

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی عمران

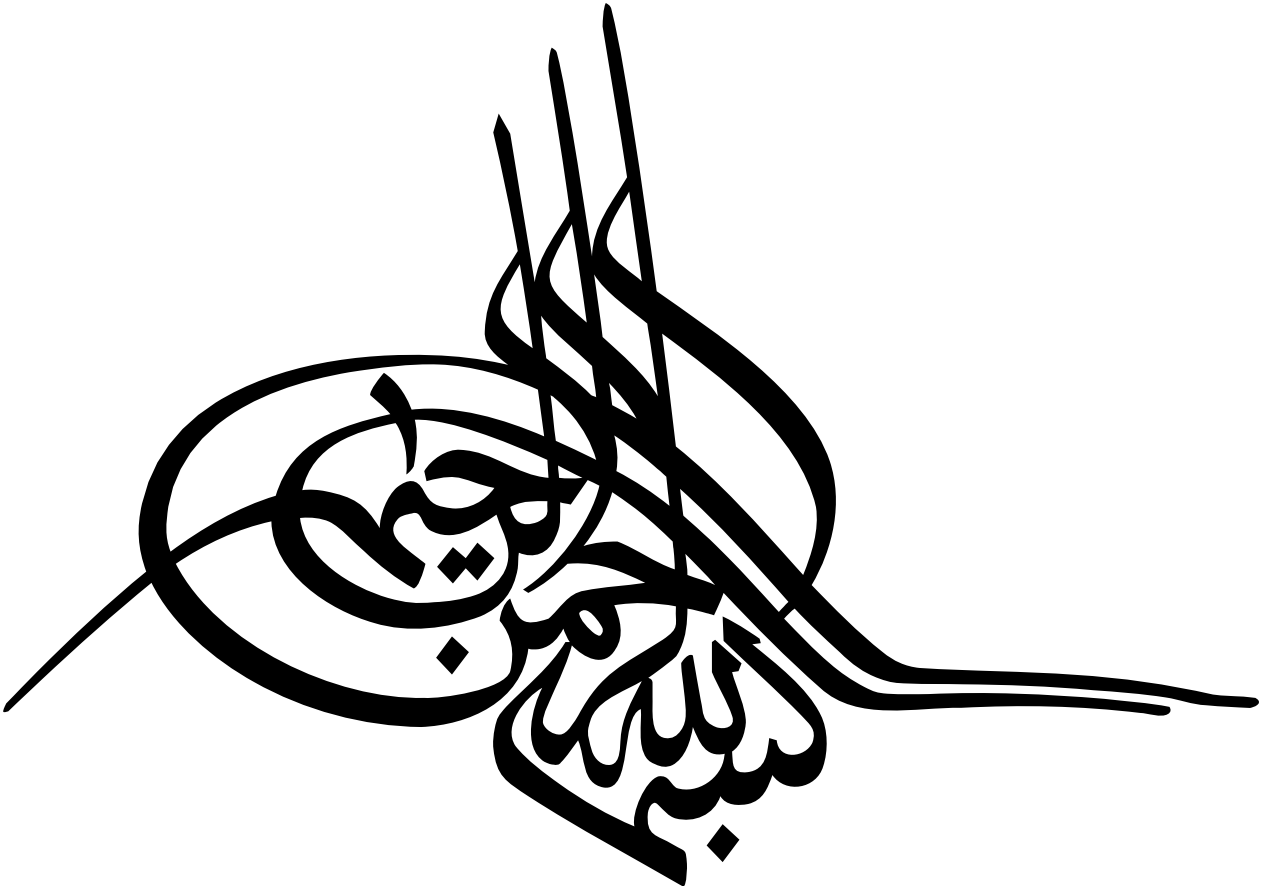
پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی

## بررسی رفتار خاک اصلاح شده با ستون های سنگی معمولی و مسلح شده با ژئوسینستیک ها

استاد راهنما:  
دکتر محمود قضاوی

نگارش:  
سالار عظیمی

تابستان ۱۳۹۰



## چکیده

ستون های سنگی به طور گسترده برای اصلاح خاک سست زیر پی بسیاری از سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. ستون های سنگی ظرفیت باربری خود را از فشار دورگیری اعمال شده از خاک اطراف به دست می آورند. در خاک های بسیار سست فشار دورگیری اعمال شده از خاک روی ستون سنگی کافی نمی باشد و استفاده از ستون سنگی در این نوع خاک ها را با مشکل مواجه می کند. پوشاندن ستون سنگی با ژئوسینستیک ها یکی از بهترین روش ها برای بهبود عملکرد ستون سنگی می باشد. این نوع پوشش باعث می شود ستون سنگی سخت تر و قوی تر عمل کند که باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر اصلاح شده با ستون سنگی می شود. در این پژوهش رفتار بستر اصلاح شده با ستون سنگی غیر مسلح و مسلح شده با ژئوسینستیک ها به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی و تحلیل شده است. برای بررسی های عددی PLAXIS 8.2 مورد استفاده قرار گرفته است. در بررسی های عددی، رفتار خاک بستر و ستون سنگی با استفاده از معیار شکست مور-کولمب و رفتار ژئوسینستیک به صورت الاستیسیته خطی مدلسازی شده و با نتایج به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته و مطالعات پارامتریک بر روی نسبت های مختلف  $L/D$  ( $L$  = طول ستون سنگی؛  $D$  = قطر ستون سنگی)، سختی ژئوتکستایل، طول ژئوتکستایل در ستون سنگی های مسلح شده به صورت قائم و دورگیر و فاصله ژئوتکستایل ها در ستون سنگی های مسلح شده به صورت افقی انجام شد. در نهایت نتایج به دست آمده از بررسی های آزمایشگاهی و عددی برای بررسی رفتار بستر اصلاح شده با ستون سنگی های مسلح شده و مسلح نشده در مقیاس واقعی مورد استفاده قرار گرفت.

