

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده عمران

رساله دکتری

رشته و گرایش:

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

عنوان:

بررسی تجربی رفتار مخلوط خاک و خرده لاستیک مسلح شده با
چند لایه ژئوسل تحت بارگذاری تکراری

استاد راهنما:

دکتر سید ناصر مقدس تفرشی

دانشجو:

امید خلیج

شماره دانشجویی:

۸۷۰۰۰۳۶

اردیبهشت ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم و تشکر

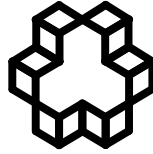
شکر خدا که هر چه طلب کردم از او، بر منتهای همت خود کامران شدم و سپاس خدایی را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

آمزش می‌خواهم برادرم را به پاس محبت‌های بی‌دریغش که جایش میان بازوانم خالیست، در شب‌های آرامشش، سهم من تنهایی است و در دل من فقط آرزوی دیدن دوباره‌اش باقیست. قدردانی از همسر مهربانم که با قلبی آکنده از عشق و محبت، محیطی سرشار از سلامت، آرامش و آسایش را برای من فراهم آورد، همدلی که مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می‌رساند و در این مدت همراه و همگام من بوده است.

سپاس پدر و مادر عزیزم را که سرآغاز تولد من بودند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند. از یکی زاده گشتم و از دیگری جاودانه. به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی، عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان است و قلب‌های بزرگشان که فریادرس است.

و اگر همکاری، کمک‌ها و حمایت‌های همه‌جانبه جناب آقای دکتر تورج امیرسلیمانی و همکاران عزیزم در شرکت مهندسین مشاور ماندرو نبود، بی‌شک انجام این رساله مقدور نمی‌گردید. و با تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته، فرزانه، صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر سید ناصر مقدس تفرشی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند، زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند و همواره راهنما و راهگشای اینجانب در اتمام این رساله بوده‌اند.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.



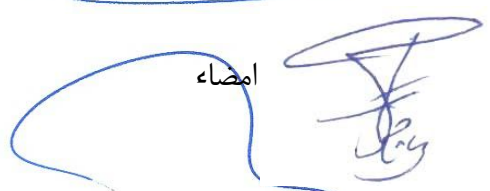

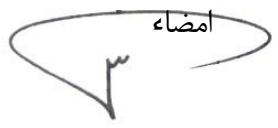



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

تأییدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: **بررسی تجربی رفتار مخلوط خاک و خرده لاستیک مسلح شده با چند لایه ژئوسل تحت بارگذاری تکراری** توسط آقای امید خلیج صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته: **مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی (ژئوتکنیک)** مورد تأیید قرار میدهند.

- | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------|-----------------------------------|
|  | امضاء | آقای دکتر سید ناصر مقدس تفرشی | ۱- استاد راهنما |
|  | امضاء | آقای دکتر سید مجدالدین میر محمد حسینی | ۲- ممتحن خارجی |
|  | امضاء | آقای دکتر علی فاخر | ۳- ممتحن خارجی |
|  | امضاء | آقای دکتر سید امیرالدین صدرنژاد | ۴- ممتحن داخلی |
|  | امضاء | آقای دکتر محمودرضا عبدی | ۵- ممتحن داخلی |
|  | امضاء | آقای دکتر محمودرضا عبدی | ۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده |



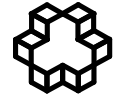
شماره:

تاریخ:

اظهارنامه دانشجو

اینجانب امید خلیج دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه با عنوان بررسی تجربی رفتار مخلوط خاک و خرده لاستیک مسلح شده با چند لایه ژئوسل تحت بارگذاری تکراری تحت راهنمایی استاد محترم دکتر سید ناصر مقدس تفرشی، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می نمایم 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 (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:
تاریخ: ۱۳۹۲/۲/۲۳



شماره:

تاریخ:

فرم حق طبع و 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 باموافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

