیکی
۹۶.....	۴-۶-۱۰-۵- بررسی تنش در درصد ثابت کرنش
۹۷.....	۴-۶-۷- نتایج تست سه محوری دینامیکی
۹۸.....	۴-۷-۱- نتایج نحوه بارگذاری و صحت سنجی بلدر
۱۰۰.....	۴-۷-۲- مقایسه آزمایش ماسه و ستون سنگی در فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز

۱۰۴.....	۳-۷-۴- مقایسه آزمایش ماسه و ستون سنگی در فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز
۱۰۷.....	۴-۷-۴- مقایسه آزمایش ماسه و ستون سنگی در فرکانس ثابت ۰/۵ هرتز
۱۱۱.....	۵-۷-۴- اثر افزایش فرکانس بر لوپ هیستریزیس در آزمایش‌های مختلف با فرکانس ثابت
۱۱۲.....	۶-۷-۴- بررسی اثر تغییر فرکانس بر نشست خاک و ستون اپوکسی در آزمایش فرکانس ثابت
۱۱۳.....	۷-۷-۴- بررسی اثر تغییر فرکانس بر روی نسبت میرایی و مدول برشی ماسه فیروزکوه ۱۶۱
۱۱۴.....	۸-۷-۴- بررسی اثر تغییر فرکانس بر روی نسبت میرایی و مدول برشی ستون اپوکسی
۱۱۵.....	۹-۷-۴- آزمایش ستون اپوکسی تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری
۱۱۷.....	۱۰-۷-۴- آزمایش ماسه و ستون سنگی در فرکانس متغیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ هرتز ($\Delta\sigma_d=15\text{kPa}$)
۱۱۸.....	۱۱-۷-۴- آزمایش ماسه و ستون سنگی در فرکانس متغیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ هرتز ($\Delta\sigma_d=20\text{kPa}$)
۱۱۹.....	۱۲-۷-۴- بررسی تأثیر تنش انحرافی سربار در تست‌های فرکانس متغیر ماسه
۱۲۱.....	۱۳-۷-۴- بررسی تأثیر تنش انحرافی سربار در تست‌های فرکانس متغیر ستون اپوکسی
۱۲۲.....	۸-۴- جمع‌بندی
۱۲۵.....	فصل ۵ جمع‌بندی و پیشنهادها
۱۲۵.....	۱-۵- مقدمه
۱۲۵.....	۲-۵- جمع‌بندی
۱۲۶.....	۳-۵- پیشنهادها
۱۲۷.....	منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲	تناسب مصالح برحسب عدد بروان	۹
جدول ۲-۲	جمع بندی مقالات خاک تقویت شده با رزین اپوکسی	۲۷
جدول ۱-۳	مشخصات مکانیکی اپوکسی رزین E8127-C [۳۸]	۳۰
جدول ۲-۳	مشخصات شیمیایی اپوکسی رزین E8127-C [۳۸]	۳۱
جدول ۳-۳	مشخصات حاصل از آزمایش‌های اولیه ماسه‌های فیروزکوه	۳۳
جدول ۴-۳	نام‌گذاری گروه‌های سنگ‌دانه‌ها	۳۴
جدول ۵-۳	برنامه آزمایش‌های نفوذپذیری	۴۰
جدول ۶-۳	برنامه تست تک‌محوری	۴۲
جدول ۷-۳	برنامه تست مقاومت کششی	۴۴
جدول ۸-۳	نتایج و مشخصات آزمایش نمونه‌های بارش	۵۹
جدول ۹-۳	برنامه آزمایش‌های سه محوری استاتیکی	۶۱
جدول ۱۰-۳	برنامه تست سه محوری دینامیکی فرکانس ثابت	۶۲
جدول ۱۱-۳	برنامه تست سه محوری دینامیکی فرکانس متغیر	۶۳
جدول ۱-۴	میزان بهبود مقاومت فشاری بر اثر زمان عمل‌آوری	۶۷
جدول ۲-۴	نتایج تست تک‌محوری	۷۱
جدول ۳-۴	نتایج تست کشش نمونه	۷۵
جدول ۴-۴	درصد تغییرات نفوذپذیری با افزایش ماسه (درصد اپوکسی ثابت)	۷۸
جدول ۵-۴	خلاصه نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ($Dr=60\%$)	۸۰
جدول ۶-۴	خلاصه نتایج آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ($Dr=90\%$)	۸۱
جدول ۷-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=60\%$)	۸۳
جدول ۸-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=90\%$)	۸۴
