



دانشگاه گجرات
دانشکده مهندسی
گروه عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

تأثیر ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای

حسین جلیلیان عاملی

استاد راهنما: آقای دکتر بلوری

استاد مشاور: آقای دکتر غفوری

شهریور ۱۳۹۰

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۱
فصل دوم: تحقیقات انجام شده بر روی ظرفیت باربری پی‌های مسلح	۵
۱-۲ مقدمه	۵
۲-۲ مطالعات انجام گرفته با الیاف‌ها و نوارهای فلزی	۱۱
۱-۲-۱ اثر دانسیته خاک	۱۳
۲-۲-۲ اثر طول نوارهای تسلیح (b) بر ظرفیت باربری	۱۳
۳-۲ مطالعات انجام گرفته با ژئوتکستایل	۱۵
۴-۲ مطالعات انجام گرفته با ژئوگرید	۱۶
۵-۲ خلاصه نتایج	۲۷
۱-۵-۲ مقایسه عملکرد ژئوتکستایل با ژئوگرید در تسلیح خاک	۲۷
۲-۵-۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی محققین	۲۸
۳-۵-۲ رابطه BCRu با BCRS	۳۰
۴-۵-۲ مکانیسم گسیختگی پی‌های خاک مسلح	۳۰
فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی	۳۲
۱-۳ مقدمه	۳۲
۲-۳ خاک انتخابی	۳۳
۳-۳ مخزن خاک	۳۴
۴-۳ قاب عکس‌العملی صلب	۳۷

- ۳-۵ جک هیدرولیکی ۳۷
- ۳-۶ نیروسنج و کرنش سنج ۳۸
- ۳-۷ پی مورد استفاده در آزمایشات ۴۰
- ۳-۸ ژئوگرید ۴۱
- ۳-۹ روش انجام آزمایشات ۴۲
- ۳-۹-۱ آماده کردن خاک ۴۲
- ۳-۹-۲ قرار گرفتن لایه ژئوگرید بر روی خاک ۴۳
- ۳-۹-۳ استقرار پی بر روی خاک ۴۴
- ۳-۹-۴ قرار گرفتن نیروسنج و کرنش سنج بر روی پی ۴۴
- ۳-۹-۵ اعمال بارگذاری ۴۵
- ۳-۱۰ ثبت نتایج ۴۵
- فصل چهارم: آشنایی با نرم افزار PLAXIS** ۴۶
- ۴-۱ مقدمه ۴۶
- ۴-۲ تحلیل کرنش مسطح و تقارن محوری ۴۷
- ۴-۳ عناصر محیط خاکی یا سنگی ۴۷
- ۴-۴ وزن و شتاب ثقل ۴۸
- ۴-۵ واحدها ۴۸
- ۴-۶ رسم هندسه ۴۸
- ۴-۶-۱ نقاط و خطوط ۴۹
- ۴-۶-۲ المان تیر ۴۹

- ۵۰..... ۳-۶-۴ ژئوگریدها
- ۵۱..... ۷-۴ شرایط مرزی و بارها
- ۵۱..... ۱-۷-۴ گیرداری استاندارد
- ۵۲..... ۲-۷-۴ بارهای گسترده
- ۵۲..... ۸-۴ مدل کردن رفتار خاک
- ۵۲..... ۱-۸-۴ مدل الاستیک خطی
- ۵۲..... ۲-۸-۴ مدل موهر-کولمب
- ۵۴..... ۱-۲-۸-۴ ضریب تغییر شکل
- ۵۵..... ۲-۲-۸-۴ نسبت پواسون
- ۵۶..... ۳-۲-۸-۴ چسبندگی
- ۵۶..... ۳-۲-۸-۴ زاویه اصطکاک داخلی
- ۵۶..... ۳-۲-۸-۴ زاویه اتساع
- ۵۷..... ۳-۸-۴ مدل خاک با رفتار سخت‌شونده
- ۵۹..... ۴-۸-۴ مدل خاک با رفتار نرم‌شونده
- ۶۰..... ۵-۸-۴ مدل خاک نرم خزشی
- ۶۰..... ۹-۴ تحلیل با مدل‌های مختلف
- ۶۰..... ۱۰-۴ مراحل مدل‌سازی
- ۶۳..... فصل پنجم: شرح و نتایج پژوهش
- ۶۳..... ۱-۵ مقدمه
- ۶۴..... ۲-۵ مدل‌سازی آزمایشگاهی