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

چکیده

در رساله حاضر به منظور بررسی رفتار بستر مسلح با چندلایه ژئوسل و همچنین ترکیب لایه‌های ژئوسل و لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی و سیکی نسبتاً جامعی روی صفحه بارگذاری به قطر ۳۰۰ میلی‌متر انجام شده‌است. آزمایش‌ها در ترانشه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر در پلان و ۷۰۰ میلی‌متر در ارتفاع، حفر شده در زمین طبیعی، صورت گرفته‌است. ژئوسل دارای ابعاد چشمه ۱۱۰×۱۱۰ میلی‌متر، ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و خرده‌های لاستیک از نوع دانه‌ای بوده‌است. ضخامت بهینه پوشش خاک روی اولین لایه ژئوسل و فاصله بهینه بین لایه‌های ژئوسل صرفنظر از نوع بارگذاری (استاتیکی یا سیکی) حدود ۰/۲ قطر صفحه بارگذاری و درصد بهینه خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک حدود ۸٪ وزنی مخلوط بدست آمدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های استاتیکی مبین افزایش باربری و کاهش نشست صفحه بارگذاری با افزایش میزان تسلیح (ژئوسل یا مخلوط خاک و خرده‌لاستیک) است. همچنین نتایج آزمایش‌های سیکی تحت ۱۵ سیکل از دو تراز تنش ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال مبین توسعه نشست‌های مفرط و ایجاد شرایط ناپایدار در بستر غیرمسلح است، در حالیکه تسلیح بستر با لایه‌های ژئوسل و مخلوط خاک و خرده‌لاستیک ضمن کاهش نشست بستر (کاهش نشست‌های پلاستیک و افزایش نشست‌های الاستیک) موجب ایجاد شرایط پایدار در نشست بستر می‌گردد. به‌طورکلی تحت هر دو نوع بارگذاری، رفتار بستر مسلح با لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک در ترکیب با ژئوسل در مقایسه با رفتار بستر مسلح با لایه‌های ژئوسل تنها بهبود می‌یابد. به عنوان مثال، در آزمایش‌های استاتیکی، در نسبت نشست ۲٪ ($s/D=0.2$) مقادیر نسبت باربری بستر مسلح به بستر غیرمسلح به ترتیب برای بستر مسلح با سه لایه ژئوسل و بستر مسلح با ترکیب سه لایه ژئوسل و سه لایه مخلوط خاک و خرده‌لاستیک برابر ۲/۳ و ۳ است. همچنین تسلیح بستر، با توجه به فراهم نمودن امکان پخش بیشتر بار در عمق بستر، موجب کاهش مقادیر تنش در مقایسه با بستر غیرمسلح می‌گردد، که این کاهش با قرارگیری لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک در زیر لایه‌های ژئوسل افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، در آزمایش بارگذاری سیکی تحت تراز تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال بسته به تعداد لایه‌های تسلیح، میزان فشار در عمق ۳۵۰ میلی‌متر زیر سطح بارگذاری در بستر مسلح در حدود ۵۸٪ تا ۶۸٪ مقادیر متناظر در بستر غیرمسلح است. در مجموع استفاده از ترکیب ژئوسل و خرده‌لاستیک علاوه بر افزایش باربری بستر و کاهش نشست آن، می‌تواند از نقطه نظر استفاده از لاستیک‌های فرسوده و مسائل زیست محیطی در پروژه‌های عملی بسیار مفید باشد.

کلمات کلیدی: ژئوسل چندلایه، مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، بستر راه، ظرفیت باربری، نشست، بارگذاری سیکی، آزمایش بارگذاری صفحه، تغییرشکل الاستیک و پلاستیک.

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
	فصل اول: کلیات
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- ضرورت انجام تحقیق
۳	۳-۱- معرفی موضوع و اهداف تحقیق
۵	۴-۱- دامنه، قلمرو و محدودیت‌های تحقیق
۶	۵-۱- ساختار رساله
	فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته
۷	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- تسلیح خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها
۸	۱-۲-۲- ژئوسل‌ها
۱۱	۲-۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه تسلیح خاک با ژئوسل
۱۱	۱-۲-۲-۲- مطالعات Rajagopal و همکاران (۱۹۹۹)
۱۵	۲-۲-۲-۲- مطالعات Dash و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۸)
۲۱	۳-۲-۲-۲- مطالعات Dawson و Moghaddas Tafreshi (۲۰۱۰a)
۲۴	۴-۲-۲-۲- مطالعات Dawson و Moghaddas Tafreshi (۲۰۱۰b)
۲۸	۵-۲-۲-۲- مطالعات Boushehrian و همکاران (۲۰۱۱)
۳۰	۶-۲-۲-۲- مطالعات Yang و همکاران (۲۰۱۲)
۳۲	۷-۲-۲-۲- مطالعات Thakur و همکاران (۲۰۱۲)
۳۵	۸-۲-۲-۲- مطالعات Tanyu و همکاران (۲۰۱۳)