جدول ۹-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی 55D0E3,Dr60	۸۵
جدول ۱۰-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی 55D0E3,Dr90	۸۶
جدول ۱۱-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی 55D20E3,Dr60	۸۷
جدول ۱۲-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی 55D20E3,Dr90	۸۹
جدول ۱۳-۴	خلاصه نتایج آزمایش استاتیکی ماسه ۱۶۱ تراکم نسبی ۵۷٪ (بارش)	۹۰
جدول ۱۴-۴	خلاصه نتایج آزمایش ستون سنگی 55D0E3P,Dr45	۹۱
جدول ۱۵-۴	مقایسه تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی در تست سه محوری	۹۶
جدول ۱۶-۴	مقایسه تنش‌ها در درصد ثابت کرنش و تنش‌های نهایی در $\sigma_3=50,75,100$ kPa	۹۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- تعیین مقدار کاهش نشست پذیری خاک زیر پی با استفاده از ستون سنگی [۳] ۵
- شکل ۲-۲ قطر مؤثر انواع چیدمان ستون سنگی [۵] ۷
- شکل ۳-۲ طول بحرانی ستون سنگی در خاک همگن [۷] ۸
- شکل ۴-۲ انواع گسیختگی الف-گسیختگی برش پانچ ب- گسیختگی برش کلی ج-گسیختگی انبساط جانبی [۸] ۱۰
- شکل ۵-۲ مکانیسم فرضی گسیختگی گروه ستون [۱۱] ۱۱
- شکل ۶-۲ نمودار آزمایش سه محوری ستون سنگی در فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال [۱۶] ۱۵
- شکل ۷-۲ نمونه ستون سنگی در دستگاه برش بزرگ مقیاس الف: محصور نشده ب: محصور شده [۱۷] ۱۵
- شکل ۸-۲ نمودار تنش برشی جابجایی ستون سنگی ماسه الف: ستون بدون دور گیر ب: ستون دور گیردار [۱۷] ۱۶
- شکل ۹-۲ نمودار تنش برشی جابجایی نمونه با خرده لاستیک سایز متوسط [۱۹] ۱۷
- شکل ۱۰-۲ نمودار بار- نشست الف: سنگدانه طبیعی ب: بتن بازیافتی [۲۰] ۱۸
- شکل ۱۱-۲ تغییرات تنش باربری در نشست های پی برای ستون سنگی شناور ساخته شده با یک نوع مصالح [۲۱] ۱۸
- شکل ۱۲-۲ تمرکز تنش برابر مقاومت زهکشی نشده الف: نمونه ۱۰ درصد سیمانی ب: نمونه ۳۰ درصد ماسه [۲۲] ۲۰
- شکل ۱۳-۲ نتایج ستون سنگی با ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد بنتونیت در مدل آزمایشگاهی [۲۳] ۲۰
- شکل ۱۴-۲ نمودار بار - نشست ستون شفته آهکی الف: نمونه با تکیه گاه انتهایی ب: نمونه ستون شناور [۲۴] ۲۱
- شکل ۱۵-۲ ساختار شیمیایی انواع اپوکسی رزین ها الف: زنجیره پلیمری ب: ساختار پایه [۲۹] ۲۳
- شکل ۱۶-۲ مکانیسم واکنش عامل پخت آمینی DETA با رزین اپوکسی [۲۹] ۲۵
- شکل ۱-۳ اپوکسی رزین و هاردنر شرکت اپوکسی ایران ۳۱
- شکل ۲-۳ منحنی دانه بندی ماسه های فیروزکوه ۳۳
- شکل ۳-۳ نمودار دانه بندی سنگدانه های فاقد ماسه ۳۵
- شکل ۴-۳ گروه اول: منحنی دانه بندی در نسبت سنگدانه ثابت (No3/8=55%, No4=45%) ۳۵
- شکل ۵-۳ گروه دوم: منحنی دانه بندی در نسبت سنگدانه ثابت (No3/8=65%, No4=35%) ۳۶
- شکل ۶-۳ گروه سوم: منحنی دانه بندی در نسبت سنگدانه ثابت (No3/8=75%, No4=25%) ۳۶
- شکل ۷-۳ شماتیک دستگاه بار افتان [۴۳] ۳۸
- شکل ۸-۳ قالب تست نفوذپذیری ۳۸
- شکل ۹-۳ نمونه های تست نفوذپذیری به ترتیب از سمت راست 55D20E3، 55D20E3 و 55D10E3 ۳۹
- شکل ۱۰-۳ رنگ و نحوه ترکیب اپوکسی و هاردنر ۴۱
- شکل ۱۱-۳ نمونه های آماده شده جهت تست ۴۱