تقدیم به

"

نماد صبر و ایمان

پدر عزیزم ....

و تقدیم به اسوه عشق و از خودگذشتگی

مادر مهربانم....

که وصف خوبی و مهربانی و ایثارشان در خیال نمی‌گنجد و

تا آخر عمر در دل باقی خواهد ماند...

## سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌ها و زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه استاد بزرگوارم، دکتر محمود قضاوی صمیمانه قدردانی نمایم که در کنار علم، از او درس زندگی نیز آموختم و همچنین از آقای مهندس نظری افشار صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم و توفیق روز افزون همه ایشان را از خداوند منان مسئلت می‌نمایم...

## تائیدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده با عنوان بررسی رفتار خاک اصلاح شده با ستون های سنگی معمولی و مسلح شده با ژئوسینستیک ها توسط آقای سالار عظیمی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی با رتبه کارشناسی ارشد مورد تائید قرار می دهند.

- |       |                          |                           |
|-------|--------------------------|---------------------------|
| امضاء | آقای دکتر محمود قضاوی    | ۱- استاد راهنما           |
| امضاء | آقای دکتر محمود رضا عبدی | ۲- ممتحن داخلی            |
| امضاء | آقای دکتر علی پاک        | ۳- ممتحن خارجی            |
| امضاء | آقای دکتر محمود رضا عبدی | ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی |

## اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: بررسی رفتار خاک اصلاح شده با ستون های سنگی معمولی و مسلح شده با

ژئوسینستیک ها

استاد راهنما: دکتر محمود قضاوی

نام دانشجو: سالار عظیمی

شماره دانشجویی: ۸۷۰۳۶۰۴

اینجانب سالار عظیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در این 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.

امضاء دانشجو

تاریخ

### حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن، تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.



## فهرست مطالب

۱	-----	۱- مقدمه و کلیات
۴	-----	۱-۱-۱- تراکم
۴	-----	۱-۱-۲- تراکم دینامیکی
۴	-----	۱-۱-۳- تزریق دوغاب
۴	-----	۱-۱-۴- روش های ارتعاشی
۵	-----	۱-۱-۵- استفاده از ژئوتکستایل
۶	-----	۱-۱-۶- ستون سنگی
۷	-----	۱-۲- آشنایی با ستون سنگی
۱۰	-----	۱-۳- انواع ستون سنگی
۱۰	-----	۱-۴- ستون سنگی های مسلح شده با ژئوتکستایل
۱۲	-----	۱-۵- روش نصب ستون سنگی
۱۴	-----	۱-۶- ضرورت تحقیق
۱۴	-----	۱-۷- اهداف تحقیق
۱۵	-----	۱-۸- دامنه تحقیق
۱۶	-----	۱-۹- ساختار تحقیق
۱۷	-----	فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده
۱۸	-----	۱-۲- مقدمه
۱۸	-----	۲-۲- مکانیزم های شکست ستون سنگی
۱۸	-----	۲-۳- شکست در اثر شکم دادگی یا شکست فشاری
۱۹	-----	۲-۴- نظریه انبساط جانبی در ستون های سنگی
۲۰	-----	۲-۵- نظریه انبساط جانبی وسیک
۲۲	-----	۲-۶- ظرفیت باربری ستون سنگی کوتاه
۲۳	-----	۲-۷- نظریه دیوار حائل صلب مجازی
۲۸	-----	۲-۸- شکست برش پانچ روی ستون شناوری
۲۹	-----	۲-۹- سیستم باربری ستون های مسلح
۳۰	-----	۲-۱۰- بررسی ظرفیت باربری و نشست بستر با ستون سنگی و ستون سنگی مسلح شده
۳۱	-----	۲-۱۱- کارهای انجام شده توسط Ambily & Shailesh
۳۳	-----	۲-۱۱-۱- خصوصیات مصالح مورد استفاده
۳۷	-----	۲-۱۲- کارهای انجام شده توسط Murugesan & Rajagopal
۳۸	-----	۲-۱۲-۱- آماده سازی بستر رسی
۳۹	-----	۲-۱۲-۲- ساخت ستون سنگی
۴۱	-----	۲-۱۲-۳- مطالعات موردی انجام شده