- ۳۷-۳-۲- استفاده از مخلوط خاک و خرده لاستیک در مهندسی ژئوتکنیک
- ۳۸-۳-۲-۱- ویژگی‌های خرده لاستیک‌ها
- ۳۹-۳-۲-۱-۱- خواص محیطی
- ۴۰-۳-۲-۱-۲- فرسایش خرده لاستیک‌ها
- ۴۱-۳-۲-۱-۳- رفتار مکانیکی مخلوط خاک و خرده لاستیک
- ۴۴-۳-۲- مطالعات انجام شده در زمینه مخلوط خرده لاستیک و خاک
- ۴۵-۳-۲-۱- مطالعات Foose و همکاران (۱۹۹۶)
- ۴۶-۳-۲-۲- مطالعات Bosscher و همکاران (۱۹۹۷)
- ۴۷-۳-۲-۳- مطالعات Feng و Sutter (۲۰۰۰)
- ۴۸-۳-۲-۴- مطالعات Zheng و Sutter (۲۰۰۰)
- ۵۲-۳-۲-۵- مطالعات Youwai و Bergado (۲۰۰۳)
- ۵۵-۳-۲-۶- مطالعات Gotteland و همکاران (۲۰۰۵)
- ۵۶-۳-۲-۷- مطالعات Hataf و Rahimi (۲۰۰۶)
- ۵۷-۳-۲-۸- مطالعات Attom (۲۰۰۶)
- ۵۹-۳-۲-۹- مطالعات Lee و همکاران (۲۰۰۷)
- ۶۲-۳-۲-۱۰- مطالعات Moghaddas Tafreshi و Norouzi (۲۰۱۲)
- ۶۶-۳-۲-۱۱- مطالعات Edincliler و Cagatay (۲۰۱۳)
- ۶۷-۴-۲- نتیجه گیری
- فصل سوم: مشخصات مصالح، نحوه آماده‌سازی، روش انجام و برنامه آزمایش‌ها
- ۷۰-۱-۳- مقدمه
- ۷۰-۲-۳- ترانسه آزمایش
- ۷۲-۳-۳- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک

۷۵	۴-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوسل
۷۶	۵-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خرده لاستیک
۷۸	۶-۳- روش آماده‌سازی خاک
۸۳	۷-۳- سیستم بارگذاری و میزان بار وارده
۸۴	۸-۳- ابعاد صفحه بارگذاری و تنش وارد بر آن
۸۶	۹-۳- ابزارهای اندازه‌گیری
۸۷	۹-۳-۱- ابزار اندازه‌گیری نیرو
۸۷	۹-۳-۲- ابزار اندازه‌گیری نشست صفحه بارگذاری
۸۸	۹-۳-۳- ابزار اندازه‌گیری فشار
۹۱	۱۰-۳- آماده‌سازی بستر مسلح و غیرمسلح
۹۳	۱۱-۳- برنامه تحقیق و آزمایش‌ها
۹۵	۱۱-۳-۱- برنامه آزمایش‌های استاتیکی
۹۶	۱۱-۳-۲- برنامه آزمایش‌های سیکلی
۹۷	۱۲-۳- تکرارپذیری نتایج
فصل چهارم: آزمایش‌های استاتیکی و تحلیل نتایج	
۱۰۰	۱-۴- مقدمه
۱۰۰	۲-۴- نتایج آزمایش‌های خاک مسلح با ژئوسل
۱۰۰	۲-۴-۱- ضخامت پوشش خاک روی اولین لایه تسلیح (u)
۱۰۳	۲-۴-۲- ضخامت بهینه خاک غیر مسلح بین دو لایه مسلح‌کننده (h/D)
۱۰۶	۲-۴-۳- اثر تعداد لایه‌های ژئوسل
۱۱۰	۲-۴-۴- اثر تعداد لایه‌های ژئوسل بر توزیع تنش در عمق بستر