- شکل ۳-۱۲ نحوه انجام تست برزیلی نمونه 55D0E3 ۴۳
- شکل ۳-۱۳ شمای کلی قسمتی از دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی بزرگمقیاس آزمایشگاه دینامیک خاک ۴۶
- شکل ۳-۱۴ قاب بارگذاری دستگاه سه محوری سیکلی ۴۶
- شکل ۳-۱۵ سامانه بارگذاری الف: جک هیدرولیکی ۱۰ تن ۰ ب: پاورپک هیدرولیکی ۴۷
- شکل ۳-۱۶ الف: حسگر LVDT ب: گپ سنسور ب: نحوه استقرار سنسور ج: گیج مکانیکی کالیبراسیون ۴۸
- شکل ۳-۱۷ لودسل ۴۹
- شکل ۳-۱۸ سلول و قالب دستگاه سه محوری الف: سلول سه محوری ب: برای خاک ماسه ج: برای خاک رس ۵۰
- شکل ۳-۱۹ قسمت بالا و پایین دستگاه الف: مجموعه کلاهک بالایی ب: صفحه متحرک و شیرهای نمونه ۵۱
- شکل ۳-۲۰ سامانه تنظیم فشار الف: محفظه اعمال فشار ب: حسگر اندازه‌گیری فشار ۵۲
- شکل ۳-۲۱ کپسول گاز CO₂ ۵۲
- شکل ۳-۲۲ سامانه ثبت و اعمال داده الف: دستگاه جمع‌آوری داده‌ها ب: رایانه متصل به دستگاه گیرنده ۵۳
- شکل ۳-۲۳ بالابر برقی به ظرفیت ۱ تن ۵۴
- شکل ۳-۲۴ دستگاه های جانبی الف پمپ مکش ب: کمپرسور باد ۵۴
- شکل ۳-۲۵ نمونه ستون سنگی آماده تست ۵۵
- شکل ۳-۲۶ نحوه قالب‌بندی و قرار گرفتن نمونه ۵۶
- شکل ۳-۲۷ تغییر شکل کلی خاک و ستون بدون اپوکسی 55D0E0 پس از پایان تست سه محوری استاتیکی ۵۶
- شکل ۴-۱ نحوه شکست نمونه با ۱ درصد اپوکسی (55D0E1) الف: قبل از آزمایش ب: پس از شکست ۶۵
- شکل ۴-۲ نمونه 55D20E3 الف: قبل از آزمایش ب: نحوه شکست در آزمایش ج: نمایش زاویه شکست ۶۶
- شکل ۴-۳ نمودار مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۱۴ روزه نمونه‌های سری 55D0 ۶۶
- شکل ۴-۴ نمودارهای تنش کرنش آزمایش‌های تک‌محوری ۶۸
- شکل ۴-۵ نمودار تنش کرنش نمونه‌های 55DE1 در اپوکسی ۱٪ ۶۹
- شکل ۴-۶ نمودار تنش کرنش نمونه‌های 55DE3 در اپوکسی ۳٪ ۶۹
- شکل ۴-۷ نمودار تنش کرنش نمونه‌های 55DE5 در اپوکسی ۵٪ ۷۰
- شکل ۴-۸ مقایسه مدول الاستیسیته در درصد ثابت اپوکسی ۷۲
- شکل ۴-۹ مقایسه مدول الاستیسیته تک‌محوری در درصد ثابت ماسه ۷۳
- شکل ۴-۱۰ نمونه فاقد ماسه (55D0E5) الف: قبل از آزمایش ب: بعد از شکست ۷۴
- نمونه شامل ۲۰ درصد ماسه (55D20E5) ج: قبل از آزمایش د: بعد از شکست ۷۴
- شکل ۴-۱۱ نمودار تست کشش برزیلی نمونه‌های بدون ماسه و با ماسه در درصدهای متفاوت اپوکسی ۷۴
- شکل ۴-۱۲ نمودار تنش کرنش در فشار و کشش ۷۶
- شکل ۴-۱۳ نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ماسه 55D0E ۷۷