۶۵	۳-۵ نتایج مدل سازی آزمایشگاهی
۶۷	۴-۵ مدل سازی عددی
۷۰	۵-۵ کالیبره کردن مدل
۷۲	۶-۵ مدل سازی سری اول
۷۷	۷-۵ مدل سازی سری دوم
۸۱	۸-۵ مدل سازی سری سوم
۸۴	۹-۵ توسعه مدل برای یافتن اثرات پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری
۸۵	۱-۹-۵ تاثیر مدول الاستیسیته بر ظرفیت باربری خاک مسلح
۸۹	۲-۹-۵ تاثیر زاویه اصطکاک بر ظرفیت باربری خاک مسلح
۹۲	۳-۹-۵ تاثیر مقاومت چسبندگی بر ظرفیت باربری خاک مسلح
۹۷	۴-۹-۵ تاثیر مقاومت کششی ژئوگرید بر ظرفیت باربری خاک مسلح
۱۰۱	فصل نهم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۱	۱-۶ مقدمه
۱۰۱	۲-۶ هدف از انجام پروژه و نتیجه گیری
۱۰۲	۳-۶ پیشنهادات
۱۰۳	مراجع

فصل دوم: تحقیقات انجام شده بر روی ظرفیت باربری پی‌های مسلح

- شکل ۱-۲ پارامترهای هندسی سیستم پی خاک مسلح..... ۷
- شکل ۲-۲ فرم کلی منحنی بار-نشست برای پی واقع بر خاک مسلح نشده و مسلح شده ۷
- شکل ۳-۲ تغییرات BCRu بر حسب u/B ۱۰
- شکل ۴-۲ تغییرات BCRu بر حسب d/B ۱۰
- شکل ۵-۲ نسبت ظرفیت باربری نهایی بر حسب تعداد لایه‌های مسلح کننده..... ۱۲
- شکل ۶-۲ سطوح لغزشی محتمل در یک سیستم پی خاک مسلح ۱۵
- شکل ۷-۲ تغییرات BCR در برابر مسلح کننده‌ها، $h/B=0.25$ ، $u/B=0.5$ ، $b/B=3$ ، (b) $b/B=2$ ، (a) ۱۶
- شکل ۸-۲ تغییرات BCR در برابر عرض مسلح کننده‌ها، $N=2$ ، $h/B=0.25$ ، $u/B=0.5$ ۱۷
- شکل ۹-۲ تغییرات BCRu و BCRs در مقابل u/B ۱۸
- شکل ۱۰-۲ تغییرات BCRu در مقابل B ۱۹
- شکل ۱۱-۲ تغییرات BCR در مقابل d/B ، $(u/B=h/B=0.333, b/B=10)$ ۲۰
- شکل ۱۲-۲ تغییرات BCR در مقابل b/B ، $(u/B=h/B=0.333, N=6)$ ۲۱
- شکل ۱۳-۲ تغییرات BCR در مقابل u/B ، $(h/B=, b/B=4.5, N=4)$ ۲۳
- شکل ۱۴-۲ تغییرات BCR در مقابل سختی مسلح کننده ها $(u/B=0.3, b/B=4.5, N=3)$ ۲۳
- شکل ۱۵-۲ تغییرات BCRu در مقابل d/B و D_f/B ۲۶

فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی

- شکل ۱-۳ منحنی دانه بندی ماسه مورد آزمایش ۳۴
- شکل ۲-۳ مخزن نگهدارنده خاک ۳۵

- شکل ۳-۳ نماهای مختلف مخزن نگهدارنده ۳۶
- شکل ۳-۴ مخزن ساخته شده برای نگهداری خاک ۳۶
- شکل ۳-۵ قاب عکس العملی صلب ۳۷
- شکل ۳-۶ مقاطع اعضا قاب صلب ۳۸
- شکل ۳-۷ تابلو Data logger جهت تنظیم جک هیدرولیکی ۳۸
- شکل ۳-۸ جک هیدرولیکی برای اعمال نیرو به نمونه ۳۹
- شکل ۳-۹ نیرو سنج با ظرفیت ۲ تن ۳۹
- شکل ۳-۱۰ کرنش سنج دیجیتال ۴۰
- شکل ۳-۱۱ مقطع پی فولادی ۴۰
- شکل ۳-۱۲ نمایی از پی واقع بر ماسه ۴۱
- شکل ۳-۱۳ ژئوگرید برای مسلح کردن خاک ۴۲
- شکل ۳-۱۴ مخزن و کوبه تراکم ۴۳
- شکل ۳-۱۵ نحوه فرار گرفتن لایه ژئوگرید بر روی خاک ۴۴
- شکل ۳-۱۶ نحوه فرار گرفتن نیروسنج و کرنش سنج بر روی پی ۴۵