۴۲	-----	۲-۱۲-۴- نتیجه گیری
۴۳	-----	۲-۱۳- کارهای انجام شده توسط Kousik & Jagtap Babasaheb
۴۳	-----	۲-۱۳-۱- مصالح مورد استفاده
۴۷	-----	۲-۱۳-۲- ساخت بستر رسی
۴۷	-----	۲-۱۳-۳- ساخت ستون سنگی
۴۷	-----	۲-۱۳-۴- آماده سازی بستر رسی
۴۸	-----	۲-۱۳-۵- نتایج به دست آمده از آزمایشات
۵۰	-----	۲-۱۳-۶- نتایج کلی به دست آمده از آزمایشات
۵۱	-----	۲-۱۴- کارهای انجام شده توسط Malarvizhi & Lamparuthi
۵۱	-----	۲-۱۴-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده
۵۳	-----	۲-۱۴-۲- نتایج کلی به دست آمده از آزمایشات
۵۴	-----	۲-۱۵- کارهای انجام شده توسط Joel & Abdolmalek
۵۵	-----	۲-۱۵-۱- نتایج کلی به دست آمده از آزمایشات
۵۵	-----	۲-۱۶- خلاصه و نتیجه گیری
۵۷	-----	فصل سوم: آزمایشات انجام شده و ارائه نتایج آزمایشات
۵۸	-----	۳-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده
۵۸	-----	۳-۱-۱- آزمایش گرانی مخصوص بر روی مصالح
۵۸	-----	۳-۱-۲- دانه بندی
۶۱	-----	۳-۱-۳- هیدرومتری
۶۰	-----	۳-۱-۴- حدود اتربرگ
۶۰	-----	۳-۱-۵- حد خمیری
۶۰	-----	۳-۱-۶- آزمایش تراکم استاندارد بر روی رس
۶۱	-----	۳-۱-۷- آزمایش تخلخل ماکزیمم و مینیمم
۶۲	-----	۳-۱-۸- آزمایش تک محوری بر روی رس
۶۵	-----	۳-۲- خلاصه و نتیجه گیری
۶۸	-----	۳-۳- گزارش کار آزمایشگاهی و نتایج کار
۷۳	-----	۳-۳-۲- آزمایشگاه انجام شده روی مخزن بزرگ
۷۵	-----	۳-۳-۳- آماده سازی رس مورد استفاده
۷۷	-----	۳-۳-۴- ساخت بستر رسی داخل مخزن
۷۷	-----	۳-۳-۵- ساخت ستون سنگی
۷۸	-----	۳-۴- نصب وسایل اندازه گیری و انجام آزمایشات
۷۹	-----	۳-۵- بررسی های خطاهای موجود در آزمایشات
۸۱	-----	۳-۶- خلاصه

۸۲	فصل چهارم: ارائه نتایج و تحلیل آنها-----
۸۳	۴-۱- آزمایشات انجام شده داخل مخزن کوچک-----
۸۵	۴-۲- ارتباط آزمایش های انجام شد داخل مخزن کوچک با مخزن بزرگ-----
۸۶	۴-۳- آزمایشات انجام شده داخل مخزن بزرگ-----
۸۶	۴-۳-۱- آزمایشات سری اول: ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر-----
۸۸	۴-۳-۲- آزمایشات انجام شده روی بستر با ستون سنگی به قطر ۸ سانتی متر-----
۹۰	۴-۴- اثر قطر ستون سنگی-----
۹۱	۴-۵- اثر مقاومت مسلح کننده مورد استفاده-----
۹۳	۴-۶- اثر مقاومت مسلح کننده در نمونه های مسلح شده نصف طول-----
۹۴	۴-۷- اثر طول مسلح سازی روی ظرفیت باربری-----
۹۵	۴-۸- اثر قطر ستون سنگی در ستون های مسلح شده با طول کامل-----
۹۶	۴-۹- اثر توام قطر و طول مسلح کننده-----
۹۸	۴-۱۰- شکم دادگی ستون سنگی-----
۹۹	۴-۱۱- خلاصه و نتیجه گیری-----
۱۰۱	۴-۱۲- اثر قطر ستون سنگی-----
۱۰۱	۴-۱۳- اثر مقاومت مسلح کننده-----
۱۰۴	۴-۱۴- اثر طول مسلح کننده-----
۱۰۲	۴-۱۵- اثر قطر ستون سنگی در ستون های مسلح شده-----
۱۰۲	۴-۱۶- بررسی توام اثر قطر ستون سنگی و مقاومت مسلح کننده-----
۱۰۴	فصل پنجم: بررسی عددی و تحلیلی ستون های سنگی-----
۱۰۵	۵-۱- مقدمه-----
۱۰۶	۵-۲- بررسی نتایج تحلیلی-----
۱۰۸	۵-۳-۱- هندسه مدل-----
۱۰۸	۵-۳-۲- مشخصات مصالح-----
۱۱۱	۵-۴- سری اول: ستون سنگی های به قطر ۶ سانتی متر-----
۱۱۱	۵-۴-۱- رفتار بار نشست بستر رسی بدون ستون سنگی-----
۱۱۳	۵-۴-۲- بارگذاری-----
۱۱۸	۵-۵- سری دوم ستون سنگی های به قطر ۸ سانتی متر-----
۱۲۰	۵-۶- بررسی های پارامتریک-----
۱۲۰	۵-۶-۱- اثر قطر ستون سنگی-----
۱۲۷	۵-۶-۲- بررسی نسبت طول ستون سنگی به قطر ستون-----
۱۳۰	۵-۷- ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی-----
۱۳۰	۵-۷-۱- ساخت هندسه مدل-----