شکل ۴-۱۴	مقایسه نفوذپذیری در نمونه‌های با ۲۰ درصد ماسه 55D20	۷۷
شکل ۴-۱۵	نمودار مقایسه نفوذپذیری در درصد ثابت اپوکسی و افزایش میزان ماسه	۷۸
شکل ۴-۱۶	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰٪	۷۹
شکل ۴-۱۷	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب با تراکم نسبی ۶۰٪	۷۹
شکل ۴-۱۸	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۹۰٪	۸۰
شکل ۴-۱۹	نمودار دواير و پوش گسيختگی موهر-کولمب با تراکم نسبی ۹۰٪	۸۱
شکل ۴-۲۰	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=60\%$)	۸۲
شکل ۴-۲۱	دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=60\%$)	۸۲
شکل ۴-۲۲	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=60\%$)	۸۳
شکل ۴-۲۳	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی بدون اپوکسی ($Dr=90\%$)	۸۴
شکل ۴-۲۴	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی 55D0E3,Dr60	۸۵
شکل ۴-۲۵	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی 55D0E3,Dr60	۸۵
شکل ۴-۲۶	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی 55D0E3,Dr90	۸۶
شکل ۴-۲۷	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی 55D0E3,Dr90	۸۶
شکل ۴-۲۸	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی 55D20E3,Dr60	۸۷
شکل ۴-۲۹	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی 55D20E3,Dr60	۸۷
شکل ۴-۳۰	نمودار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ستون سنگی 55D20E3,Dr90	۸۸
شکل ۴-۳۱	نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی موهر-کولمب ستون سنگی 55D20E3,Dr90	۸۸
شکل ۴-۳۹	تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم در فشار همه‌جانبه متفاوت بر اساس تراکم ثابت ۶۰٪	۹۳
شکل ۴-۴۰	تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم در فشار همه‌جانبه متفاوت بر اساس تراکم ثابت ۹۰٪	۹۴
شکل ۴-۴۱	تغییرات مقاومت نهایی در فشار همه‌جانبه ۵۰ کیلو پاسکال	۹۴
شکل ۴-۴۲	تغییرات مقاومت نهایی در فشار همه‌جانبه ۷۵ کیلو پاسکال	۹۵
شکل ۴-۴۳	تغییرات مقاومت نهایی در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال	۹۵
شکل ۴-۴۴	نمودار تنش همه‌جانبه-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز	۹۸
شکل ۴-۴۵	نمودار بارگذاری-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز	۹۸
شکل ۴-۴۶	نمودار تنش همه‌جانبه-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس متغیر	۹۹
شکل ۴-۴۷	نمودار بارگذاری-زمان آزمایش تنش کنترل ماسه ۱۶۱ فرکانس متغیر	۹۹
شکل ۴-۴۸	نمودار تنش-زمان فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز الف: ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ب: ستون اپوکسی	۱۰۰
شکل ۴-۴۹	نمودار مدول برشی-سیکل فرکانس ۰/۱ هرتز	۱۰۱
شکل ۴-۵۰	نمودار نسبت میرایی برحسب سیکل فرکانس ۰/۱ هرتز	۱۰۲