- ۱۱۴ ۳-۴- نتایج آزمایش‌های ترکیب لایه‌های مخلوط خاک و خرده لاستیک با لایه‌های ژئوسل
- ۱۱۴ ۱-۳-۴- درصد بهینه ترکیب خاک و خرده لاستیک
- ۱۱۶ ۲-۳-۴- تاثیر لایه مخلوط خاک و خرده لاستیک بر بهبود رفتار بستر مسلح با ژئوسل
- ۱۱۹ ۳-۳-۴- تاثیر ترکیب لایه مخلوط خاک و خرده لاستیک و ژئوسل بر توزیع فشار در بستر

فصل پنجم: آزمایش‌ها سیکلی و تحلیل نتایج

- ۱۲۲ ۱-۵- مقدمه
- ۱۲۲ ۲-۵- نتایج آزمایش‌های روی بستر مسلح با ژئوسل
- ۱۲۲ ۱-۲-۵- ضخامت بهینه پوشش خاک روی لایه تسلیح (u)
- ۱۲۵ ۲-۲-۵- ضخامت بهینه خاک بین دو لایه ژئوسل (h/D)
- ۱۲۷ ۳-۲-۵- اثر تعداد لایه ژئوسل بر نشست کل و نشست پلاستیک بستر
- ۱۳۲ ۴-۲-۵- اثر تعداد لایه ژئوسل بر نشست الاستیک بستر
- ۱۳۴ ۵-۲-۵- اثر تعداد لایه ژئوسل بر توزیع فشار زیر سطح بارگذاری
- ۱۳۷ ۳-۵- نتایج آزمایش‌ها روی بستر مسلح با ترکیب توام لایه‌های ژئوسل و لایه‌های مخلوط خاک و خرده لاستیک با لایه‌های ژئوسل
- ۱۳۷ ۱-۳-۵- تاثیر ترکیب لایه‌های ژئوسل و لایه‌های مخلوط خاک و خرده لاستیک بر نشست بستر
- ۱۴۳ ۲-۳-۵- تاثیر ترکیب لایه‌های ژئوسل و لایه‌های مخلوط خاک و خرده لاستیک بر توزیع فشار در عمق بستر

فصل ششم: نتیجه‌گیری، تفسیر نتایج و ارائه پیشنهادات

۱۴۶	۱-۶- مقدمه
۱۴۶	۲-۶- خلاصه نتایج آزمایش‌ها
۱۴۹	۳-۶- تفسیر نتایج
۱۵۳	۴-۶- پیشنهادات و توصیه‌ها جهت تحقیقات آینده
۱۵۵	منابع و مراجع

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

بهبود در رفتار خاک تحت انواع مختلف بارگذاری نظیر بارهای استاتیکی و تکراری از دیرباز یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌آید. اگرچه در این خصوص روش‌های مختلفی توسط محققین مطرح شده‌است، اما در این میان استفاده از ژئوسنتتیک‌ها و محصولات حاصل از مواد لاستیکی نظیر تایرهای فرسوده، از جمله روش‌های نوین برای دستیابی به این مقصود به شمار می‌آیند. در چند دهه اخیر مفهوم مصالح مرکب توسعه یافته و پتانسیل بالای آنها به‌عنوان مصالح مهندسی بیش از پیش شناخته شده‌است. موفقیت اساسی مصالح ترکیبی در آن است که هر یک از اجزا که به صورت منفرد ممکن است یک خاصیت را دارا باشند، در ترکیب با دیگر مصالح، ضمن پوشاندن عیوب احتمالی یکدیگر، می‌توانند مصالحی با خواص مفیدتر ایجاد نمایند.