- ۱۳۰-۲-۷-۵- بارگذاری
- ۱۳۴-۳-۷-۵- بررسی اثر طول ارتفاع مسلح شده ستون سنگی در رفتار بار- نشست
- ۱۳۸-۵- تحلیل عددی ستون سنگی در مقیاس واقعی
- ۱۳۸-۹-۵- شرایط زیر سطحی
- ۱۳۹-۱۰-۵- ساخت ستون سنگی
- ۱۳۹-۱۱-۵- انجام آزمایشات
- ۱۴۱-۱۲-۵- نتایج آزمایشات انجام شده
- ۱۴۳-۱۳-۵- بررسی عددی
- ۱۴۹-۱۴-۵- ستون سنگی به قطر ۶۰ سانتی متر و طول ۳ متر
- ۱۵۰-۱۵-۵- اثر قطر ستون سنگی
- ۱۵۳-۱۶-۵- ستون سنگی های مسلح شده به صورت قائم و تمام طول
- ۱۵۶-۱۷-۵- ستون سنگی های مسلح شده به صورت قائم و نصف طول
- ۱۵۷-۱۸-۵- ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی
- ۱۶۱-۱۹-۵- ستون سنگی به قطر ۸۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر
- ۱۶۳-۲۰-۵- اثر مقاومت مسلح کننده بر ظرفیت باربری
- ۱۶۵-۲۱-۵- اثر مقاومت مسلح کننده در ستون سنگی با مسلح کننده افقی
- ۱۶۸-۲۲-۵- اثر زاویه اصطکاک داخلی شن بر روی ظرفیت باربری
- ۱۷۲-۲۳-۵- اثر فاصله مسلح کننده های افقی
- ۱۸۱-۲۴-۵- اثر مدول الاستیسیته لایه سخت
- ۱۸۳-۲۵-۵- اثر مدول الاستیسیته لایه سخت در ستون سنگی مسلح شده به صورت قائم
- ۱۸۴-۲۶-۵- اثر مدول الاستیسیته لایه سخت در ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی
- ۱۸۵-۲۷-۵- اثر فاصله انتهای ستون سنگی از لایه سخت بر ظرفیت باربری
- ۱۸۷-۲۸-۵- اثر فاصله انتهای ستون از لایه سخت بر ظرفیت باربری در ستون های مسلح شده به صورت افقی
- ۱۹۳-۲۹-۵- اثر فاصله انتهای ستون از لایه سخت در ستون سنگی های مسلح شده به صورت قائم
- ۱۸۳- فصل ششم: نتیجه گیری کلی و پیشنهاد برای کارهای آینده
- ۱۸۴-۲۷-۵- اثر فاصله انتهای ستون سنگی از لایه سخت بر ظرفیت باربری
- ۱۸۶-۲۸-۵- اثر فاصله انتهای ستون از لایه سخت در ستون های مسلح شده به صورت افقی
- ۱۹۲-۲۹-۵- اثر فاصله انتهای ستون از لایه سخت در ستون های مسلح شده به صورت قائم
- ۱۹۴- فصل ششم: نتیجه گیری کلی و پیشنهاد برای کارهای آینده
- ۱۹۵-۱-۶- مروری بر کارهای انجام شده و نتیجه گیری
- ۱۹۹-۲-۶- پیشنهاد برای کارهای آینده
- ۲۰۰- پیوست ۱