- شکل ۴-۵۱ نمودار هیستریزیس ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز ۱۰۲
- شکل ۴-۵۲ نمودار هیستریزیس ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز ۱۰۳
- شکل ۴-۵۳ مقایسه لوپ هیستریزیس ماسه و ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز ۱۰۳
- شکل ۴-۵۴ نمودار نشست-زمان فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز الف: ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ب: ستون اپوکسی ۱۰۴
- شکل ۴-۵۵ نمودار مدول برشی برحسب سیکل فرکانس ۰/۲ هرتز ۱۰۵
- شکل ۴-۵۶ نمودار نسبت میرایی برحسب سیکل فرکانس ۰/۲ هرتز ۱۰۵
- شکل ۴-۵۷ نمودار هیستریزیس ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۰۶
- شکل ۴-۵۸ نمودار هیستریزیس ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۰۷
- شکل ۴-۵۹ مقایسه لوپ هیستریزیس ماسه و ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۰۷
- شکل ۴-۶۰ نمودار نشست-زمان فرکانس ثابت ۰/۵ هرتز الف: ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ب: ستون اپوکسی ۱۰۸
- شکل ۴-۶۱ نمودار مدول برشی-سیکل فرکانس ۰/۵ هرتز ۱۰۸
- شکل ۴-۶۲ نمودار نسبت میرایی برحسب سیکل فرکانس ۰/۵ هرتز ۱۰۹
- شکل ۴-۶۳ نمودار هیستریزیس ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در فرکانس ثابت ۰/۵ هرتز ۱۱۰
- شکل ۴-۶۴ نمودار هیستریزیس ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۵ هرتز ۱۱۰
- شکل ۴-۶۵ مقایسه لوپ هیستریزیس ماسه و ستون اپوکسی در فرکانس ثابت ۰/۵ هرتز ۱۱۱
- شکل ۴-۶۶ مقایسه لوپ هیستریزیس فاز آخر آزمایش فرکانس ثابت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ هرتز ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ۱۱۱
- شکل ۴-۶۷ مقایسه لوپ هیستریزیس فاز آخر آزمایش فرکانس ثابت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ هرتز ستون اپوکسی ۱۱۲
- شکل ۴-۶۸ مقایسه نمودار نشست-زمان در فرکانس‌های مختلف ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ۱۱۲
- شکل ۴-۶۹ مقایسه نمودار نشست-زمان در فرکانس‌های مختلف ستون اپوکسی ۱۱۳
- شکل ۴-۷۰ مقایسه نسبت میرایی آزمایش‌های فرکانس ثابت ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ۱۱۳
- شکل ۴-۷۱ مقایسه مدول برشی آزمایش‌های فرکانس ثابت ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ۱۱۴
- شکل ۴-۷۲ مقایسه نسبت میرایی آزمایش‌های فرکانس ثابت ستون اپوکسی ۱۱۴
- شکل ۴-۷۳ مقایسه مدول برشی آزمایش‌های فرکانس ثابت ستون اپوکسی ۱۱۵
- شکل ۴-۷۴ نمودار نشست-زمان آزمایش ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری ستون اپوکسی تنش ناهمسان ۰/۳۳ و فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۱۵
- شکل ۴-۷۵ مدول برشی ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری ستون اپوکسی تنش ناهمسان ۰/۳۳ و فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۱۶
- شکل ۴-۷۶ نسبت میرایی ۱۰۰۰ سیکل ستون اپوکسی با ضریب تنش ناهمسان ۰/۳۳ و فرکانس ثابت ۰/۲ هرتز ۱۱۶
- شکل ۴-۷۷ مقایسه سیکل هیستریزیس در ابتدا و انتهای ۱۰۰۰ سیکل آزمایش ستون اپوکسی فرکانس ۰/۲ هرتز ۱۱۷
- شکل ۴-۷۸ تغییرات مدول برشی در آزمایش فرکانس متغیر ($\Delta\sigma_d=15\text{kPa}$) ۱۱۷
- شکل ۴-۷۹ تغییرات نسبت میرایی در آزمایش فرکانس متغیر ($\Delta\sigma_d=15\text{kPa}$) ۱۱۸

- شکل ۸۰-۴ تغییرات مدول برشی در آزمایش فرکانس متغیر ($\Delta\sigma_d=20\text{kPa}$)..... ۱۱۹
- شکل ۸۱-۴ تغییرات نسبت میرایی در آزمایش فرکانس متغیر ($\Delta\sigma_d=20\text{kPa}$)..... ۱۱۹
- شکل ۸۲-۴ مقایسه مدول برشی در آزمایش فرکانس متغیر تنش بارگذاری متفاوت ماسه ($\Delta\sigma_d=15,20\text{ kPa}$)..... ۱۲۰
- شکل ۸۳-۴ مقایسه نسبت میرایی در آزمایش فرکانس متغیر تنش بارگذاری متفاوت ماسه ($\Delta\sigma_d=15,20\text{ kPa}$)..... ۱۲۰
- شکل ۸۴-۴ مقایسه مدول برشی در آزمایش فرکانس متغیر ستون اپوکسی ($\Delta\sigma_d=15,20\text{ kPa}$)..... ۱۲۱
- شکل ۸۵-۴ مقایسه نسبت میرایی در آزمایش فرکانس متغیر ستون اپوکسی ($\Delta\sigma_d=15,20\text{ kPa}$)..... ۱۲۱

فصل اول:

مقدمه و کلیات تحقیق

فصل ۱ مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

استفاده از ستون سنگی به عنوان روشی متداول برای اصلاح خاک‌ها بدون تغییر در ساختار اصلی خاک شناخته می‌شود از دلایل استفاده از این روش می‌توان به در دسترس بودن، مصالح کم‌هزینه و سهولت اجرا اشاره نمود ستون‌های سنگی مقاومت و سختی را از محصور شدن توسط خاک اطراف به دست می‌آورند به عبارت دیگر هنگامی که بارهای وارده به ستون اعمال می‌شود خاک‌های اطراف تنش همه‌جانبه از کرنش‌های جانبی تا حدودی جلوگیری می‌کند خاک‌های دارای مقاومت برشی بسیار پایین قادر به اعمال فشار همه‌جانبه کافی به ستون‌ها نیستند و استفاده از ستون‌های سنگی در این نوع خاک‌ها، موجب لغزش دانه‌های ستون به داخل خاک اطراف شده و باعث گسیختگی ستون‌ها در اثر کم‌انرژی جانبی می‌شود. یکی از روش‌های کارا و مفید برای افزایش مقاومت ستون سنگی در برابر کم‌انرژی جانبی در خاک‌ها، استفاده از ستون‌های سنگی صلب است. در این روش هنگام ساخت ستون از مصالح چسباننده، نظیر آهک و پلیمر برای ایجاد چسبندگی بین دانه‌ها استفاده شده و ستون تحت بارهای اعمالی حتی بدون کمک خاک اطراف در برابر گسیختگی مقاومت می‌کند.

۱-۲- اهمیت موضوع

ستون‌های سنگی کاربرد زیادی در ایران دارند از این روش برای مناطق ساحلی حاشیه رودخانه‌ها مناطق باتلاقی و... در مناطقی مانند شمال و جنوب ایران استفاده می‌شود این مناطق بیشتر خاک‌های سست و اشباع دارند از این رو اصلاح خواص مکانیکی این خاک‌ها جهت احداث جاده، ساختمان، پالایشگاه، مخازن نفت و گاز و ... اهمیت ویژه‌ای می‌یابد از طرفی در پروژه‌های عظیم ممکن است ستون‌های سنگی معمول ظرفیت باربری مورد نیاز را تأمین نکنند و از طرفی نیاز به زهکشی امکان استفاده از شمع‌های بتنی و فلزی را میسر نسازد بنابراین تقویت ستون سنگی به طوری که امکان زهکشی آن را از بین نبرد لذا در این پایان‌نامه کوشش شد تا به بررسی پلیمرها جهت تقویت خواص فیزیکی ستون سنگی امکان استفاده از پلیمر جهت تقویت آن را بررسی شود.

۱-۳- اهداف تحقیق

بررسی و امکان‌سنجی تقویت ستون‌های سنگی با استفاده از اپوکسی رزین‌ها و بررسی تأثیر آن‌ها بر ظرفیت باربری و نشست با استفاده از دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس است. از سوی دیگر اضافه کردن پلیمر

به خاک و سنگدانه موجب کاهش نفوذپذیری می شود این میزان نباید لطمه ای به نحوه زهکشی ستون ها در خاک وارد نماید؛ لذا تغییرات نفوذپذیری نیز بررسی می شود و در آزمایش های سه محوری بزرگ مقیاس برای اندازه گیری تغییرات ظرفیت باربری ماسه ها با ستون های سنگی در مقیاس بزرگ و تأثیر فشار همه جانبه متفاوت و تراکم متفاوت بررسی می شود.

۱-۴- سؤالات تحقیق

در این بخش سؤالاتی که در ادامه پایان نامه به بررسی آن ها پرداخته می شود، مرور می گردد.

- ۱- تأثیر استفاده از اپوکسی رزین در تقویت ستون های سنگی چه مقدار است؟
- ۲- تأثیر اضافه کردن ماسه به ستون سنگی اپوکسی رزین چه مقدار است؟
- ۳- تأثیر فشار همه جانبه بر روی مقاومت ستون سنگی اپوکسی و ستون سنگی معمولی چه مقدار است؟
- ۴- تأثیر تراکم خاک بر ظرفیت باربری ستون سنگی چیست؟
- ۵- تأثیر فرکانس بارگذاری بر روی ستون اپوکسی و خاک ماسه چه مقدار است؟

۱-۵- ساختار پایان نامه

در فصل اول به بررسی اهمیت ستون های سنگی و اهمیت اجرای آن ها پرداخته شده است. در فصل دوم به بررسی ادبیات فنی، نحوه محاسبات و تاریخچه تحقیقات گذشته بر روی ستون سنگی پرداخته شده است و در ادامه انواع ساختار اپوکسی رزین ها و تاریخچه استفاده از آن ها در علم ژئوتکنیک مرور گردیده است. در فصل سوم، عملیات آزمایشگاهی شامل چگونگی اختلاط و ساخت نمونه ها، مراحل انجام آزمایش ها و جزئیات دستگاه شرح داده شده است همچنین دانه بندی و ویژگی های ماسه فیروزکوه و سنگدانه ها شرح داده شده است. در فصل چهارم نتایج آزمایش های تک محوری، برزلی، نفوذپذیری، سه محوری استاتیکی و سه محوری دینامیکی به همراه تحلیل نتایج آن ها برای درصدهای مختلف اپوکسی و ماسه قرار داده شده است. در فصل آخر به جمع بندی مطالب نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها برای پژوهش های آینده پرداخته شده است.