امروزه استفاده از مصالح ساخته شده از منسوجات پلیمری به نام ژئوسنتتیک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک توسعه گسترده‌ای یافته‌اند. ژئوسل‌ها یا همان مسلح‌کننده‌های سه‌بعدی نیز به‌عنوان یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها جهت تسلیح خاک زیر پی‌ها، بستر راه‌ها، شیروانی‌ها و ... مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند (e.g., Lambert et al., 2011; Boushehrian et al., 2011; Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2012; Chen et al., 2013; Leshchinsky and Ling, 2013; Tanyu et al., 2013).

از طرفی با توسعه جوامع بشری و استفاده از وسایل نقلیه مختلف، بازیافت لاستیک‌های فرسوده به دلیل مسائل زیست محیطی، اهمیت زیادی یافته‌است. خرده‌لاستیک‌های بازیافتی از لاستیک‌های فرسوده به دلیل خاصیت تسلیح و خاصیت ارتجاعی زیاد و ظرفیت میرایی بالا کاربرد فراوانی در سازه‌های خاکی پیدا کرده‌اند. استفاده از مخلوط خرده‌لاستیک و خاک در بستر پی‌ها، بستر راه و راه‌آهن و یا بستر سازه‌های در معرض زلزله به منظور کاهش پیامدهای ناشی از بارهای دینامیکی و

کاهش تغییرشکل‌های ماندگار در بستر توصیه شده‌است. (e.g., Humphrey et al., 1993; Lee et al., 1999; Özkul and Baykal, 2007; Valdes and Matthew, 2008; Consoli et al., 2009; Tanchaisawat et al., 2010; Lee et al., 2010; Tavakoli et al., 2012; Thakur et al., 2012; Yang et al., 2012; Leshchinsky and Ling, 2013)

اگرچه مطالعات متعددی در خصوص استفاده از خرده‌لاستیک و همچنین استفاده از ژئوسل‌ها به طور مجزا جهت بهبود باربری خاک انجام شده است، اما تا به حال مطالعه‌ای در خصوص بررسی (۱) رفتار خاک مسلح با ژئوسل لایه‌ای (ژئوسل در چند لایه) و (۲) رفتار توام ترکیب خاک مسلح با ژئوسل و خرده‌لاستیک انجام نگرفته است. از این رو در تحقیق حاضر استفاده از ژئوسل لایه‌ای و عملکرد توام آن در ترکیب با لایه‌های مخلوط خاک-خرده‌لاستیک تحت بارهای استاتیکی و بارهای تکراری نظیر چرخ و سائل نقلیه، مدنظر است. با توجه به خواص ژئوسل و خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک، این تحقیق بر آن است تا با انجام مطالعات تجربی تاثیر تسلیح با ژئوسل و مخلوط خاک و خرده‌لاستیک را مورد بررسی قرار دهد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

ساخت پی یا خاکریز جاده بر روی بستر خاک نرم، به علت پایین بودن ظرفیت باربری معمولاً سبب بروز گسیختگی بستر توام با نشست زیاد می‌گردد (شکل ۱-۱-الف)، به طوریکه این امر همواره به عنوان یک مسئله چالش برانگیز در مهندسی ژئوتکنیک مطرح است. در این خصوص ممکن است راه‌های مختلفی برای کاهش نشست و افزایش باربری بستر در نظر گرفته شود. از جمله این راه‌ها می‌توان به خاکبرداری بستر نرم و جایگزینی با مصالح مناسب‌تر و استفاده از روش‌های گوناگون تثبیت خاک (تثبیت با آهک، سیمان، قیر و ...) و تراکم خاک بستر جاده اشاره کرد.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۱- (الف) نشست سطح بستر راه، (ب) تسلیح بستر با ژئوسل

تمامی روش‌های مذکور ممکن است بسته به حجم عملیات، مواد تثبیت‌کننده و نوع خاک پر هزینه و یا غیرعملی باشند. در این میان استفاده از تسلیح خاک جهت افزایش باربری و کاهش نشست بستر می‌تواند به عنوان یک راه حل مناسب مورد نظر قرارگیرد (شکل ۱-۱-ب). در این تحقیق استفاده از ژئوسل لایه‌ای و مخلوط خاک و خرده‌لاستیک جهت بهبود باربری بستر و جلوگیری از نشست‌های مفرط و همچنین شناخت جنبه‌های مختلف عملکرد آنها مدنظر است.