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- نحوه اجرای ستون سنگی ----- ۷
- شکل ۱-۲- نحوه پخش تنش ناشی از بار اعمالی بر ستون سنگی در عمق خاک ----- ۸
- شکل ۱-۳- تعیین مقدار کاهش نشست پذیری خاک زیر پی با استفاده از ستون سنگی ----- ۹
- شکل ۱-۴- ستون سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل ----- ۱۱
- شکل ۱-۵- ستون سنگی مسلح شده با استفاده از غلاف ژئوگرید ----- ۱۱
- شکل ۱-۶- دو روش نصب ستون های سنگی در بستر خاک ----- ۱۲
- شکل ۱-۶- ستون سنگی مسلح شده با استفاده از غلاف ژئوگرید ----- ۲۳
- شکل ۱-۷- توضیح شماتیکی روش نصب جابجایی ستون سنگی ----- ۱۳
- شکل ۱-۸- توضیح شماتیکی روش نصب جایگزینی ----- ۱۴
- شکل ۲-۱- استفاده از دیوار حائل صلب مجازی برای محاسبه ظرفیت باربری ستون سنگی ----- ۲۴
- شکل ۲-۲- نمایش مدهای مختلف شکست ستون های سنگی ----- ۲۹
- شکل ۲-۳- سیستم نصب شده برای آزمایش ستون سنگی ----- ۳۲
- شکل ۲-۴- دانه بندی مصالح رس بستر و شن ستون سنگی ----- ۳۳
- شکل ۲-۵- نمودار مقاومت برشی بستر در مقابل رطوبت ----- ۳۴
- شکل ۲-۶- نمودار بار- نشست برای آزمایشات انجام شده و تحلیل المان محدودی ----- ۳۶
- شکل ۲-۷- نمای شماتیکی ستون سنگی ساخته شده همراه با تجهیزات نصب شده ----- ۴۰
- شکل ۲-۸- نمودار فشار- نشست برای انواع مختلف ستون سنگی های مسلح و معمولی با قطرهای متفاوت ----- ۴۱
- شکل ۲-۹- نمودار فشار- نشست برای ستون سنگی های مسلح با انواع مسلح کننده ها ----- ۴۲
- شکل ۲-۱۰- آماده سازی دستگاه و ساخت ستون سنگی برای آزمایش ستون سنگی ----- ۴۴
- شکل ۲-۱۱- دانه بندی رس و شن مورد استفاده برای آزمایشات ----- ۴۵
- شکل ۲-۱۲- آماده سازی دستگاه و ساخت ستون سنگی برای آزمایش ستون سنگی ----- ۴۶
- شکل ۲-۱۳- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی و ستون سنگی با لایه ماسه ای مسلح شده و نشده ----- ۴۹
- شکل ۲-۱۴- نمودار بار- نشست برای بستر با ستون سنگی با لایه ماسه ای به ضخامت های متفاوت ----- ۵۰
- شکل ۲-۱۵- نمودار بار- نشست برای بستر رسی و بستر رسی با ستون سنگی با  $l/d$  متفاوت ----- ۵۲
- شکل ۲-۱۶- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده با مسلح کننده های مختلف ----- ۵۳
- شکل ۲-۱۷- نمودار فشار- کرنش قائم برای ستون های مسلح شده با طول مسلح کننده متفاوت ----- ۵۴
- شکل ۳-۱- نمونه ای از شن استفاده شده برای مصالح ستون سنگی ----- ۶۰
- شکل ۳-۲- دانه بندی رس مورد استفاده برای بستر و شن مورد استفاده برای ستون سنگی ----- ۶۳
- کل ۳-۳- نمودار وزن مخصوص خشک در مقابل رطوبت برای آزمایش پروکتور روی رس مورد استفاده در ستون ----- ۶۱
- شکل ۳-۴- منحنی تنش- کرنش برای آزمایش تک محوری رس با رطوبت ۱۷ درصد ----- ۶۵
- شکل ۳-۵- منحنی تنش- کرنش برای آزمایش تک محوری رس با رطوبت ۱۷ درصد ----- ۶۵
- شکل ۳-۶- تغییرات مقاومت برشی رس در مقابل رطوبت برای آزمایشات تکراری انجام شده ----- ۶۶

- شکل ۷-۳- نمودار مقاومت برشی بستر رسی در مقابل رطوبت ----- ۶۷
- شکل ۸-۳- تصویری از دستگاه بارگذاری مورد استفاده برای انجام آزمایشات ----- ۷۱
- شکل ۹-۳- تصویری از ابزار دقیق مورد استفاده در آزمایشات ----- ۷۱
- شکل ۱۰-۳- خالی کردن خاک داخل مخزن کوچک برای ساخت ستون سنگی ----- ۷۳
- شکل ۱۱-۳- آزمایش انجام شده داخل مخزن کوچک با ستون سنگی ساخته شده ----- ۷۵
- شکل ۱۲-۳- مخزن مورد استفاده برای رطوبت زدن به رس و نگهداری برای آزمایشات ----- ۷۸
- شکل ۱۳-۳- نصب تجهیزات برای انجام آزمایش ----- ۸۱
- شکل ۱-۴- نمودارهای بار- نشست برای آزمایشات داخل مخزن کوچک ----- ۸۵
- شکل ۲-۴- نمودار بار- نشست برای آزمایشات داخل مخزن بزرگ روی ستون به قطر ۶ سانتی متر ----- ۸۸
- شکل ۳-۴- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به قطر ۶ سانتی متر ----- ۹۱
- شکل ۴-۴- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی مسلح نشده به قطر ۶ و ۸ سانتی متر ----- ۹۳
- شکل ۵-۴- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی ۶ سانتی متر با دو نوع مسلح کننده ----- ۹۴
- شکل ۶-۴- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به قطر ۸ سانتی متر با دو نوع مسلح کننده ----- ۹۵
- شکل ۷-۴- نمودارهای بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده نصف طول به قطر ۶ سانتی متر ----- ۹۶
- شکل ۸-۴- نمودارهای بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده دورگیر به قطر ۶ سانتی متر ----- ۹۴
- شکل ۹-۴- نمودار بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده کامل به قطر ۶ و ۸ سانتی متر ----- ۹۵
- شکل ۱۰-۴- نمودارهای بار- نشست برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۸ سانتی متر و ۶ سانتی متر ----- ۹۹
- شکل ۱۱-۴- اثر شکم دادگی ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۶ سانتی متر و طول ۳۰ سانتی متر روی بستر رسی - ۱۰۰
- شکل ۱-۵- نمودار S/I برای بارگذاری روی بستر رسی با ستون سنگی ----- ۱۱۲
- شکل ۲-۵- هندسه بستر رسی بدون ستون سنگی مدل شده در PLaxis ----- ۱۱۴
- شکل ۳-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی ----- ۱۱۵
- شکل ۴-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای بستر رسی بدون ستون سنگی ----- ۱۱۰
- شکل ۵-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای بستر رسی با ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر ----- ۱۱۷
- شکل ۶-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر مسل شده با PGM14 به صورت تمام طول ----- ۱۱۷
- شکل ۷-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر با TS40 ----- ۱۱۸
- شکل ۸-۵- هندسه مدل شده در نرم افزار برای ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر مسلح شده با PGM14 به صورت نصف طول ----- ۱۱۹
- شکل ۹-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر مسلح شده با PGM14 به صورت نصف طول ----- ۱۱۹
- شکل ۱۰-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر مسلح شده با TS40 به صورت نصف طول متر ----- ۱۲۰
- شکل ۱۱-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای ستون سنگی به قطر ۸ سانتی متر ----- ۱۲۱