فصل چهارم: آشنایی با نرم افزار PLAXIS

- شکل ۴-۱ کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری ۴۷
- شکل ۴-۲ موقعیت گره‌ها در عناصر ۶ گرهی و ۱۵ گرهی ۴۸
- شکل ۴-۳ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان تیر ۳ و ۵ گرهی ۵۰
- شکل ۴-۴ کاربردهایی از ژئوگرید ۵۰
- شکل ۴-۵ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان ژئوگرید ۵ و ۳ گرهی ۵۱

- شکل ۴-۶ نمودار تنش- کرنش مدل موهر-کولمب با رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک ۵۳
- شکل ۴-۷ پوسته جاری شدن معیار موهر-کولمب در فضای تنش‌های اصلی ۵۴
- شکل ۴-۸ نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش ۵۵
- شکل ۴-۹ دایره تنش موهر به همراه منحنی پوش کولمب ۵۶
- شکل ۴-۱۰ نحوه محاسبه E_{oed}^{ref} در آزمایش تک محوری ۵۸
- شکل ۴-۱۱ رابطه لگاریتمی بین کرنش حجمی و تنش میانگین ۵۹
- شکل ۴-۱۲ نمای شماتیک پی در نرم‌افزار Plaxis ۶۲

فصل پنجم: شرح و نتایج پژوهش

- شکل ۵-۱ نمودار بار-نشست پی نواری بر روی خاک غیر مسلح ۶۵
- شکل ۵-۲ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح شده با یک لایه ژئوگرید ۶۶
- شکل ۵-۳ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح شده با ۲ لایه ژئوگرید ۶۶
- شکل ۵-۴ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح شده با ۳ لایه ژئوگرید ۶۷
- شکل ۵-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک غیر مسلح ۶۸
- شکل ۵-۶ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح با یک لایه ژئوگرید ۶۸
- شکل ۵-۷ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح با ۲ لایه ژئوگرید ۶۹
- شکل ۵-۸ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح با ۳ لایه ژئوگرید ۶۹
- شکل ۵-۹ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS در خاک غیر مسلح ۷۰
- شکل ۵-۱۰ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS در خاک مسلح شده با ۱ لایه ژئوگرید ۷۱
- شکل ۵-۱۱ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS در خاک مسلح شده با ۲ لایه ژئوگرید ۷۱
- شکل ۵-۱۲ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS در خاک مسلح شده با ۳ لایه ژئوگرید ۷۲

- شکل ۱۳-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=0.2$) ۷۳
- شکل ۱۴-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=0.3$) ۷۳
- شکل ۱۵-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=0.4$) ۷۴
- شکل ۱۶-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=0.6$) ۷۴
- شکل ۱۷-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=0.8$) ۷۵
- شکل ۱۸-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ($u/B=1.0$) ۷۵
- شکل ۱۹-۵ نمودار ظرفیت باربری -نشست پی نواری بر روی خاک مسلح، تست سری اول ۷۶
- شکل ۲۰-۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری - نسبت تغییر مکان ۷۷
- شکل ۲۱-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=1$) ۷۷
- شکل ۲۲-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=2$) ۷۸
- شکل ۲۳-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=3$) ۷۸
- شکل ۲۴-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=4$) ۷۹
- شکل ۲۵-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=5$) ۷۹
- شکل ۲۶-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=6$) ۸۰
- شکل ۲۷-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری دوم ($N=7$) ۸۰
- شکل ۲۸-۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری در مقابل تعداد لایه های ژئوگرید ۸۱
- شکل ۲۹-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری سوم ($b/B=3$) ۸۲
- شکل ۳۰-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری سوم ($b/B=5$) ۸۲
- شکل ۳۱-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری سوم ($b/B=7$) ۸۳
- شکل ۳۲-۵ نمودار ظرفیت باربری - نشست، تست سری سوم ($b/B=9$) ۸۳