۱-۳- معرفی موضوع و اهداف تحقیق

تسلیح خاک با استفاده از ژئوسل و همچنین مخلوط خاک و خرده لاستیک به عنوان یک راه حل مناسب توسط محققین مختلف بررسی شده‌است. استفاده از ژئوسل و مخلوط خاک خرده لاستیک به دلایل ذیل می‌تواند حائز اهمیت باشد:

- در صورت قرارگیری لایه ژئوسل و خاک داخل آن، در معرض بارهای وارده، به علت فراهم شدن تنش‌های مقاوم در دیواره‌های ژئوسل، مقاومت برشی و در نتیجه ظرفیت باربری مجموعه افزایش می‌یابد. از طرفی با تسلیح بستر با ژئوسل، کاهش نشست بستر و در نتیجه کاهش تنش انتقال یافته به عمق آن مورد انتظار است.
- ذرات خاک در مقایسه با ذرات لاستیک صلب و دارای خاصیت شکل‌پذیری ناچیزی می‌باشند، به طوریکه ضمن استهلاک میزان کم انرژی، بخش عمده انرژی را منتقل می‌کنند. در مقابل

میرایی و قابلیت جذب انرژی مناسب خرده‌لاستیک (به دلیل اصطکاک سطحی و همچنین تغییرشکل آن)، موجب استهلاک بخش عمده‌ای از انرژی وارده می‌گردد. بدین ترتیب با کاربرد مخلوط خاک و خرده لاستیک، انتظار افزایش ظرفیت جذب انرژی و در نتیجه کاهش میزان تغییرشکل بستر و تنش در عمق بستر در مقایسه با بستر حاوی خاک تنها وجود دارد.

- در بسیاری از موارد کاربرد خرده لاستیک‌ها در پروژه‌های عمرانی و قرارگیری آنها در معرض عوامل محیطی نظیر هوا و نور، سبب بروز مشکلات فراوانی نظیر مشتعل شدن و فرسودگی آنها می‌گردد (Collins et al., 2002). همچنین قابل اشتعال بودن، تغییرشکل‌پذیری زیاد و مشکلات تراکم از اصلی‌ترین موانع استفاده از خرده‌لاستیک تنها می‌باشد (Edinliler et al., 2010; Youwai and Bergado, 2003). از این رو استفاده از ترکیب خرده‌لاستیک و خاک، نه تنها موجب بهبود کیفیت رفتار بستر و افزایش مقاومت برشی آن می‌گردد، بلکه مشکل اشتعال خرده‌لاستیک با اضافه شدن خاک به آن برطرف می‌گردد.

با توجه به موارد فوق تسلیح خاک با مخلوط خاک-خرده لاستیک و ژئوسل می‌تواند به عنوان یک راه‌حل مناسب مطرح گردد. از آنجا که استفاده از ژئوسل با ضخامت (ارتفاع) زیاد، با توجه به محدودیت تولید آن توسط شرکت‌های تولید کننده مقدور نمی‌باشد و همچنین دستیابی به تراکم مناسب خاک در عمق چشمه‌های آن تقریباً غیرممکن است (باتوجه به بررسی‌های انجام شده توسط نگارنده این رساله)، لذا استفاده از چند لایه ژئوسل با ضخامت‌های متعارف جهت تسلیح بستر و همچنین استفاده توأم از لایه‌های ژئوسل و لایه‌های مخلوط خاک-خرده لاستیک می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی مدنظر قرارگیرد. از این رو در این رساله عملکرد بستر مسلح با ژئوسل چند لایه و ترکیب آن با لایه‌های مخلوط خاک-خرده لاستیک، تحت بارهای استاتیکی و سیکی نظیر حرکت چرخ و سائل نقلیه جهت دستیابی به جنبه‌های مختلف رفتاری مورد بررسی قرار گرفته است. بدیهی است رساله حاضر تنها به عنوان یک تحقیق بنیادی جهت بررسی رفتار بستر مسلح با ژئوسل و

مخلوط خاک و خرده لاستیک می‌باشد و کاربرد آن در پروژه‌های واقعی بایستی با توجه به تاثیر عوامل مختلف، نوع مصالح مدنظر قرار گیرد.

۱-۴- دامنه، قلمرو و محدودیت‌های تحقیق

در این تحقیق اهمیت و کاربرد تسلیح خاک با ژئوسل چند لایه و مخلوط خاک و خرده لاستیک تحت اثر بارهای استاتیکی و تکراری بررسی شده است. اگرچه نتایج حاصل از این تحقیق قابل استفاده در پروژه‌های عملی می‌باشد، اما مانند هر مطالعه میدانی دیگر، نتایج آن باید در قلمرو مورد نظر و باتوجه به محدودیت‌های خاص خود به کار رود. از این رو توجه به نکات ذیل ضروری می‌باشد:

- نتایج تجربی حاصل از این تحقیق، تنها برای یک نوع خاک، یک نوع ژئوسل با اندازه چشمه‌ها و ارتفاع مشخص، یک نوع و یک اندازه خرده لاستیک با مشخصات مورد نظر بدست آمده است.
- مدل آزمایشگاهی به شکل سه‌بعدی با مقیاس بزرگ می‌باشد و مصالح، ابعاد مدل و جزئیات انجام آزمایش بر اساس استانداردهای مربوطه انتخاب شده‌اند.
- از آنجاکه آزمایش‌های استاتیکی و ابعاد صفحه بارگذاری براساس استاندارد ASTM D1196-12 می‌باشند، لذا نتایج آن را می‌توان برای پی با ابعاد بزرگتر استفاده نمود.
- آزمایش‌های بارگذاری سیکلی براساس استاندارد ASTM D1195-09 انجام شده‌اند. از آن جا که استاندارد AASHTO T221 انجام بارگذاری تکراری صفحه را به عنوان معیار تعیین پارامترهای خاک و شناخت رفتار بستر راه پیشنهاد می‌نماید و همچنین (Weissman 1999) و (Kim and Tutumluer 2005) انجام آزمایش بارگذاری سیکلی روی صفحه معادل را به عنوان جایگزین بارگذاری ترافیک وسائل نقلیه توصیه می‌نمایند، از اینرو نتایج آزمایش‌های سیکلی در تحقیق حاضر، باتوجه به انتخاب ابعاد صفحه بارگذاری بر اساس سطح تماس معادل چرخ وسائل نقلیه سنگین، می‌توانند در موارد عملی بخصوص در مورد بستر راه تحت

بار ترافیک و سائل نقلیه، مورد استفاده قرارگیرد. با این وجود به منظور بررسی دقیق تر و انطباق با شرایط واقعی در حالت بار ناشی از حرکت و سائل نقلیه، آزمایش بار چرخ توصیه می‌گردد.

- نتایج این تحقیق می‌تواند برای انجام مطالعات عددی و درک مفاهیم بیشتر از رفتار بستر بسیار مفید باشد.

۱-۵- ساختار رساله

فصول بعدی مورد بحث در این رساله، بطور خلاصه حاوی مطالب ذیل می‌باشد:

- فصل دوم: مروری اجمالی بر تحقیقات انجام شده در خصوص تسلیح خاک با ژئوسل و خرده‌لاستیک و تاثیر آن بر باربری و کاهش نشست بستر.
- فصل سوم: مشخصات مصالح، نحوه آماده‌سازی، روش انجام و برنامه آزمایش‌ها.
- فصل چهارم: آزمایش‌های استاتیکی و تحلیل نتایج.
- فصل پنجم: آزمایش‌های سیکلی و تحلیل نتایج.
- فصل ششم: نتیجه‌گیری، تفسیر نتایج و ارائه پیشنهادها برای مطالعات آتی.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

بهبود رفتار خاک با استفاده از انواع مسلح کننده‌ها از قبیل ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و ژئوسل‌ها توسط محققینی نظیر Lambert et al. (2011), Boushehrian et al. (2011), Moghaddas Tafreshi and Dawson (2012), Chen et al. (2013), Leshchinsky and Ling (2013), Tanyu et al. (2013) و همچنین با استفاده از محصولات حاصل از لاستیک‌های فرسوده توسط محققینی نظیر Edincliler and Ayhan (2010), Moghaddas Tafreshi and Norouzi (2012), Edincliler and Cagatay (2013) به طور مجزا بررسی شده است. از آنجا که در این رساله، استفاده از ژئوسل چندلایه و مخلوط خاک و خرده لاستیک جهت بهبود باربری خاک مورد نظر است، لذا در این فصل مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف در این دو زمینه بطور مجزا بررسی و هدف رساله حاضر بیان شده است.

۲-۲- تسلیح خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها

استفاده از پارچه‌گونه‌ها جهت ساخت جاده‌ها بر روی زمین‌های نرم به زمان رومیان باستان مربوط می‌شود. آنها در روشی مشابه تکنیک‌های امروزی با پهن نمودن حصیرها بر روی زمین باتلاقی، اقدام به پوشاندن آنها با سنگدانه نمودند. مطالعات باستان شناسان مبین آن است که حتی قبل از آن، یعنی از حدود ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد حضرت مسیح نیز قراردادن شاخه‌های درختان بر روی زمین‌های باتلاقی و نرم برای ساخت راه، متداول بوده است. همچنین در خاورمیانه و خاور دور جهت مسلح کردن سازه‌های خاکی حجیم از نی، بوریان، بامبو استفاده می‌کردند. همینطور مقاوم کردن خاک بوسیله کوبیدن شمع‌هایی از جنس درختان کرنا و بامبو در فواصل منظم در گل‌های ساحلی نرم هنوز هم یکی از عمده ترین تکنیک‌های کاربردی برای تثبیت پی ساختمان در کشورهای گرمسیری به

شمار می‌رود (Rankilor, 1981).

در مثال‌های مذکور، برای بهبود مقاومت بسترهای نرم از تکنیک تسلیح خاک با استفاده از انواع مختلف مواد طبیعی استفاده شده‌است. از سوی دیگر در چند دهه اخیر استفاده از مسلح‌کننده‌های ساخته شده از مواد پلیمری توسعه یافته است. این گروه از محصولات که جایگاه خاصی در تسلیح خاک پیدا نموده‌اند، ژئوسنتتیک^۱ نامیده می‌شوند. با استفاده از این محصولات، می‌توان از یک طرف اقدام به افزایش باربری و کاهش نشست بسترهای خاکی نمود و از سوی دیگر، قابلیت زهکشی آنها را تقویت نمود.

به طور کلی ژئوسنتتیک‌ها به گروه‌های مختلفی نظیر ژئوتکستایل‌ها^۲، ژئوگریدها^۳، ژئونت‌ها^۴، ژئوممبرین‌ها^۵، ژئوکامپوزیت‌ها^۶ و ژئوسل‌ها^۷ تقسیم می‌شوند. از آنجاکه در تحقیق حاضر، استفاده از ژئوسل جهت تسلیح رفتار خاک مدنظر است، لذا در ادامه ضمن تشریح ساختار ژئوسل و عملکرد آن در حین تسلیح خاک، تنها به مطالعات انجام شده در خصوص کاربرد ژئوسل پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- ژئوسل‌ها

در تسلیح خاک با مسلح‌کننده سه‌بعدی (ژئوسل)، المان‌های تسلیح بصورت عمودی و به شکل لانه‌زنبوری^۸ در خاک قرار می‌گیرند. این نوع مسلح‌کننده از مصالح انعطاف‌پذیر و نیمه انعطاف‌پذیر نظیر ژئوتکستایل‌ها یا ژئوگریدها ساخته می‌شوند. یکی از نخستین مطالعات در مورد استفاده از ژئوسل‌ها توسط مهندسين ارتش آمریکا در سپتامبر ۱۹۷۵ به منظور بررسی امکان ساخت پل روی زمین نرم انجام شد. آنها با انجام آزمایش‌های مختلف گزارش نمودند که ماسه محصور شده توسط ژئوسل، قابلیت خوبی در افزایش باربری زمین‌ها و در نتیجه کاهش تغییرشکل‌های بستر را دارند (شکل

^۱ Geosynthetics

^۲ Geotextiles

^۳ Geogrids

^۴ Geonets

^۵ Geomembranes

^۶ Geocomposites

^۷ Geocells

^۸ Cellular