فصل دوم:

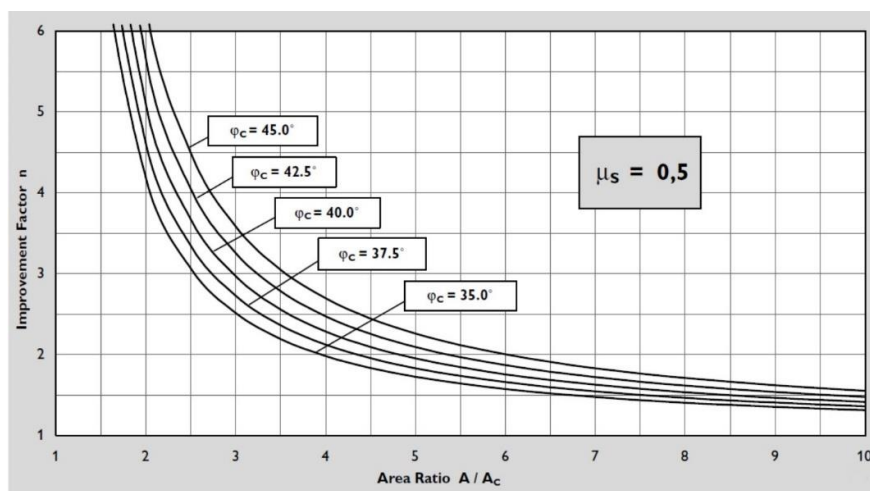
مروری بر تحقیقات انجام شده

فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- مقدمه

ستون سنگی به عنوان روشی متداول، مقرون به صرفه در مهندسی ژئوتکنیک است. از این روش در ستون سنگی جهت اصلاح خاک در مواردی مانند: پایداری شیب سدهای خاکی، پی‌ها گسترده، مخازن ذخیره مایع، تأسیسات بندرها و... استفاده می‌شود ستون‌های سنگی کاربرد گسترده‌ای در مواجهه با خاک‌های مستعد روانگرایی دارند. در خاک‌های ماسه‌ای ریز سست و خاک‌های لای دار غیرپلاستیک تسلیح شده با ستون دانه‌ای، ایجاد اضافه فشار آب حفرهای کاهش و نرخ زایل شدن فشار اضافی پس از نصب ستون دانه‌ای افزایش می‌یابد [۱]. در این قسمت دلایل مهم استفاده از ستون سنگی شرح داده می‌شود.

۱- کاهش نشست: به طور کلی نشست در خاک تا ۵۰ درصد می‌تواند کاهش پیدا کند موارد استفاده در مناطق وسیع که تحت بار هستند با افزایش مساحت ستون‌های سنگی حادثاتی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی در زیر پی، مقادیر نشست خاک کاهش پیدا می‌کند برای مثال استفاده از ستون سنگی در زیر کوله پل‌ها که تحت بار دینامیکی شدید و لحظه‌ای قرار دارند از نشست دال را کاهش می‌دهد و موارد کلی دیگر مانند: زیر پی تانکرهای بزرگ، خاک زیر پی خاکریزها، مخازن آب، مشتقات نفت و ... [۲]. در نمودار شکل ۲-۱ با چندین فرض ساده سازی شده شامل: نشست همسان ستون و خاک، اعمال نیروی برابر به خاک و ستون، قرار گیری ستون بر روی خاک صلب به برآورد ضریب کاهش نشست زمین برحسب نسبت میان مساحت ستون‌های سنگی و کل خاک برای ضرایب پواسون ۰/۵ میزان کاهش نشست بر اساس زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی نشان داده شده است [۳].



شکل ۲-۱- تعیین مقدار کاهش نشست پذیری خاک زیر پی با استفاده از ستون سنگی [۳]

۲-افزایش مقاومت: استفاده از ستون سنگی در خاک‌های ضعیف موجب افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود. [۴].

۳- نفوذپذیری: مصالح ستون سنگی نفوذپذیری بالایی دارند که به‌عنوان زهکش قائم عمل کرده و موجب کاهش زمان تحکیم می‌شوند، همچنین در هنگام زلزله با کاهش سریع فشار آب حفره‌ای احتمال روانگرایی را کاهش می‌دهند.