- شکل ۱۲-۵- نمودار بار- نشست آزمایشگاهی و عددی برای ستون سنگی به قطر ۸ سانتی متر مسلح شده با PGM14 به صورت قائم ----- ۱۲۱
- شکل ۱۳-۵- تغییرات بار- نشست عددی و آزمایشگاهی ستون سنگی مسلح شده به صورت کامل و دورگیر به قطر ۸ سانتیمتر با TS40 ----- ۱۲۲
- شکل ۱۴-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های غیر مسلح با قطرهای مختلف ----- ۱۲۳
- شکل ۱۵-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های مسلح شده با PGM14 به صورت قائم با قطرهای مختلف ۱۲۴
- شکل ۱۶-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های مسلح شده با TS40 به صورت قائم با قطرهای مختلف ۱۲۵
- شکل ۱۷-۵- تغییرات قطر در مقابل BCR2 برای انواع ستون های با قطرهای متفاوت ----- ۱۲۶
- شکل ۱۸-۵- تغییرات قطر ستون سنگی در مقابل BCR2 برای کارهای عددی انجام شده ----- ۱۲۷
- شکل ۱۹-۵- نمودار بار- نشست حاصل از تحلیل عددی برای ستون سنگی های بدون مسلح برای تحقیق حاضر -- ۱۲۸
- شکل ۲۰-۵- تغییرات L/D در مقابل BCR<sub>2</sub> برای کارهای عددی در پژوهش حاضر ----- ۱۲۳
- شکل ۲۱-۵- هندسه بستر خاک با ستون سنگی با مسلح کننده های افقی مدل شده در PLAXIS ----- ۱۳۱
- شکل ۲۲-۵- مش بندی بستر خاک با ستون سنگی با مسلح کننده افقی ----- ۱۳۲
- شکل ۲۳-۵- شکم دادگی ستون سنگی تحت بار قائم همراه با مسلح کننده افقی ----- ۱۳۳
- شکل ۲۴-۵- مقایسه تغییرات بار- نشست به دست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای ستون سنگی با مسلح کننده افقی ۱۳۴
- شکل ۲۵-۵- تغییرات بار نشست برای ستون سنگی با مسلح کننده افقی PGM14 در ارتفاعات مختلف ----- ۱۳۵
- شکل ۲۶-۵- تغییرات بار نشست برای ستون سنگی با مسلح کننده افقی TS40 در ارتفاعات مختلف ----- ۱۳۶
- شکل ۲۷-۵- تغییرات BCR<sub>2</sub> در مقابل  $L_0/L$  برای دو نوع مسلح کننده به صورت افقی ----- ۱۳۷
- شکل ۲۸-۵- طرح آزمایش روی ستون سنگی تک ----- ۱۴۰
- شکل ۲۹-۵- طرح آزمایش روی گروه ستون سنگی ----- ۱۴۰
- شکل ۳۰-۵- طرح نصب تجهیزات و بارگذاری روی ستون سنگی تک ----- ۱۴۱
- شکل ۳۱-۵- تغییرات بار- نشست ستون سنگی های تک با طول های مختلف ----- ۱۴۲
- شکل ۳۲-۵- تغییرات S/l در مقابل فشار وارده بر بستر رسی با ستون سنگی به قطر ۹۰ سانت و طول ۶/۶ متر --- ۱۴۳
- شکل ۳۳-۵- تغییرات S/l در مقابل فشار وارده بر بستر رسی با ستون سنگی به قطر ۹۰ سانت و طول ۴/۹ متر --- ۱۴۴
- شکل ۳۴-۵- تغییرات بار- نشست حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۹۰ سانت و طول ۶/۶ متر ----- ۱۴۷
- شکل ۳۵-۵- تغییرات بار- نشست حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۹۰ میلی متر و طول ۴/۹ متر ----- ۱۴۸
- شکل ۳۶-۵- تغییرات بار- نشست حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای ستون سنگی به قطر ۹۰ سانتی متر و طول ۱۲ متر ----- ۱۴۸
- شکل ۳۷-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۶۰ سانتی متر و طول ۳ متر ----- ۱۵۰