- شکل ۳۳-۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری-نسبت عرض، تست سری سوم ۸۴
- شکل ۳۴-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست با $E=8000 \text{ kPa}$ ۸۵
- شکل ۳۵-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست با $E=10000 \text{ kPa}$ ۸۵
- شکل ۳۶-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست با $E=12000 \text{ kPa}$ ۸۶
- شکل ۳۷-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست با $E=14000 \text{ kPa}$ ۸۶
- شکل ۳۸-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست با $E=16000 \text{ kPa}$ ۸۷
- شکل ۳۹-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای مدول الاستیسیته‌های مختلف ۸۸
- شکل ۴۰-۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری-مدول الاستیسیته ۸۸
- شکل ۴۱-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $f=30$ ۸۹
- شکل ۴۲-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $f=33$ ۸۹
- شکل ۴۳-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $f=36$ ۹۰
- شکل ۴۴-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $f=39$ ۹۰
- شکل ۴۵-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $f=42$ ۹۱
- شکل ۴۶-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای زوایای اصطکاک داخلی مختلف ۹۱
- شکل ۴۷-۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری-زاویه اصطکاک داخلی ۹۲
- شکل ۴۸-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=0.001 \text{ kPa}$ ۹۳
- شکل ۴۹-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=0.01 \text{ kPa}$ ۹۳
- شکل ۵۰-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=0.1 \text{ kPa}$ ۹۴
- شکل ۵۱-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=0.5 \text{ kPa}$ ۹۴
- شکل ۵۲-۵ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=1.0 \text{ kPa}$ ۹۵

- شکل ۵-۵۳ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $c=1.5 \text{ kPA}$ ۹۵
- شکل ۵-۵۴ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای مقاومت چسبندگی‌های مختلف ۹۶
- شکل ۵-۵۵ نمودار نسبت ظرفیت باربری-نشست برای مقاومت چسبندگی‌های مختلف ۹۶
- شکل ۵-۵۶ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=0.5 \text{ kPA}$ ۹۷
- شکل ۵-۵۷ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=1.0 \text{ kPA}$ ۹۷
- شکل ۵-۵۸ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=2.0 \text{ kPA}$ ۹۸
- شکل ۵-۵۹ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=4.0 \text{ kPA}$ ۹۸
- شکل ۵-۶۰ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=8.0 \text{ kPA}$ ۹۹
- شکل ۵-۶۱ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای $EA=16.0 \text{ kPA}$ ۹۹
- شکل ۵-۶۲ نمودار ظرفیت باربری-نشست برای مقاومت کششی‌های مختلف ژئوگرید ۱۰۰
- شکل ۵-۶۳ نمودار نسبت ظرفیت باربری در مقابل مقاومت کششی‌های مختلف ژئوگرید ۱۰۰

فصل دوم: تحقیقات انجام شده بر روی ظرفیت باربری پی‌های مسلح

جدول ۱-۲ خلاصه نتایج محققین در خصوص ظرفیت باربری پی‌های سطحی بر روی ماسه مسلح..... ۲۹

فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی

جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه ماسه شل ۳۳

جدول ۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه ماسه متراکم ۳۳

جدول ۳-۳ پارامترهای مقاومتی خاک ۳۳

جدول ۴-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید ۴۱

فصل چهارم: آشنایی با نرم افزار PLAXIS

جدول ۱-۴ مشخصات پی به کار رفته در مدل‌سازی ۶۱

جدول ۲-۴ پارامترهای مقاومتی خاک ۶۱

فصل پنجم: شرح و نتایج پژوهش

جدول ۱-۵ پارامترهای مقاومتی خاک ۶۴

جدول ۲-۵ مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید ۶۴

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

استفاده از خاک در ساخت سازه های مختلف در تمام ادوار متداول بوده است. خاک همیشه به عنوان ارزانه ترین مصالح ساختمانی مورد توجه بوده و برای ایجاد بناها، راهها و ... مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه نیز از خاک در احداث سازه های مهمی مانند سدهای خاکی، خاکریزها و غیره استفاده می شود. با توجه به وسعت و بزرگی سازه های خاکی واضح است که احداث این سازه ها هزینه های زیادی را در بر دارد و لذا تضمین پایداری بلند مدت و قابلیت بهره برداری در طول دوره طرح از موضوعات حیاتی در احداث این سازه ها می باشد. از اینجا می توان به اهمیت خصوصیات مصالحی که در ساخت آنها به کار می روند پی برد. یکی از نقاط ضعف خاک، ضعیف بودن مقاومت کششی آن بوده که این وجه تمایز آن با فولاد و تا حدی با بتن می باشد. لذا بهبود این مشخصه خاک همواره مورد توجه طراحان بوده و روش های زیادی تا بحال برای این منظور به کار گرفته شده است که یکی از این روش ها استفاده از تکنیک خاک مسلح می باشد.