۴-صرفه اقتصادی: ستون‌های سنگی به‌عنوان روشی اقتصادی در ژئوتکنیک شناخته می‌شود و به‌طور کلی در اعماق بین ۶ تا ۱۰ متری اجرا می‌شوند و به علت سختی اجرا و هزینه اجرای این روش در عمق‌های بالاتر معمولاً استفاده نمی‌شود با این وجود مواردی از اجرای این روش تا عمق ۲۱ متر نیز مشاهده شده است.

۲-۲- معرفی کمیت‌ها مهم در ادبیات موضوع

در ادامه به بررسی کمیت‌های مهمی که در رفتار باربری ستون سنگی تأثیرگذار است و همچنین نسبت‌های مهمی که در مطالعات عددی و آزمایشگاهی مورد توجه قرار می‌گیرد بحث شده است.

۲-۲-۱- ابعاد هندسی

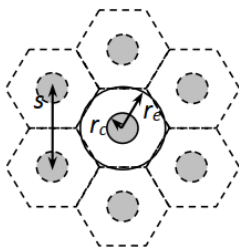
ستون سنگی تک به‌صورت دایروی و در گروه ستون سنگی همگی دارای قطر و طول مشخص هستند. به طور حدودی ابعاد بهینه ستون قطری ۹۰ سانتی‌متری و ارتفاعی حدود ۶ الی ۱۰ متری اقتصادی است. باتوجه به نوع آرایش قرارگیری ستون‌ها در مدل سلول واحد مفهومی به نام قطر مؤثر مطرح می‌شود که باتوجه به آرایش ستون مقدار این قطر متفاوت است. شکل ۲-۲ مقادیر قطرهای مؤثر ستون نوشته شده است.

۲-۲-۱-۱- قطر مؤثر (De)

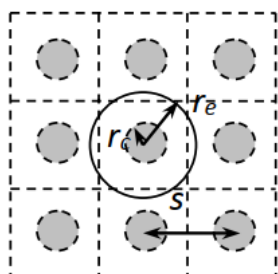
قطر ستون در اجرای ویبره‌ای حدود ۶۰ تا ۱۱۰ سانتی‌متر و برای اجرای کوبشی حدود ۴۰ الی ۷۵ سانتی‌متر است. نکته قابل توجه به دلیل فرایند نصب قطر ستون درون زمین بیشتر از قطر در نظر گرفته شده در هنگام طراحی است.

۲-۲-۱-۲- چیدمان

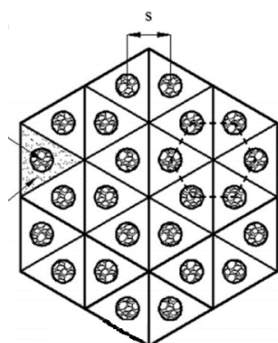
باتوجه به روش‌های اجرا چیدمان‌های متفاوت شش‌ضلعی، مربعی و مثلثی که در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است. این چیدمان برای تعداد ستون سنگی در یک مساحت ثابت در آرایش مثلثی کمتر از آرایش مربعی است [۵].



$$d_e = \left(\frac{12}{\pi^2}\right)^{\frac{1}{4}} s = 1.05s \quad (1-2)$$



$$d_e = \left(\frac{16}{\pi^2}\right)^{\frac{1}{4}} s = 1.13s \quad (2-2)$$



$$d_e = \left(\frac{27}{\pi^2}\right)^{\frac{1}{4}} s = 1.29s \quad (3-2)$$

شکل ۲-۲ قطر مؤثر انواع چیدمان ستون سنگی [۵]

۲-۲-۱-۳- فاصله (S)

به فاصله بین ستون‌ها گفته می‌شود. این مقدار حدود دو تا سه برابر قطر فرض می‌شود. فاصله به عواملی همچون شرایط زمین، نشست‌ها، نحوه اجرا و بارگذاری وابسته است. تعیین فاصله اهمیت شدیدی روی نشست دارد به همین دلیل در پروژه‌های مهم با آزمایش‌های در محل فاصله بهینه تعیین می‌شود [۶].

۲-۲-۱-۴- نسبت بهسازی شده (As)

مساحت ناحیه جایگزین شده با ستون سنگی به مساحت کل را گویند. معمولاً در پروژه‌های واقعی این نسبت ۰/۱ تا ۰/۳۵ است.