- شکل ۳۸-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی غیر مسلح به قطرهای ۶۰، ۸۰، ۹۰ سانتی متر و طول های ۴/۳، ۴، ۵ متر ----- ۱۵۱
- شکل ۳۹-۵- تغییرات بار- نشست برای بستر رسی بدون ستون سنگی با پی به قطر ۱/۸ متر ----- ۱۵۲
- شکل ۴۰-۵- مقایسه تغییرات  $BCR_2$  در مقابل قطر ستون سنگی برای ستون سنگی های غیر مسلح ----- ۱۵۳
- شکل ۴۱-۵- تغییرات بار- نشست ستون سنگی های غیر مسلح و مسلح شده با PGM14 به صورت قائم و تمام طول به قطر های ۶۰، ۸۰، ۹۰ سانتی متر و به طول های ۳، ۴، ۵/۴ متر ----- ۱۵۴
- شکل ۴۲-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی به قطر ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۳ متر مسلح شده به صورت نصف طول با PGM14 ----- ۱۵۵
- شکل ۴۳-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت نصف طول و تمام طول با PGM14 با قطر های ۶۰، ۸۰، ۹۰ سانتی متر ----- ۱۵۶
- شکل ۴۴-۵- تغییرات  $BCR_2$  در مقابل قطر برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت دورگرو نصف طول ----- ۱۵۷
- شکل ۴۵-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی به قطر ۸۰ سانتی متر و ارتفاع ۴ متر مسلح شده به صورت افقی با PGM14 با فواصل مسلح کننده ۵۰ سانتی متر و  $L_0/L$  برابر با ۱. ----- ۱۵۸
- شکل ۴۶-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت افقی به قطر ۸۰ سانتی متر و ارتفاع ۴ متر با نسبت های  $L_0/L$  مختلف و فواصل مسلح کننده ها ۵۰ سانتی متر ----- ۱۵۹
- شکل ۴۷-۵- مقایسه تغییرات  $BCR_2$  برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت افقی در مقابل  $L_0/L$  با فواصل مسلح کننده برابر با ۵۰ سانتی متر برای بررسی های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس ----- ۱۵۹
- شکل ۴۸-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۸۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر ----- ۱۶۱
- شکل ۴۹-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی های غیر مسلح به قطر ۸۰، ۱۰۰ سانتی متر و طول های ۱۰ متر ----- ۱۶۲
- شکل ۵۰-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت قائم و تمام طول به قطر ۱ متر و طول ۱۰ با سه نوع مسلح کننده ----- ۱۵۷
- شکل ۵۱-۵- تغییرات مقاومت مسلح کننده در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت قائم و تمام طول به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر ----- ۱۶۴
- شکل ۵۲-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با فواصل مسلح کننده یک متر و  $L_0/L$  برابر با ۱ ----- ۱۶۵
- جدول ۵۳-۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر یک متر و طول ۱۰ متر با فواصل مسلح کننده یک متر و  $L_0/L$  برابر با ۱ ----- ۱۶۶
- شکل ۵۴-۵- مقایسه تغییرات مقاومت مسلح کننده در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی های مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر به فواصل مسلح کننده ۱ متر و  $L_0/L$  برابر با ۱ و ستون سنگی مسلح شده به صورت قائم و تمام طول ----- ۱۶۷



- جدول ۵-۵۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۸۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر با سه زاویه اصطکاک داخلی مختلف شن ----- ۱۶۸
- جدول ۵-۵۶- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی شن در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۸۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر ----- ۱۶۹
- جدول ۵-۵۷- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با سه زاویه اصطکاک داخلی مختلف شن ----- ۱۷۰
- جدول ۵-۵۸- مقایسه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی شن در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۱۰۰ و ۸۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر ----- ۱۷۱
- جدول ۵-۵۹- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی مسلح شده به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با TS80 به فواصل مسلح کننده ۱ متر و  $L_0/L$  برابر با ۱ ----- ۱۷۲
- شکل ۵-۶۰- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با TS80 با فواصل مسلح کننده مختلف و  $L_0/L$  برابر با ----- ۱۷۳
- شکل ۵-۶۱- تغییرات  $BCR_2$  در مقابل U/L برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با  $L_0/L$  برابر با ۱ ----- ۱۷۳
- شکل ۵-۶۲- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر مسلح شده به صورت افقی با TS80 با فواصل مسلح کننده ۵۰ سانتی متر و  $L_0/L$  برابر با ۰/۷۵ ----- ۱۷۴
- شکل ۵-۶۳- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با TS80 با فواصل مسلح کننده مختلف و  $L_0/L$  برابر با ۰/۷۵ ----- ۱۷۵
- شکل ۵-۶۴- مقایسه تغییرات  $BCR_2$  در مقابل U/L برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با  $L_0/L$  برابر با ۰/۷۵ و ۱ ----- ۱۷۶
- شکل ۵-۶۵- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با TS80 با فواصل مسلح کننده مختلف و  $L_0/L$  برابر با ۰/۵ ----- ۱۷۷
- شکل ۵-۶۶- مقایسه تغییرات  $BCR_2$  در مقابل U/L برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با  $L_0/L$  برابر با ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ ----- ۱۷۸
- شکل ۵-۶۷- تغییرات بار- نشست برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با TS80 با فواصل مسلح کننده مختلف و  $L_0/L$  برابر با ۰/۳۳ ----- ۱۷۹
- شکل ۵-۶۸- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با لایه سخت ----- ۱۸۱