خاک مسلح مصالحی مرکب از خاک و مسلح کننده ها است. مسلح کننده ها اجزایی مقاوم در برابر نیروهای کششی بوده که به شکل میله، نوار، شبکه، پارچه و ... از فلزات یا الیاف های مصنوعی ساخته می شوند. مکانیسم تسلیح خاک شباهت بسیاری با بتن مسلح دارد که در آن فولاد نقش المان کششی و بتن نقش فشاری را ایفا می کند.

تاکنون تحقیقات وسیعی بر روی قابلیت کاربرد و اثرات سودمند استفاده از خاک مسلح در کارهای مختلف ژئوتکنیکی صورت گرفته است. روش‌های تسلیح خاک تا حد زیادی گسترش یافته‌اند به طوری‌که در حال حاضر در اکثر پروژه‌های بزرگ به عنوان یک روش اقتصادی در کنار سایر گزینه‌ها مطرح هستند.

در ابتدا برای تسلیح خاک^۱ از مسلح‌کننده‌های فلزی استفاده می‌شد. اما به دلیل اینکه این مصالح تحت تاثیر شرایط محیطی خاک همواره در معرض خوردگی قرار داشتند عملکرد بلند مدت آن‌ها مورد سوال بوده است. لذا به مرور استفاده از مسلح‌کننده‌های ساخته شده از الیاف‌های مصنوعی (ژئوسینتتیک‌ها) برای تسلیح خاک مرسوم شد. مزیت عمده این محصولات پلیمری که از مشتقات نفت ساخته می‌شوند فسادناپذیری در اثر عوامل محیطی و قابلیت انعطاف‌پذیری زیاد آن‌ها می‌باشد. در مورد این مصالح نیز مسئله دوام و عملکرد بلند مدت خیلی مهم است و تحقیقات زیادی در این باره انجام شده است.

در سال ۱۹۶۶ اولین دیوار آزمایشی که از پلیمرهای حاوی الیاف شیشه ساخته شده بود پس از گذشت ده ماه فرو ریخت. این گسیختگی که ظاهراً ناشی از ضعف شیمیایی محصول و حمله باکتری‌ها بود موجب گردید که استفاده از مسلح‌کننده‌های آلومینیومی و فولادی زنگ نزن در سازه‌های خاک مسلح متداول شود. ولی تجربه نشان داد که این فلزات نیز عملکرد مطلوبی نداشته و دارای مقاومت کافی در مقابل خوردگی نیستند. ضمن اینکه استفاده از فولاد زنگ نزن هزینه بالایی خواهد داشت. در حال حاضر در سازه‌های خاک مسلح عمدتاً از نوارهای فولادی گالوانیزه و یا مسلح‌کننده‌های پلیمری که عملکرد مناسب و دوام نسبتاً خوبی دارند استفاده می‌شود.

نوارهای فولادی آج‌دار در سال ۱۹۷۵ به جامعه مهندسی معرفی شدند. این تحول فنی نتیجه مستقیم تحقیقاتی است که در مورد اندرکنش اصطکاکی خاک و مسلح‌کننده‌ها انجام گردیده است. آج‌ها باعث افزایش تاثیر انبساط پذیری مقید شده خاک می‌شوند و در نتیجه کارایی توده خاک مسلح را افزایش می‌دهند. استفاده از مسلح‌کننده‌های پلیمری در اوایل دهه ۸۰ با پیشرفت‌هایی که در زمینه تولید این مواد حاصل گردید شروع شد و در حال حاضر انواع مختلفی از این محصولات به طور گسترده در پروژه‌های خاک مسلح به کار می‌روند. استفاده از تکنیک خاک مسلح برای بهبود ظرفیت باربری پی‌های

سطحی مسئله‌ای است که اولین بار توسط محققین مطرح شد و مورد بررسی قرار گرفت [Binquet and Lee., 1975]. آن‌ها برای تسلیح خاک از نوارهای آلومینیومی استفاده کردند.