- شکل ۶۹-۵- تغییرات  $E_b/E$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر ----- ۱۸۲
- شکل ۷۰-۵- مقایسه تغییرات  $E_b/E$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با PGM14 به صورت دورگیر و تمام طول و ستون سنگی غیر مسلح ----- ۱۸۳
- شکل ۷۱-۵- مقایسه تغییرات  $E_b/E$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح به صورت افقی به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با فواصل مسلح کننده ۵۰ سانتی متر و  $L_0/L$  برابر با ----- ۱۸۴
- شکل ۷۲-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی غیر مسلح به قطر یک متر و طول ۱۰ متر به فاصله انتهای ۱ متر از لایه سخت ----- ۱۸۵
- شکل ۷۳-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی غیر مسلح به قطر ۱ ----- ۱۸۶
- شکل ۷۴-۵- مش بندی محیط خاک و ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و طول ۹ متر با فواصل مسلح کننده ۵۰ سانتی متر ----- ۱۸۷
- شکل ۷۵-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر --- ۱۸۸
- شکل ۷۶-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و  $L_0/L$  برابر با ۰/۷۵ و  $U=50$  cm ----- ۱۸۹
- شکل ۷۷-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و  $L_0/L$  برابر با ۰/۵ و  $U=30$  cm ----- ۱۹۰
- شکل ۷۸-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح شده به صورت افقی با TS80 به قطر ۱ متر و  $L_0/L$  برابر با ۰/۳۳ و  $U=30$  cm ----- ۱۹۱
- شکل ۷۹-۵- تغییرات  $a/L$  در مقابل  $BCR_2$  برای ستون سنگی مسلح شده به صورت قائم با PGM14 به قطر ۱ متر و طول ۱۰ متر با PGM14 ----- ۱۹۲

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- خلاصه ای از روش های اصلاح خاک ----- ۳

- جدول ۱-۲- مشخصات مصالح مورد استفاده برای آزمایشات ----- ۳۴
- جدول ۲-۲- مشخصات شن مورد استفاده برای ستون سنگی ----- ۳۷
- جدول ۲-۳- مشخصات مصالح مصرف شده برای مسلح سازی ستون سنگی ----- ۳۸
- جدول ۲-۴- مشخصات رس مورد استفاده برای بستر ستون سنگی ----- ۳۹
- جدول ۵-۲- مشخصات رس مورد استفاده برای آزمایشات ستون سنگی ----- ۴۳
- جدول ۲-۶- مشخصات مصالح مورد استفاده برای بستر و شن ستون سنگی ----- ۴۵
- جدول ۱-۳- مشخصات رس مورد استفاده در آزمایشات ----- ۶۸
- جدول ۲-۳- مشخصات شن مورد استفاده در آزمایشات ----- ۶۹
- جدول ۳-۳- مشخصات ژئوتکستایل های مورد استفاده در آزمایشات ----- ۷۳
- جدول ۴-۳- برنامه آزمایشات انجام شده داخل مخزن کوچک ----- ۷۴
- جدول ۵-۳- برنامه آزمایشات انجام شده داخل مخزن بزرگ ----- ۷۷
- جدول ۱-۴- درصد افزایش ظرفیت باربری ستون های سنگی مسلح شده و مسلح نشده نسبت به بستر رسی بدون ستون سنگی ----- ۱۰۲
- جدول ۱-۵- مقدار پارامترهای مورد استفاده در تحلیل ----- ۱۰۸
- جدول ۲-۵- مشخصات رس بستر وارد شده در PLAXIS ----- ۱۱۰
- جدول ۲-۵- مشخصات شن ستون سنگی وارد شده در PLAXIS ----- ۱۱۱
- جدول ۳-۵- مشخصات ژئوتکستایل مورد استفاده در مدلسازی عددی ----- ۱۲۷
- جدول ۴-۵- مشخصات رس وارد شده در PLAXIS ----- ۱۴۷
- جدول ۵-۵- مشخصات شن ستون سنگی وارد شده در PLAXIS ----- ۱۴۸
- جدول ۶-۵- مقدار زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع شن مورد استفاده در مدلسازی عددی ----- ۱۷۱
- جدول ۷-۵- مشخصات لایه سخت قرار گرفته در انتهای ستون سنگی ----- ۱۸۴

# فصل اول

## مقدمه و کلیات