تا کنون مقالات مختلفی در زمینه تسلیح خاک با استفاده از مواد ژئوسینتتیکی در مجلات و نشریات معتبر به چاپ رسیده است. اکثر این مقالات شامل مطالعات پارامتریک و تاثیر آنها بر ظرفیت باربری پی‌های مختلف واقع بر خاک‌های غیر چسبنده می‌باشد. مطالعات انجام شده هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تحلیلی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود است. نتایج بدست آمده از این تحقیقات همگی تایید کننده نقش قابل توجه مواد ژئوسینتتیکی بر افزایش خصوصیات مقاومتی خاک و صرفه اقتصادی بالای حاصل از به کارگیری این مصالح در پروژه‌های مختلف می‌باشد. متأسفانه به دلیل عدم شناخت دقیق و علمی کارفرمایان و مهندسين و نیز به دلیل کمبود و گرانی این مواد هنوز توسعه قابل توجهی در کشورمان نیافته و تنها در چند پروژه و آن هم به صورت محدود مورد استفاده قرار گرفته‌است. لزوم به کارگیری این مصالح با توجه به مزیت‌های زیادشان در پروژه‌های عمرانی اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. همچنین به دلیل کاربرد گسترده پی‌های نواری در پروژه‌های عمرانی، از این پی در مدل‌سازی استفاده شده است.

در فصل دوم به تحقیقات صورت گرفته تا کنون بر روی مسلح کننده‌ها پرداخته شده است. اکثر این تحقیقات آزمایشگاهی بوده و نتایج آن بر اساس نسبت ظرفیت باربری ارائه شده است. محققان اثرات پارامترهای مختلف بر روی ظرفیت باربری را مورد بررسی قرار دادند و مقادیر بهینه برای مسلح کننده‌ها را ارائه کردند که در این فصل به آن نیز اشاره شده است.

در فصل سوم مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی خاک مسلح شرح داده شده است. در این فصل ابتدا مطالعه بر روی وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی در دسترس بدلیل شناخت قابلیت‌ها و محدودیت‌های موجود در این تجهیزات و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها برای انجام آزمایشات بارگذاری و طراحی چیدمان^۱ آزمایشات که شامل انتخاب نوع، جنس، ابعاد و

موقعیت قرارگیری تجهیزاتی همچون قاب عکس‌العملی صلب، محفظه نگهدارنده خاک، جک هیدرولیکی، نیرو سنج^۱، کرنش سنج^۲ و دستگاه قرائت^۳ می باشد بطور کامل توضیح داده شده‌است.

در فصل چهارم این تحقیق شرح کاملی از نرم افزار المان محدود PLAXIS داده شده است زیرا برای بدست آوردن ظرفیت باربری نهایی پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای مسلح از ابتدا نیاز به داشتن برنامه‌ای کامل و جامع احساس می‌شد، چرا که نتایج حاصل از برنامه اجزای محدود PLAXIS و همچنین نتایج عملیات آزمایشگاهی به نوعی با یکدیگر وابستگی داشته و تعیین تقدم انجام یکی بر دیگری بسیار مهم بود. همچنین در این فصل مدل‌سازی به صورت مرحله به مرحله توضیح داده شده است.

در فصل پنجم نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل‌سازی عددی ارائه شده است. جهت بررسی صحت مدل‌سازی اقدام به کالیبره کردن مدل با نمونه ساخته شده در آزمایشگاه شد. پس از بررسی نمودارها به این نتیجه رسیدیم که می‌توان با دقت نسبتاً خوبی به نتایج مدل‌سازی عددی اعتماد کنیم. در مرحله بعد سه سری مدل‌سازی برای به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری انجام شده است. در هر مرحله با ثابت در نظر گرفتن چند پارامتر و متغیر گرفتن یک پارامتر اثر آن پارامتر بر روی ظرفیت باربری خاک مسلح را بررسی کردیم و در نهایت به مقادیر بهینه برای هر پارامتر رسیدیم. همچنین برای توسعه مدل اقدام به بررسی تاثیر پارامترهای مقاومتی خاک و مسلح کننده بر روی ظرفیت باربری خاک شد این عمل بر روی مدل بهینه بدست آمده از نرم افزار PLAXIS انجام گرفت.

در فصل ششم این تحقیق نتایج به دست آمده و مقادیر بهینه برای هر پارامتر ارائه شده است و همچنین پیشنهاداتی نیز برای ادامه تحقیقات بر روی خاک مسلح به منظور بررسی نقش ژئوگرید بر ظرفیت باربری داده شده است.

1. Load cell
2. Strain gauge
3. Data logger

فصل دوم

مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی ظرفیت باربری پی‌های مسلح

۱-۲ مقدمه

با شناختی که از عملکرد مسلح کننده‌ها در دیوارهای نگهبان، شیب‌ها، خاکریزها و راه‌ها به دست آمده است توجه محققین به این مسئله جلب شد که می‌توان خاک زیر پی‌های سطحی را با استفاده از مسلح کننده‌ها تقویت کرد. بعضی از محققین مطالعه سیستماتیکی بر روی ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر بسترهای خاک مسلح انجام دادند. آن‌ها از نوارهای فلزی برای تسلیح خاک ماسه‌ای واقع در زیر پی استفاده کردند. بر پایه نتایج به دست آمده از این تحقیق آزمایشگاهی، این محققین یک روش تحلیلی برای بررسی رفتار پی‌های خاک مسلح^۱ ارائه کردند که در نهایت منجر به یک روش طراحی کلاسیک برای پی‌های نواری متکی بر خاک مسلح شده با نوارهای فلزی شد [Binquet and Lee, 1975].

در یک تحلیل اقتصادی، بهبود به دست آمده از روش پیشنهادی توسط بینکوئیت و لی، در مقایسه با سایر روش‌ها قابل توجه بود. اما وقتی مسئله خوردگی مسلح کننده‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفت، توجه اقتصادی این روش مورد تردید قرار گرفت. با کاربرد ژئوسینتتیک‌ها (ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و...) به عنوان مسلح کننده خاک، مشکل خوردگی تقریباً برطرف شد. ولی ارزیابی میزان افزایش باربری و روش تحلیل و طراحی نیازمند تحقیقات بیشتری است. مطالعات در این راستا همچنان ادامه دارد.

هر چند در مقایسه با سایر کاربردهای خاک مسلح شده با ژئوسینتتیک‌ها^۱ تاکنون تأکید نسبتاً کمتری بر روی بسترهای خاک مسلح بوده است، اما تحقیقات نشان داده است که ساخت پی‌های خاک مسلح^۲ برای تحمل بارهای اعمال شده، نسبت به سایر روش‌های مرسوم اصلاح خاک، هزینه کمتری دارد. در این تکنیک برای ایجاد یک تکیه گاه مناسب برای پی‌ها، یک یا چند لایه مسلح کننده ژئوسینتتیک درون یک خاکریز مناسب قرار داده می‌شود.

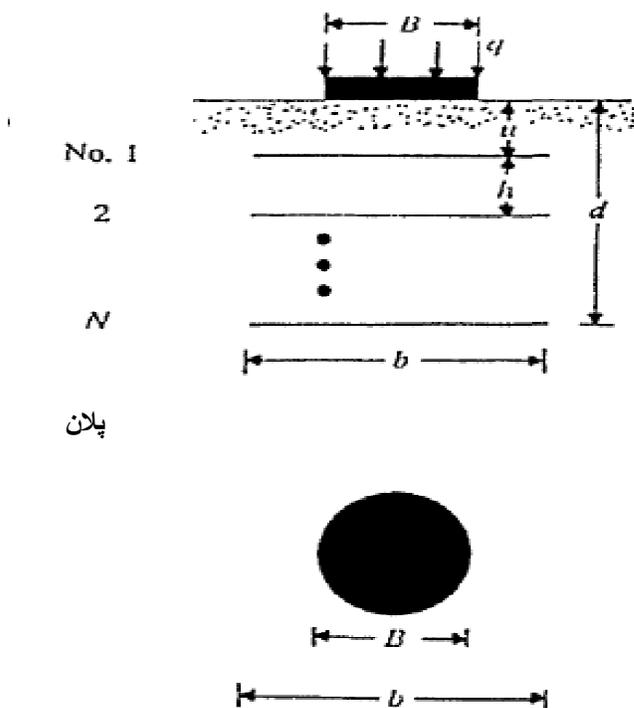
تاکنون مطالعات تجربی متعددی بر روی این موضوع توسط محققین انجام گرفته است. اکثر این تحقیقات بر روی مدل‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس^۳ و در موارد محدودی نیز آزمایش‌ها بر روی مدل‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس^۴ انجام شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل‌های کوچک مقیاس به طور کیفی ثابت کرده‌اند که قرار دادن یک مسلح کننده ژئوسینتتیک در خاک زیر پی، می‌تواند هم ظرفیت باربری نهایی و هم ظرفیت باربری مجاز در یک نشست مشخص را افزایش دهد. اما به علت وجود ضعف‌های متعدد در مدل کردن رفتار واقعی پی‌های خاک مسلح به وسیله مدل‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی، این روش هنوز در عمل بکار گرفته نشده است.

شکل ۱-۲ یک پی سطحی به قطر B واقع بر یک توده خاک مسلح را به طور شماتیک نشان می‌دهد [Shukla, 2002]. این توده خاک به وسیله N لایه مسلح کننده که ابعاد هر لایه $b \times 1$ می‌باشد تسلیح شده است. اولین لایه مسلح کننده در عمق u از زیر پی قرار دارد و فاصله قائم لایه‌های مسلح کننده برابر با h می‌باشد. عمق کلی تسلیح را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

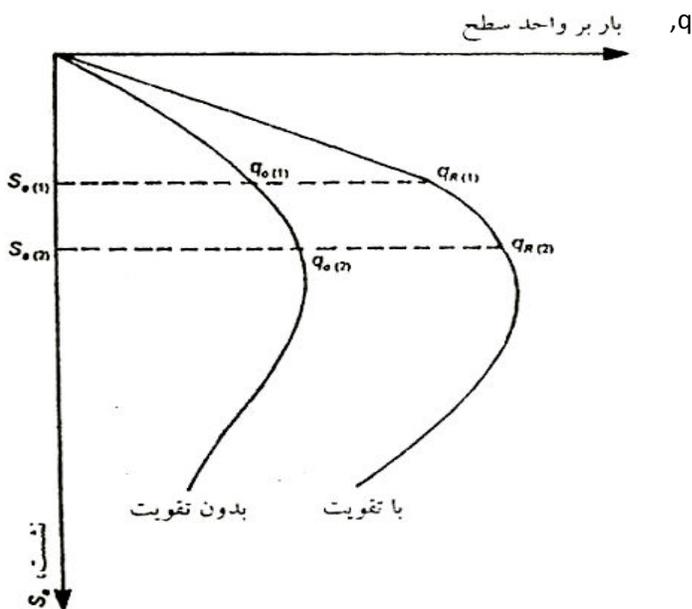
$$d = u + (N-1)h \quad (1-2)$$

عموماً برای مقادیر u, h, d, l و b مشخص، منحنی‌های بار-نشست برای یک پی سطحی واقعی بر خاک مسلح نشده و مسلح شده به صورت شکل ۲-۲ خواهد بود. براساس این شکل، افزایش در ظرفیت باربری ناشی از مسلح کننده‌ها را می‌توان به صورت ضرایب بی‌بعد زیر بیان کرد [Shukla, 2002]:

-
1. Geosynthetic Reinforced Soil
 2. RSFs: Reinforced Soil Foundations
 3. Small Scale Models
 4. Large Scale Models



شکل ۱-۲ پارامترهای هندسی سیستم پی خاک مسلح [Shukla, 2002]



شکل ۲-۲ فرم کلی منحنی بار-نشست برای پی واقع بر خاک مسلح نشده و مسلح شده [Das, 1994]

$$BCR_u = \frac{q_{u(R)}}{q_u} \quad (2-2)$$

$$BCR_s = \frac{q_R}{q_0} \quad (3-2)$$

توضیح روابط فوق به صورت زیر است:

BCR_u : نسبت ظرفیت باربری در حالت نهایی

BCR_s : نسبت ظرفیت باربری در نشست داده شده S

q_0, q_R : بار وارد بر واحد سطح پی (در یک تراز نشست S کمتر یا مساوی S_u) به ترتیب در حالت خاک مسلح شده و خاک مسلح نشده.

$q_0, q_{u(R)}$: ظرفیت باربری نهایی پی به ترتیب در حالت خاک مسلح شده و خاک مسلح نشده.

براساس مطالعاتی که تاکنون انجام شده است پارامترهای مؤثر بر افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح عبارتند از:

- ۱- فاصله اولین لایه مسلح کننده از زیر پی (u)
- ۲- فاصله قائم بین لایه‌های مسلح کننده (h)
- ۳- تعداد لایه های مسلح کننده (N) یا عمق کلی تسلیح (d)
- ۴- ابعاد لایه های مسلح کننده (l, b)
- ۵- شکل و ابعاد پی (L, B)
- ۶- نوع خاک و مشخصات آن
- ۷- نوع مسلح کننده (از نظر مقاومت کششی، مدول، بافت سطحی و...)

برای بررسی تأثیر این پارامترها، غالباً آن‌ها را به صورت نسبت‌های بدون بعد بیان می‌کنند و می‌توان به صورت زیر

نوشت [Shukla, 2002]: