

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

رشته‌ی مهندسی ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه‌ای بندر انزلی مسلح شده با ضایعات

پلاستیکی پلی اتیلن ترفتالات (PET) با استفاده از آزمایش CBR

نگارنده: محمدرضا کرمی

اساتید راهنما:

دکتر محسن کرامتی

دکتر رضا نادری

بهمن‌ماه ۱۳۹۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره در تمام مراحل زندگی، مشوق و پشتیبان بنده بوده اند.

و به تو

که بی آنکه نامت برده شود سخطه ای تنهایم نگذاشتی

سپاسگزاری

در اینجا لازم می‌دانم استادان عزیز و سخت‌کوش خود را سپاس فراوان گویم؛ استاد ارجمند جناب

آقای دکتر نادری و استاد کران قدر جناب آقای دکتر کرامتی که با همت فراوان و از خودگذشتگی در راستای

تجهیز آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود تلاش نمودند و زمینه‌ی گسترش تحقیقات آزمایشگاهی را بیش از پیش

فراهم آوردند و با دانش و تدبیرشان این پایان نامه به سرانجام رسید.

تعهدنامه

اینجانب **محمدرضا کرمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بررسی پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه‌ای بندر انزلی مسلح شده با ضایعات پلاستیکی پلی اتیلن ترفتالات (PET) با استفاده از آزمایش CBR تحت راهنمایی دکتر رضا نادری و دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به تولید روزافزون پسماندهای جامد، دغدغه‌ی بین‌المللی دفع یا بازیافت این مواد در جهان مطرح است. یکی از راه‌کارهای استفاده مجدد از پسماندهای جامد، استفاده از آن‌ها در مهندسی و بهسازی ساخت‌گاه‌ها یا زمین‌های سست است. هدف از انجام این پژوهش یافتن راهی برای استفاده مجدد نوعی خاص از پلاستیک‌ها (بطری‌های دوغ، نوشابه، آب معدنی و...) به همراه خاکستربادی در کارهای ژئوتکنیکی جهت بهسازی خاک است. در این پژوهش رفتار مکانیکی ماسه‌ی بندر انزلی که با اشکال مختلف ضایعات پلاستیکی (خرده‌ها، نوارها و صفحات پلاستیکی مشبک (Geopet)) به مقادیر متفاوت، همراه با خاکستربادی تسلیح و تثبیت شده است؛ مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه‌های دارای تراکم نسبی ۷۰ درصد و همچنین در حالت رطوبت بهینه بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است اگر چه خرده‌ها و نوارهای پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) موجب بهبود رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای شده‌اند، اما تاثیر تسلیح با Geopet بر بهبود رفتار مکانیکی خاک به مراتب بیشتر بوده است. همچنین به کارگیری خاکستربادی به عنوان تثبیت کننده همراه با Geopet تاثیر چشمگیری بر مقادیر CBR داشته است. حالت بهینه استفاده از این عناصر؛ Geopet با ابعاد اندازه چشمه ۱×۱ به صورت سه لایه به همراه ۱۵ درصد خاکستربادی در عمل‌آوری ۷ روزه به دست آمده است. مقایسه بین نمونه‌های مسلح و غیرمسلح نشان داد، در حالت بهینه مقدار CBR به میزان ۱۷۴/۹ درصد بهبود پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: ماسه‌ی بندر انزلی، تسلیح خاک، تثبیت خاک، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، نسبت

باربری کالیفرنیا (CBR)

۱- فصل اول:	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- بیان مسئله و اهمیت موضوع	۴
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق	۴
۱-۴- فرضیات تحقیق	۵
۱-۵- روش تحقیق	۵
۱-۶- ساختار پژوهش	۶
۲- فصل دوم:	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- راه‌حل‌های پیش رو در مواجهه با زمین‌های دارای خاک مسئله‌دار	۸
۲-۳- بهسازی خاک	۹
۲-۳-۱- بهسازی مکانیکی	۹
۲-۳-۲- بهسازی هیدرولیکی	۱۰
۲-۳-۳- بهسازی فیزیکی و شیمیایی	۱۰
۲-۳-۴- بهسازی با تکنیک‌های تقویت و محصور کردن خاک	۱۱
۲-۴- استفاده از ضایعات پلاستیکی در تسلیح خاک	۱۳
۲-۵- ضایعات پلاستیکی	۱۳
۲-۵-۱- مقدمه‌ای در مورد پلاستیک‌ها	۱۳
۲-۵-۲- مقدار تولید ضایعات پلاستیکی (PET) در جهان	۱۴

۱۵	 ۳-۵-۲ خواص PET
۱۷	 ۴-۵-۲ کاربردهای کلی و مشخصات PET
۱۸	 ۶-۲ مشکلات دفن ضایعات پلاستیک‌ها در یک مدفن زباله
۱۸	 ۷-۲ مشکلات سوزاندن ضایعات پلاستیک‌ها در کوره
۱۹	 ۱-۷-۲ بازیافت ضایعات پلاستیکی
۲۰	 ۸-۲ خاکستر بادی
۲۰	 ۱-۸-۲ تعریف خاکستر بادی
۲۱	 ۹-۲ پدیدآمدن خاکستر بادی
۲۲	 ۱-۹-۲ مقدار خاکستر بادی
۲۳	 ۲-۹-۲ موارد استفاده از خاکستر بادی
۲۳	 ۳-۹-۲ مزایای استفاده از خاکستر بادی
۲۴	 ۴-۹-۲ کاربرد خاکستر بادی در بهسازی خاک
۲۴	 ۵-۹-۲ بررسی تأثیر و عملکرد خاکستر بادی در محیط‌زیست طبق استاندارد EPA
۲۷	 ۶-۹-۲ تثبیت خاک با خاکستر بادی
۲۸	 ۱۰-۲ فعال‌سازها
۲۸	 ۱۱-۲ معرفی خانواده ژئوسنتتیک‌ها
۲۸	 ۱-۱۱-۲ مقدمه
۲۹	 ۲-۱۱-۲ تعریف ژئوسنتتیک‌ها
۳۰	 ۳-۱۱-۲ انواع ژئوسنتتیک‌ها
۳۴	 ۱۲-۲ مطالعات پیشین

۳۴	۱-۱۲-۲- بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک و مسلح کننده
۴۱	۲-۱۲-۲- بررسی تأثیر تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی
۵۱	۳- فصل سوم:
۵۲	۱-۳- مقدمه
۵۲	۲-۳- مصالح مصرفی
۵۲	۱-۲-۳- ماسه
۵۳	۲-۲-۳- PET
۵۴	۳-۲-۳- خاکستر بادی
۵۵	۴-۲-۳- فعال کننده قلیایی
۵۵	۳-۳- آزمایش‌های شناسایی خاک
۵۵	۱-۳-۳- آزمایش دانه‌بندی
۵۶	۲-۳-۳- آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد (Gs)
	۳-۳-۳- آزمایش‌های تجربی تعیین حداقل و حداکثر چگالی ماسه خشک (γ_d) جهت اعمال
۵۷	تراکم نسبی (D_r) ۷۰٪ بر نمونه خاک
۵۷	۴-۳-۳- آزمایش تراکم اصلاح شده
۵۸	۵-۳-۳- آزمایش‌های CBR
۵۸	۴-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش CBR در این پژوهش
۵۹	۱-۴-۳- تجهیزات آزمایش
۶۰	۵-۳- ساخت نمونه‌ها
۶۰	۱-۵-۳- ساخت نمونه‌های مسلح شده با خرده‌ها و نوارهای PET

۳-۵-۲	ساخت نمونه‌های مسلح شده با Geopet	۶۱
۳-۵-۳	ساخت نمونه‌های مسلح و تثبیت شده با Geopet و خاکستر بادی	۶۲
۴	فصل چهارم:	۶۵
۴-۱	مقدمه	۶۶
۴-۲	بررسی و تحلیل و نتایج آزمایش‌ها	۶۶
۴-۲-۱	نتایج آزمایش‌های تراکم اصلاح شده	۶۶
۴-۲-۲	نتایج آزمایش‌های CBR	۶۸
۴-۲-۳	تأثیر تسلیح خاک با Geopet بر مقادیر CBR	۷۱
۴-۲-۴	تأثیر تسلیح و تثبیت خاک با استفاده از Geopet و خاکستر بادی بر مقادیر CBR	۸۰
۴-۳	بررسی اثر فعال‌کننده بر عملکرد خاکستر بادی در تثبیت خاک ماسه‌ای	۸۸
۴-۴	بررسی اثر زمان و دمای عمل‌آوری	۹۰
۴-۵	جمع‌بندی فصل	۹۲
۵	فصل پنجم:	۹۵
۵-۱	مقدمه	۹۶
۵-۲	نتیجه‌گیری	۹۶
۵-۳	پیشنهادهای	۹۸
۶	منابع	۹۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ تراکم دینامیکی ۹
- شکل ۲-۲ اجرای ستون سنگی ۹
- شکل ۳-۲ اجرای فیلترهای تخلیه اضافه آب منفذی ۱۰
- شکل ۴-۲ بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک ۱۱
- شکل ۵-۲ بهسازی شیمایی خاک به وسیله آهک ۱۱
- شکل ۶-۲ نمای از اجرای نیلینگ ۱۲
- شکل ۷-۲ نمای از اجرای انکراژ ۱۲
- شکل ۸-۲ خاک مسلح شده با ضایعات پلاستیکی ۱۳
- شکل ۹-۲ ضایعات پلاستیکی ۱۴
- شکل ۱۰-۲ مدیریت ضایعات پلاستیکی در جهان از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۸ ۱۵
- شکل ۱۱-۲ فرایند بازیافت و تبدیل پلاستیک‌های ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد ۲۰
- ۲۰
- شکل ۱۲-۲ شکل ظاهری خاکستر بادی ۲۰
- شکل ۱۳-۲ روش انتقال خاکستر بادی ۲۱
- شکل ۱۴-۲ میزان تولید، استفاده و دفن خاکستر بادی در انگلستان ۲۲
- شکل ۱۵-۲ مقایسه میزان تولید و استفاده خاکستر بادی در کشورهای مختلف ۲۲
- شکل ۱۶-۲ موارد کاربرد خاکستر بادی ۲۳
- شکل ۱۷-۲ تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی ۲۸

- شکل ۲-۱۸ ژئوتکستایل بافته شده ۳۰
- شکل ۲-۱۹ دو نمونه از انواع ژئوگریدها (تک محوره و دو محوره) ۳۲
- شکل ۲-۲۰ تغییرات ابعاد بهینه تراشه‌های لاستیکی برحسب عرض تراشه‌ها ۳۶
- شکل ۲-۲۱ تغییرات نتایج CBR، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، برای درصدهای وزنی مختلف تکه‌های لاستیک ۳۸
- شکل ۲-۲۲ تغییرات نتایج CBR، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، برای درصدهای وزنی مختلف تکه‌های پلاستیک ۳۸
- شکل ۲-۲۳ مقایسه درصدهای رطوبت بهینه (MPa) و حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m^3) با تغییرات درصد وزنی پودر لاستیک‌ها ۳۹
- شکل ۲-۲۴ تغییرات تنش برحسب نفوذ سنبه برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر ۳۹
- شکل ۲-۲۵ تغییرات CBR برحسب درصد الیاف ۴۰
- شکل ۲-۲۶ تغییرات CBR در ماسه مسلح با الیاف ضایعات پلاستیکی ۴۰
- شکل ۲-۲۷ تأثیر درصد الیاف PET بر مقدار CBR ۴۱
- شکل ۳-۱ خاک ماسه‌ای مصرفی در این پژوهش ۵۳
- شکل ۳-۲ PET‌های مصرفی در این پژوهش الف: PET نواری، ب: PET خرده، ج: Geopet ۵۴
- شکل ۳-۳ الک‌های به کاررفته جهت آزمایش دانه‌بندی ۵۵
- شکل ۳-۴ منحنی دانه‌بندی ماسه بندر انزلی ۵۶
- شکل ۳-۵ منحنی تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی ۵۸
- شکل ۳-۶ سیستم بارگذاری ۵۹
- شکل ۳-۷ شماتیک قرارگیری Geopet در قالب CBR ۶۱

- شکل ۳-۸ نحوه قرارگیری Geopet در قالب CBR ۶۳
- شکل ۳-۹ عمل آوری نمونه‌ها در دمای محیط ۶۳
- شکل ۴-۱ منحنی تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی ۶۶
- شکل ۴-۲ منحنی‌های تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی مخلوط شده با درصد‌های مختلف خاکستر بادی ۶۷
- شکل ۴-۳ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از خرده PET (در حالت خشک ($Dr=70\%$)) ۶۹
- شکل ۴-۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای PET (در حالت خشک ($Dr=70\%$)) ۶۹
- شکل ۴-۵ تغییرات CBR در ماسه مسلح با الیاف PET ۷۰
- شکل ۴-۶ تأثیر درصد خرده PET بر CBR ۷۱
- شکل ۴-۷ نمودار نیرو - نفوذ نمونه مرجع در حالت خشک ($Dr=70\%$) ۷۳
- شکل ۴-۸ نمودار نیرو-نفوذ نمونه مرجع در حالت رطوبت بهینه ۷۴
- شکل ۴-۹ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با 1×1 Geopet (در حالت خشک ($Dr=70\%$)) ۷۵
- شکل ۴-۱۰ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با 2×2 Geopet (در حالت خشک ($Dr=70\%$)) ۷۵
- شکل ۴-۱۱ نمودار نیرو - نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با 3×3 Geopet (در حالت خشک ($Dr=70\%$)) ۷۶
- شکل ۴-۱۲ نمودار نیرو - نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با 1×1 Geopet (در حالت رطوبت بهینه) ۷۶

- شکل ۴-۱۳ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 (در حالت رطوبت بهینه) ۷۷
- شکل ۴-۱۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 (در حالت رطوبت بهینه) ۷۷
- شکل ۴-۱۵ نمایی از درگیری دانه‌های خاک با ژئوگرید ۷۹
- شکل ۴-۱۶ مقایسه مقادیر CBR در نمونه‌های مختلف خاک ۷۹
- شکل ۴-۱۷ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۱
- شکل ۴-۱۸ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۱
- شکل ۴-۱۹ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۲
- شکل ۴-۲۰ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۲
- شکل ۴-۲۱ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۳
- شکل ۴-۲۲ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۳
- شکل ۴-۲۳ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۴
- شکل ۴-۲۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه

۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۴

شکل ۴-۲۵ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه

۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه ۸۵

شکل ۴-۲۶ مقایسه مقادیر CBR در حالت بهینه استفاده از Geopet در سه درصد وزنی خاکستر

بادی ۸۷

شکل ۴-۲۷ نتایج آزمایش‌های CBR برای نمونه‌های مسلح و تثبیت شده با ژئونت و خاکستر بادی

در پژوهش موتولاکشمی و همکاران ۸۸

شکل ۴-۲۸ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه

۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه بدون محلول فعال‌ساز ۸۹

شکل ۴-۲۹ مقایسه مقادیر CBR در دو حالت استفاده از محلول فعال‌ساز و بدون به کارگیری این

ماده در Geopet 1×1 با ۱۵٪ خاکستر بادی ۹۰

شکل ۴-۳۰ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه

۱۵٪ وزنی خاکستر بادی بدون عمل‌آوری ۹۱

شکل ۴-۳۱ مقایسه مقادیر CBR در دو حالت نمونه‌های با عمل‌آوری ۷ روزه و بدون عمل‌آوری

Geopet 1×1 در ۱۵٪ خاکستر بادی ۹۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲ خواص گرمایی PET	۱۶
جدول ۲-۲ خواص مکانیکی PET	۱۶
جدول ۳-۲ مقاومت‌های شیمیایی PET	۱۷
جدول ۴-۲ کاربردهای عمده PET در صنعت	۱۷
جدول ۵-۲ جدول آنالیز ترکیب شیمیایی خاکستر بادی کلاس‌های C، F و سیمان پرتلند	۲۱
جدول ۶-۲ تفکیک عملکردهای اصلی ژئوتکستایل و ژئوگرید برحسب مقادیر CBR بستر طبیعی زمین	۳۱
جدول ۷-۲ کاربردهای اصلی ژئوسنتتیک‌ها در فعالیت‌های عمرانی	۳۳
جدول ۸-۲ مشخصات خاک محل	۳۵
جدول ۹-۲ مشخصات مصالح مصرفی	۳۵
جدول ۱۰-۲ نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌ها	۳۵
جدول ۱۱-۲ نتایج تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی در مطالعات مختلف	۴۲
جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی ماسه مصرفی	۵۲
جدول ۲-۳ اکسیدهای تشکیل دهنده خاکستر بادی مصرفی	۵۴
جدول ۳-۳ برنامه آزمایش‌های ماسه مسلح شده با خرده‌ها و نوارهای PET	۶۱
جدول ۴-۳ برنامه آزمایش‌های تسلیح خاک با Geopet	۶۲
جدول ۵-۳ برنامه آزمایش‌های تسلیح و تثبیت خاک با Geopet و خاکستر بادی	۶۴
جدول ۱-۴ بررسی تأثیر Geopet بر مقادیر CBR در حالت‌های مختلف	۷۹
جدول ۲-۴ مقادیر CBR برای نمونه‌های با رطوبت بهینه و ۷ روز عمل‌آوری	۸۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

توجه کافی به رعایت مشخصات ژئوتکنیکی و پارامترهای مقاومتی خاک از بروز بسیاری از مشکلات فنی و مهندسی نظیر ریزش، ترک خوردگی، نشست‌های متفاوتی و ... در زمان اجرا و بهره‌برداری پروژه‌های عمرانی جلوگیری می‌نماید. محدود بودن بودجه و زمان اجرای کار در ساخت انواع سازه‌های خاکی نظیر راه، سد، راه‌آهن و فرودگاه سبب می‌گردد تا مهندسان به بهسازی خاک و اصلاح آن اقدام نمایند. انواع مختلف اصلاح خاک به صورت تثبیت مکانیکی، دینامیکی، الکتریکی، حرارتی و شیمیایی است. از مهم‌ترین روش‌های سنتی اصلاح، تثبیت به روش زهکشی، تثبیت با آهک، سیمان و قیر است که با هدف افزایش مقاومت و خواص ژئوتکنیکی، افزایش توان باربری خاک، تغییر در نفوذپذیری، کاهش درصد جذب آب، جلوگیری از تورم و نشست است.

انتخاب نوع و روش تثبیت خاک تحت تأثیر عوامل گوناگونی همچون کلیه مسائل فنی، اقتصادی، نیروی انسانی و ماشین‌آلات، تجربه شخصی و نتایج آزمایش‌ها است. بدین جهت مهندس ژئوتکنیک می‌بایست با توجه کافی به تمام این عوامل روش بهینه را انتخاب و برای انجام عملیات بهسازی به کار گیرد. بیشتر روش‌های موجود در بهسازی خاک از قبیل استفاده از ذرات چسباننده، اپوکسی‌ها، فنوپلاستیک، سیلیکات‌ها و پلی اورتان بسیار پرهزینه است. [۱]

در جهان امروزه، مدیریت پسماندهای جامد به عنوان یک چالش جدی به حساب می‌آید که این بحران با پیشرفت صنعت جدی‌تر شده است. روش‌های انهدام پسماندهای جامد عبارت‌اند از دفن کردن، سوزاندن و بازیافت. در این بین سایت برای ساخت مراکز دفن زباله در حال کاهش بوده، کوره‌ها باعث تولید گازهای خطرناک شده و بازیافت بسیار پرهزینه است. پس بهترین راه، یافتن روشی برای استفاده مجدد از پسماندهای جامد است. [۲]

پلاستیک‌ها، رزین‌های هستند که از تجزیه نفت یا مشتقات گاز طبیعی حاصل می‌شوند. اصطلاح پلاستیک به طیف گسترده‌ای از این مواد گفته می‌شود که دارای ساختار متفاوتی هستند.

امروزه پیشرفت تکنولوژی باعث افزایش تولید محصولات متنوعی از جمله پلاستیک‌ها شده است که به هفت گروه، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)^۱، پلی‌وینیل کلراید (PVC)^۲، پلی‌پروپیلین (PP)^۳، پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)^۴، پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE)^۵، پلی‌استایرین (PS)^۶ و سایر پلاستیک‌ها (مانند پلی‌استر، پلی‌کربنات‌ها و پلی‌آمیدها) تقسیم می‌شوند.

فرایند بازیافت ضایعات پلاستیکی اگرچه از جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی سودمند است، درعین حال دارای معایبی چون عدم تجزیه‌پذیری و به خطر انداختن سلامت موجودات بوده و بازیافت نیز دارای هزینه بالا است.[۳]

عضوی دیگر از خانواده پسماندهای جامد که با افزایش نیروگاه‌های حرارتی تولید آن روزبه‌روز در حال افزایش است، و مشکلات زیست‌محیطی فراوانی را به وجود آورده، خاکستر بادی (FA)^۷ است. امروزه سهم قابل‌توجهی از نیازهای انرژی جهان توسط نیروگاه‌های حرارتی با سوزاندن زغال‌سنگ به‌عنوان سوخت تأمین می‌شود.

بقایای تولید شده در این نیروگاه‌ها که محصول احتراق زغال‌سنگ است خاکستر بادی نامیده می‌شود. به‌طور کلی در سراسر جهان، بیشتر خاکستر بادی تولید شده، در یک محل دفن زباله دفع می‌شود که این کار باعث نگرانی آژانس‌های محیط‌زیست می‌شود.[۴]

بنابراین اگر بتوان راهی یافت تا هم پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بهبود یابند و هم منبع جدیدی برای مصرف پسماندهای جامد فراهم شود، عملاً دو هدف بهسازی خاک و حفظ محیط‌زیست محقق شده است.

¹ Polyethylene terephthalate

² Poly Vinyl Chloride

³ Poly Propylene

⁴ High Hensity Polyethylene

⁵ Low Density Polyethylene

⁶ Polystyrene

⁷ Fly Ash

۱-۲- بیان مسئله و اهمیت موضوع

بهسازی زمین در بسیاری از کشورها برای حل مشکلات ژئوتکنیکی موردتوجه قرار گرفته است، به‌ویژه هنگامی که ساخت‌وساز لزوماً در خاک‌های مسئله‌دار و در شرایط سخت ژئوتکنیکی اتفاق می‌افتد. پیشرفت‌های اخیر در تجهیزات، مواد و روش‌های متنوع، فناوری بهسازی را بسیار کارآمد و اقتصادی کرده است. [۵] از روش‌های بهسازی خاک، می‌توان به اختلاط آن با الیاف و رشته‌ها اشاره کرد. تلفیق این مواد با خاک، عملکرد خاک را در جهات مختلف بهبود می‌بخشد. از حدود نیم‌قرن پیش تحقیقاتی پیرامون شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح شده با الیاف شروع گردیده است که در میان استفاده از ضایعات پلاستیکی به دلیل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی موردتوجه محققین قرار گرفته است. [۳]

برای تثبیت خاک نیز می‌توان از پسماندهای جامدی همچون خاکستر بادی، خاکستر آتشفشانی و سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده کرد که در این بین خاکستر بادی به دلیل تولید زیاد (سالانه حدود ۶۸ میلیون تن) و همچنین سازگاری با محیط‌زیست بیشتر موردتوجه محققین قرار گرفته است. در حال حاضر سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن از این مواد در کاربردهای مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده در بتن، تثبیت خاک و پرکننده^۱ آسفالت اشاره کرد. [۶]

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

تحقیقات نشان داده‌اند استفاده از ضایعات پلاستیکی به‌عنوان مسلح کننده و خاکستر بادی جهت تثبیت خاک به طور قابل توجهی پارامترهای مقاومتی خاک را بهبود می‌بخشد، و میزان اتساع و کرنش پذیری را کاهش می‌دهد، به‌علاوه سهولت در اجرا نیز یکی دیگر از مزایای تسلیح با این گونه ضایعات

¹ Filler

است، در نتیجه استفاده از این مواد در تسلیح خاک رفتار مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشد و محل مصرف جدیدی برای استفاده مجدد از آن‌ها بدون هزینه‌های بالا و آلودگی زیست‌محیطی پدید می‌آورد. [۷]

خاکستر بادی نیز در بسیاری از پروژه‌ها برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک استفاده شده است، از این ماده می‌توان برای تثبیت خاک اساس، بستر راه‌ها، خاک پشت دیوار حائل و تثبیت سدهای خاکی برای بهبود پایداری شیروانی‌ها استفاده کرد. یکی دیگر از علل استفاده از این مواد در پروژه‌های مهندسی تولید زیاد آن و تخریب و آلوده کردن محیط زیست است. [۸]

۴-۱- فرضیات تحقیق

در این پژوهش فرض بر این بوده است که ساخت نمونه‌ها و تراکم آن‌ها به صورت یکنواخت و یکسان با تراکم نسبی ۷۰ درصد و درصد رطوبت‌های بهینه مشابه صورت گرفته است.

۵-۱- روش تحقیق

پژوهش حاضر بر مبنای بهسازی خاک ماسه‌ای بندر انزلی با استفاده از ضایعات پلاستیکی به صورت خرده، نواری و Geopet در دو حالت مجزا و همراه با خاکستر بادی جهت کاهش هزینه‌های بهسازی خاک و بررسی امکان افزایش مقاومت و حذف یا بهینه‌سازی روش‌های بهسازی دیگر مانند اختلاط عقیق و تراکم دینامیکی و... است.

در پژوهش حاضر آزمایش‌های CBR^۱ بر روی نمونه‌های مسلح شده با مدل‌های مختلف PET (خرده‌ها، نواری و Geopet) همراه با درصد‌های متفاوت خاکستر بادی در دو حالت خاک با تراکم نسبی ۷۰ درصد و رطوبت بهینه انجام شده است. هدف از انجام این کار بررسی تأثیر درصد وزنی این مواد و حالت‌های مختلف به کارگیری ضایعات پلاستیکی است تا در صورت امکان، بتوان محل مصرف جدیدی

¹ Californian Bearing Ratio

برای به کار بردن این پسماندهای جامد معرفی کرد.

۱-۶- ساختار پژوهش

همان طور که تا به اینجا در این فصل بیان شده است، در فصل اول این پژوهش به معرفی کلیات پژوهش، ضرورت و اهداف آن در راستای بهسازی زمین‌هایی با خاک ماسه‌ای بندر انزلی پرداخته شده است. در فصل دوم، ابتدا به بیان مسائلی در مورد پسماندهای جامد از جمله، ضایعات پلاستیکی و خاکستربادی و نحوه مدیریت این پسماندها و در نهایت روش‌های نوین بهسازی خاک‌های مسئله‌دار با استفاده از پسماندهای جامد در راستای بهره‌وری دو جانبه مهندسی ژئوتکنیک و محیط‌زیست پرداخته شده است.

در فصل سوم، روش انجام تحقیق و آشنایی با مورد مطالعاتی، مصالح به کار رفته در آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر، آزمایش‌های شناسایی خاک و معرفی ابزار به کار رفته در این آزمایش‌ها آورده شده است.

در فصل چهارم، به تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها پرداخته شده و کلیه‌ی نتایج اعم از آزمایش‌های اولیه جهت شناسایی و آزمایش‌های CBR به صورت نمودارها و جداول استاندارد و شرح کامل نتایج، بیان شده است.

در فصل پنجم، به بیان نتیجه‌گیری کلی و خروجی نهایی پژوهش و ارائه‌ی پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه

در این فصل، بهسازی زمین همراه با بررسی پارامترهای مهندسی موردتوجه قرار گرفته و مختصری از شیوه‌های بهسازی و بهبود وضعیت خاک معرفی شده است. همچنین به معرفی PET، خاکستر بادی و خانواده ژئوسنتتیک‌ها پرداخته شده است. در انتها نیز به بررسی تحقیقات گذشته پیرامون تسلیح و تثبیت خاک با مواد مختلف پرداخته شده است.

۲-۲- راه‌حل‌های پیش رو در مواجهه با زمین‌های دارای خاک مسئله‌دار

خاکی که حداقل خصوصیات مهندسی موردنیاز برای طراحی و عملکرد مناسب را نداشته باشد، جزو خاک‌های سست یا ضعیف محسوب می‌شود زمانی که خاک در شرایط ضعیف باشد می‌توان گزینه‌های زیر را جهت بهبود وضعیت خاک و بهسازی زمین در نظر گرفت:

یک راه‌حل، رهاکردن محل پروژه است. هنگامی که سایت مناسب دیگری را می‌توان یافت، این را حل ممکن است تنها راه‌حل عملی در نظر گرفته شود.

راه‌حل دیگر، حفاری و برداشتن خاک ضعیف موجود و جایگزینی آن با خاک مناسب است که سال‌های طولانی به‌عنوان یک روش معمول مورد استفاده قرار گرفته است.

روش دیگر، طراحی مجدد پروژه یا طراحی اغلب اجزای سازه‌ای به جهت انطباق با شرایط خاک و سایت است.

راه‌حل بعدی، اصلاح و بهسازی خاک به‌منظور بهبود و تغییر خواص و رفتار آن با استفاده از فن‌آوری و تکنولوژی‌های مختلف بهسازی زمین است.

از میان راه‌حل‌های موجود یکی از بهترین و به‌صرفه‌ترین گزینه‌ها، بهسازی خاک است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۲-۳- بهسازی خاک

بهسازی خاک عبارت است از انجام هرگونه عملیاتی که موجب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی در خاک می‌شود. این عملیات می‌توانند به چهار دسته تقسیم شوند که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت:

۲-۳-۱- بهسازی مکانیکی

این روش شامل تغییرات و دست‌کاری‌های فیزیکی است که غالباً به کنترل تراکم خاک‌های در محل یا خاکریزهای اجرا شده به دست بشر اشاره دارد. بسیاری از رفتارها و خصوصیات خاک را می‌توان با کنترل میزان تراکم خاک و با استفاده از روش‌های تراکم بهبود بخشید. دیگر روش‌های بهسازی در جای خاک ممکن است شامل اضافه کردن مصالح تقویت خاک به وسیله اعضای غیرسازه‌ای باشد. شکل‌های (۲-۱) و (۲-۲) روش‌های بهسازی مکانیکی را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۱ تراکم دینامیکی



شکل ۲-۲ اجرای ستون سنگی

۲-۳-۲- بهسازی هیدرولیکی

در این روش خصوصیات جریان، تراوش و زهکشی در زمین تغییر می‌یابد. این تغییرات می‌تواند شامل کاهش سطح تراز آب با استفاده از زهکش‌ها و یا به‌وسیله چاه‌های تخلیه آب و کاهش یا افزایش قابلیت نفوذپذیری خاک‌ها و اجرای روش پیش‌تحکیمی به‌منظور به حداقل رساندن نشست‌ها و کاهش قابلیت تراکم‌پذیری و افزایش مقاومت خاک‌ها، فیلترکردن جریان آب‌های زیرزمینی کنترل‌گرادیان هیدرولیکی ناشی از تراوش آب در خاک و ایجاد موانع هیدرولیکی باشد. کنترل یا تغییر مشخصات هیدرولیکی ممکن است از طریق تکنیک‌های مختلفی که ممکن است برای دستیابی به نتایج مطلوب با دیگر روش‌های بهسازی ترکیب شوند به دست آید. شکل (۲-۳) اجرای فیلترهای زهکشی جهت تخلیه فشار آب منفذی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ اجرای فیلترهای تخلیه اضافه آب منفذی

۲-۳-۳- بهسازی فیزیکی و شیمیایی

در این روش از بهسازی تثبیت و پایدارسازی خاک به دلیل ایجاد تغییرات مختلف در ساختار و ترکیب خاک به وجود می‌آید. خصوصیات رفتاری خاک با اضافه‌کردن مصالح و از طریق فرایندهای اختلاط فیزیکی یا تزریق مصالح و یا توسط روش‌های حرارتی با درجه حرارت بسیار بالا تغییر می‌یابد.

این روش‌ها به‌استثنای روش انجماد زمین دائمی بوده و می‌توانند خصوصیات رفتاری خاک را به میزان قابل توجهی بهبود دهند. تحقیقات و پژوهش‌های اخیر با روش پایدارسازی بیولوژیکی که شامل روش‌های مختلف استفاده از میکروب و باکتری‌ها است نیز در این مجموعه قرار می‌گیرند. شکل‌های (۲-۴) و (۵) روش‌های بهسازی فیزیکی و شیمیایی را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۴ بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک



شکل ۲-۵ بهسازی شیمیایی خاک به‌وسیله آهک

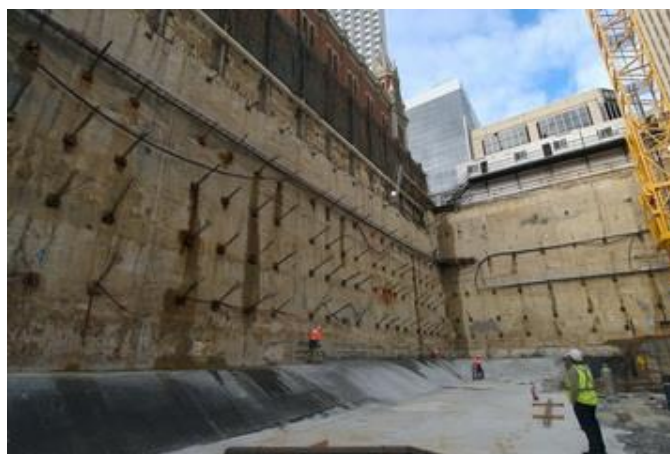
۲-۳-۴- بهسازی با تکنیک‌های تقویت و محصور کردن خاک

این روش‌ها شامل قطعات سازه‌ای و یا دیگر مصالح مصنوعی تولید شده در صنعت است که برای

تسلیح خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تکنیک شامل تقویت و تسلیح خاک با عناصر سازه‌ای با عملکرد کششی، نیلینگ و انکراژ، تقویت خاک با استفاده از مصالح ژئوسنتتیک، محصور کردن دانه‌ای با استفاده از دیوارهای Crib، گابیون و بالشتک‌های گابیونی و استفاده از مصالح سبک‌وزن مانند فوم پلی استایرن یا دیگر مصالح پرکننده سبک‌وزن است. به‌طور کلی، این نوع از بهسازی خاک فیزیکی بوده و صرفاً با استفاده از اجزای سازه‌ای انجام می‌شود. تقویت خاک با استفاده از کاشت گیاهان در سطح زمین نیز می‌تواند در این دسته قرار بگیرد. [۹]



شکل ۶-۲ نمای از اجرای نیلینگ



شکل ۷-۲ نمای از اجرای انکراژ

۲-۴- استفاده از ضایعات پلاستیکی در تسلیح خاک

از حدود نیم قرن پیش، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح شده شروع گردیده است که در این بین استفاده از پسماندهای جامد به عنوان مسلح کننده، به دلیل مسائل اقتصادی و زیست محیطی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این مسلح کننده‌های خاک پلاستیک‌های ضایعاتی می‌باشند که تلفیق آن‌ها با خاک محیطی مرکب ایجاد می‌کند که مقاومت و شکل پذیری خاک را در جهات مختلف بهبود می‌بخشد. [۷]



شکل ۲-۸ خاک مسلح شده با ضایعات پلاستیکی

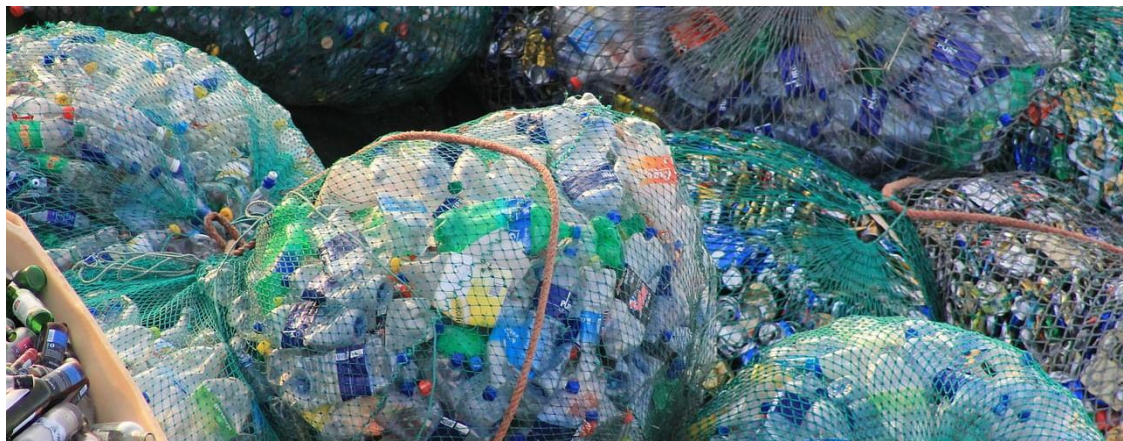
۲-۵- ضایعات پلاستیکی

در این بخش فرآیند تولید و کاربردهای ضایعات پلاستیکی به تفصیل آورده شده است.

۲-۵-۱- مقدمه‌ای در مورد پلاستیک‌ها

پلاستیک‌ها، رزین‌ها یا پلیمرهای هستند که از سنتز نفت یا مشتقات گاز طبیعی حاصل می‌شوند. [۷]

PET قدیمی‌ترین عضو خانواده پلی‌استرها است که برای ساخت انواع ظروف نگهداری مایعات و غذا، الیاف مصنوعی و غیره از آن استفاده می‌شود. نخستین بار در سال‌های ۱۹۳۹-۱۹۴۱ دانشمندان انگلیسی به نام‌های وین فیلد و دیکسون^۱ موفق به تولید PET در مقیاس آزمایشگاهی شدند. تا بیش از سال ۱۹۶۰، PET از تبادل استری دی متیل ترفتالات (DMT)^۲ و اتیلن گلیکول (EG)^۳ تهیه می‌شد. تا اینکه در سال ۱۹۶۰ شرکت‌های ICI^۴ و آموکو ترفتالیک اسید خالص (PTA)^۵ را در مقیاس صنعتی تولید کردند. این پلاستیک‌ها به دلیل خواصی مانند سبکی، اقتصادی بودن و استحکام بالا موردتوجه مصرف‌کنندگان قرار گرفت. شکل (۲-۹) ضایعات پلاستیکی تولید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹ ضایعات پلاستیکی

۲-۵-۲- مقدار تولید ضایعات پلاستیکی (PET) در جهان

رزین‌های PET پلیمرهای با عملکرد مناسب در صنایع مختلف هستند. آن‌ها طیف گسترده‌ای از کاربردها را در بازارهای مختلف جهانی دارند. پلاستیک PET در بازارهای مانند حمل و نقل، خودرو، برق / الکترونیک، لوازم خانگی، بسته بندی و منسوجات مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که PET

¹ Dixon

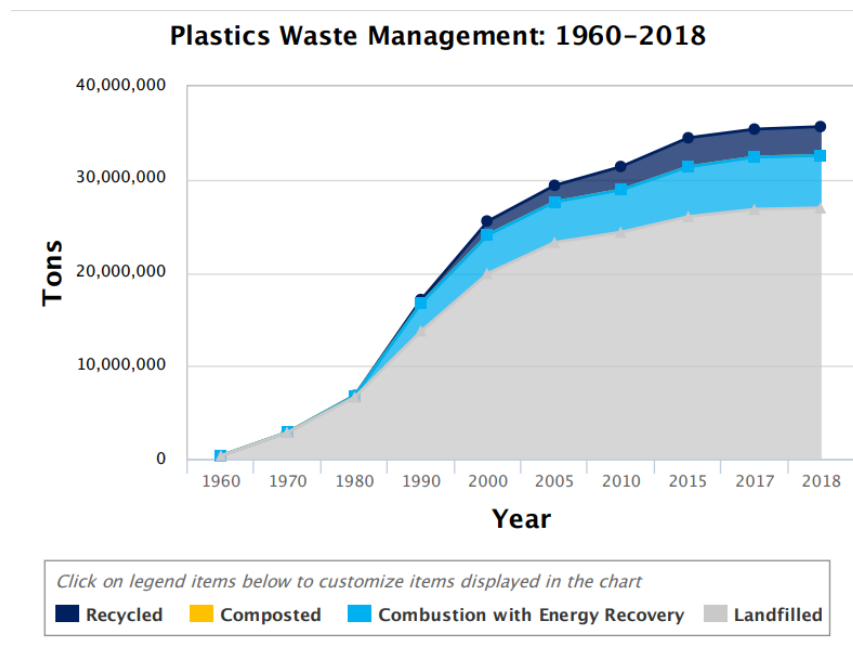
² Dimethyl Terephthalate

³ Ethylene Glycol

⁴ Imperial Chemical Industries

⁵ Pure Amocophthalic Acid

یک عایق عالی برای آب و رطوبت است، از آن در صنعت بسته بندی به ویژه برای بسته بندی‌های قابل مصرف (بطری آب ، نوشابه ، غذاهای بسته بندی شده) بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت مکانیکی بالای PET موجب شده است که در کاربردهای همچون نوارهای حامل مغناطیسی و صانع مختلف مهندسی استفاده شوند. از پلاستیک PET متبلور برای ساخت لوازم خانگی نیز استفاده می‌شود که بتوانند هم در برابر یخ زدگی و هم در دمای بالا مقاومت کنند. شکل (۲-۱۰) مقدار تولید، بازیافت، کمپوست کردن، سوزاندن و دفن کردن ضایعات پلاستیکی از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد. [۱۰]



شکل ۲-۱۰ مدیریت ضایعات پلاستیکی در جهان از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۸ [۱۰]

۲-۵-۳- خواص PET

رشد سریع تجاری PET نسبت به سایر پلاستیک‌های گرما نرم، به‌خاطر محدوده گسترده خواص و ویژگی‌های خاص آن است که باعث شده تا کاربردهای وسیع و مصارف زیادی برای این پلیمر به وجود آید.

اهم خواص و ویژگی های PET به طور خلاصه عبارت اند از:

- ۱- ظرافت، شفافیت، سبکی وزن
- ۲- شکل و سطح ظاهری فوق العاده
- ۳- دارابودن دمای تخریب زیاد، در محدوده ۳۰۰ درجه سانتیگراد
- ۴- دارابودن خواص مکانیکی مطلوب
- ۵- دارابودن خواص عایق الکتریکی
- ۶- جذب رطوبت بسیار اندک
- ۷- مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی
- ۸- سختی خیلی زیاد
- ۹- استحکام ضربه ای خوب

جدول ۱-۲ خواص گرمایی PET

خواص گرمایی	مقدار
دمای ذوب، Tm (سانتیگراد)	۲۴۹-۲۵۵
دمای انتقال شیشه ای (سانتیگراد)	۷۰-۸۰
دمای نفوذ ۱۲۰kg	۵۸-۶۰
گرمای ویژه j/kg	۱۱۷۵
ضریب انبساط گرمایی (m/m)	6.5×10^{-6}

جدول ۲-۲ خواص مکانیکی PET

خواص مکانیکی	مقدار
استحکام کششی (MPa)	۵۸-۷۳
افزایش طول پارگی (%)	۳-۳۰۰
مدول کششی (Gpa)	۲,۷۵-۴,۱۵
مدول خمشی (Gpa)	۲,۴-۳,۱
استحکام فشاری (MPa)	۷۵-۱۰۵
استحکام خمشی (MPa)	۹۵-۱۲۵
سختی راکوئل (M)	۸۵

جدول ۲-۳ مقاومت‌های شیمیایی PET

مقاومت شیمیایی PET در برابر	وضعیت
بازها و اسیدهای رقیق	خوب
بازهای غلیظ	ضعیف
هیدروکلریک اسید غلیظ	متوسط
سولفوریک اسید غلیظ	ضعیف
گریس‌ها، روغن‌ها و چربی‌ها	خوب
حلال‌های آلی، الکل‌ها و هیدروکربن‌ها	خوب
کتون‌ها، استرها و ترکیبات کلردار	نسبتاً خوب
فنول‌ها، کرزول‌ها و فنول‌های کلردار	ضعیف
رشد قارچ	خوب

۲-۵-۴- کاربردهای کلی و مشخصات PET

PET، معمولاً سخت و خشک بوده و این ویژگی موجب کاربرد آن در بخش‌های گسترده‌ای می‌شود. بیشترین کاربرد PET در تولید الیاف مصنوعی است. در این زمینه، PET پس از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن سومین حجم تولیدات پلیمری را به خود اختصاص می‌دهد. الیاف پلی‌استر به طور گسترده در صنعت نساجی و در لاستیک اتومبیل استفاده می‌شود. PET به علت ویژگی‌های شفافیت، وزن کم و سختی در تولید بطره‌های نوشابه و آب‌معدنی، آب‌میوه، ظروف غذاهای آماده با قابلیت انجماد و گرمادهی مجدد و بسته‌بندی دارو استفاده می‌شود. در جدول (۲-۴) کاربردهای ضایعات پلاستیکی در صنعت آورده شده است.

جدول ۲-۴ کاربردهای عمده PET در صنعت

صنایع	مصارف عمده
نساجی	تولید انواع الیاف برای مصارف نساجی: انواع نخ، پارچه و لباس، رو مبلی، فرش ماشینی، کف‌پوش و طناب
لاستیک‌سازی	الیاف تقویت شده در لاستیک
خودروسازی	رزین‌های مهندسی در ساخت انواع قطعات خودرو، ماشین‌های سنگین، ابزار و ادوات
بسته‌بندی	انواع بطره‌های نوشابه گازدار، روغن، ظروف مصرفی در اجاق‌های ماکروویو، ظروف غذاهای آماده، ظروف یک‌بارمصرف

پزشکی	نخ‌های جراحی و بهداشتی
فیلم‌سازی	انواع فیلم‌های عکاسی و سینمایی، رادیوگرافی، نوارهای ضبط صوت و ویدئو
لوازم خانگی	رزین‌های مهندسی در ساخت لوازم خانگی
لوازم ساختمانی	آلیاژهای ضایعاتی به همراه سایر پلیمرها و مواد معدنی در بتن و سیمان و سایر مصالح ساختمانی

در این میان، رشد گسترده این پلیمر در صنایع تولید بطری نوشابه و آب طی چند سال اخیر چشمگیر بوده است.

از بحث‌های معمول پیرامون صنعت بازیافت مواد پلاستیکی آن است که آیا از پلاستیک‌های بازیافتی می‌توان همانند پلاستیک‌های نو استفاده کرد. پاسخ به این سؤال بستگی کامل به نوع کاربرد دارد. برای مثال، با وجود دقتی که درباره زدودن آلودگی از ضایعات و شستن آنها اعمال می‌شود، پیش از مرحله شست‌وشو با اهداف بهداشتی، برای حفظ خواص پلاستیک بازیافتی و بهبود کیفیت ظاهری آن انجام می‌گیرد. بدین ترتیب، استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در کاربردهای بهداشتی به‌هیچ‌عنوان توصیه نمی‌شود.

۲-۶- مشکلات دفن ضایعات پلاستیک‌ها در یک مدفن زباله

پلاستیک‌ها تجدیدنپذیر بوده و ساختار سازه‌ای مدفن زباله را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. اما با توجه به حجم گسترده و تولید روزافزونشان، ظرفیت زیادی از مدفن را اشغال می‌کنند که این مسئله نیازمند احداث و یا توسعه مراکز دفن زباله است و هزینه‌های زیادی در بردارد در نتیجه دفن ضایعات پلاستیکی به‌هیچ‌وجه منطقی و مقرون به صرفه نیست.

۲-۷- مشکلات سوزاندن ضایعات پلاستیک‌ها در کوره

پلاستیک سهم مهمی در تولید گرمای احتراق در زباله‌های جامد شهری دارند، به‌طوری‌که سه برابر بقیه پسماندهای شهری، گرما تولید می‌کنند. باید بررسی کرد که آیا زباله‌های پلاستیکی هالوژن دار

سهمی در انتشار گاز از کوره‌های زباله سوزی دارند یا خیر. تحلیل‌ها باید بر روی انتشار گازهای اسیدی سمی و دی‌اکسید فوران صورت گیرد.

۲-۷-۱- بازیافت ضایعات پلاستیکی

مصرف روبه‌رشد مواد پلاستیکی به‌ویژه PET در صنایع مختلف بسته‌بندی از جمله مواد دارویی، غذایی و آشامیدنی در کشور افزایش مداوم ضایعات پلاستیکی در زباله‌های شهری را به دنبال داشته است. این مسئله مشکلات متعددی را از نظر آلودگی زیست‌محیطی، مسائل بوم‌شناسی و اقتصادی به بار آورده است. با برنامه‌ریزی مناسب برای بازیافت ضایعات پلاستیکی، نه فقط آلودگی محیط‌زیست کاهش می‌یابد، بلکه می‌توان از مواد بازیافتی به‌عنوان مواد اولیه دوباره استفاده کرد. روش‌های بازیافت ضایعات پلاستیکی مکانیکی و شیمیایی هستند. در بازیافت مکانیکی ضایعات به محصولات قابل مصرف و در روش شیمیایی ضایعات به مواد اولیه تبدیل می‌شوند.

اصلاح خاص و بهبود ویژگی‌های مواد بازیافتی، موضوعی است که در اکثر فراورده‌های معمول بازیافت مدنظر قرار می‌گیرد. روش‌ها و فناوری‌های مختلف و جدیدی برای بازیافت ضایعات PET استفاده می‌شوند تا ارزش افزوده این‌گونه پلاستیک‌ها بالا رفته و کاربردهای مختلف برای آنها به وجود آید.

کاربردهای روزافزون پلاستیک‌ها در صنایع مختلف، به دلیل ارزانی، سبکی وزن، مقاومت خوب و حمل‌ونقل آسان موجب رشد سریع فرآورده‌ها و مصارف آنها در زمینه‌های مختلف شده است. باتوجه‌به گسترش صنایع بسته‌بندی و مصارف پلاستیک‌ها در آنها، صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، دارویی و بهداشتی ناشی از این محصولات آلودگی‌های زیست‌محیطی در جهان افزایش یافته است. به‌طوری‌که در برخی از کشورهای صنعتی بزرگ در حدود نیمی از زباله‌های شهروندان را پلاستیک‌های بسته‌بندی تشکیل می‌دهند. دور ریختن و انهدام این پلاستیک‌ها مشکلات بی‌شماری در پی دارد. افزون بر این، مسائل اقتصادی نیز سبب ایجاد حساسیت بیشتری درباره بازیافت این پلاستیک‌ها شده است. [۱۱]



شکل ۱۱-۲ فرایند بازیافت و تبدیل پلاستیک‌های ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد

۲-۸- خاکستر بادی

در این بخش فرآیند تولید، مقدار و کاربردهای خاکستر بادی در بهسازی و تثبیت خاک به تفصیل آورده شده است.

۲-۸-۱- تعریف خاکستر بادی

خاکستر بادی باقی‌مانده ریز حاصل از احتراق زغال‌سنگ در نیروگاه‌های حرارتی است که توسط گازهای خروجی از محفظه احتراق خارج می‌شود. در سال ۲۰۰۱ بیش از ۶۱ میلیون تن خاکستر بادی تولید شد. شکل‌ها (۲-۱۲) و جدول (۲-۵) به ترتیب شکل ظاهری دو نوع خاکستر بادی کلاس F و C و آنالیز ترکیب شیمیایی دو نوع مختلف خاکستر بادی و سیمان پرتلند را نشان می‌دهند.



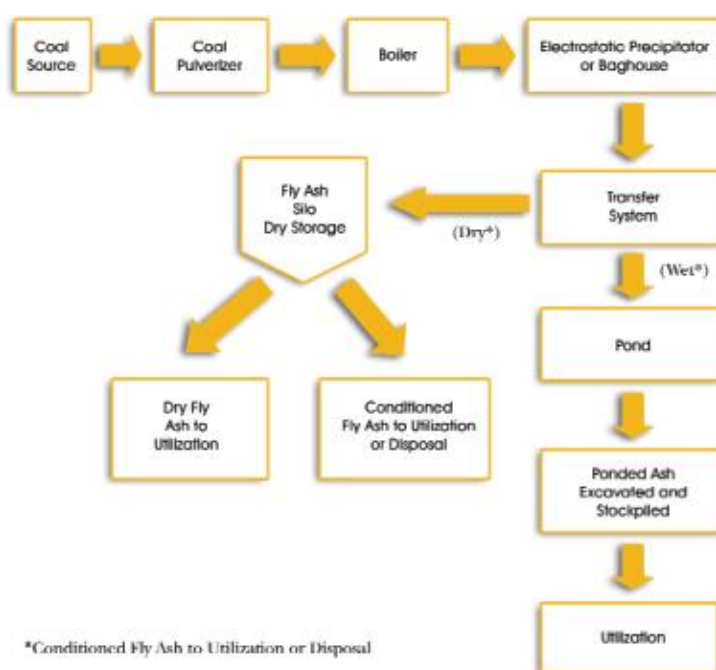
شکل ۲-۱۲ شکل ظاهری خاکستر بادی [۸]

جدول ۵-۲ جدول آنالیز ترکیب شیمیایی خاکستر بادی کلاس‌های C، F و سیمان پرتلند [۸]

Compounds	Fly Ash Class F	Fly Ash Class C	Portland Cement
SiO ₂	55	40	23
Al ₂ O ₃	26	17	4
Fe ₂ O ₃	7	6	2
CaO (Lime)	9	24	64
MgO	2	5	2
SO ₃	1	3	2

۹-۲- پدید آمدن خاکستر بادی

خاکستر بادی پسماندی از گازهای خروجی حاصل از سوخت در کوره‌های زغال‌سنگ یا سیلت غیر پلاستیک در نیروگاه‌های حرارتی است. شکل (۲-۱۳) روش انتقال خاکستر بادی را نشان می‌دهد. غبار و گازهای متصاعد شده از سوخت توسط فیلترهای کیسه‌ای و یا ته‌نشین کننده‌های الکترواستاتیکی مخصوص مهار می‌شوند. خاکستر بادی شامل درصد بالایی از اکسیدهای فلزات سنگین از جمله سیلیسیم، آهن، کلسیم، منیزیم و آلومینیوم است. [۸]



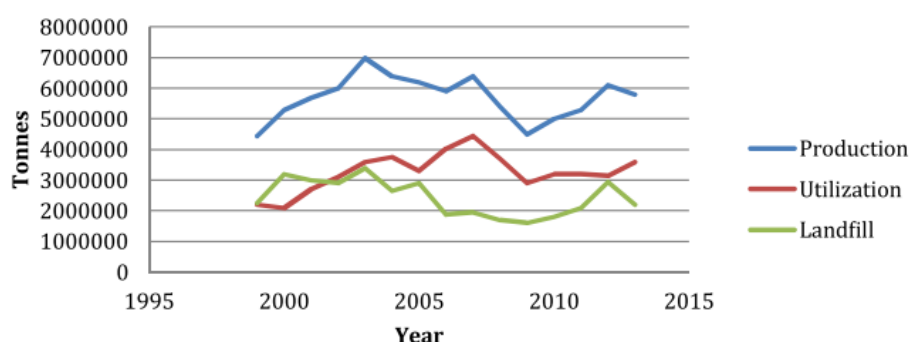
شکل ۲-۱۳ روش انتقال خاکستر بادی [۸]

۲-۹-۱- مقدار خاکستر بادی

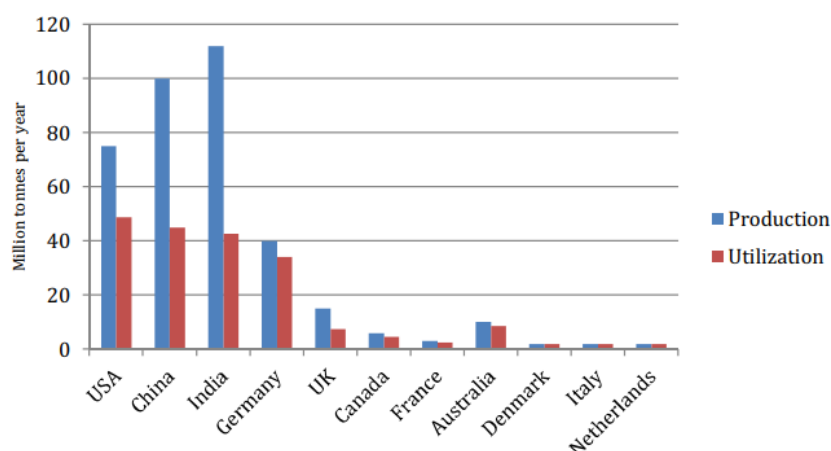
مقدار تولید، استفاده و دفن خاکستر بادی در کشورهای مختلف کاملاً متفاوت است، شکل (۲-۱۴)

میزان تولید، استفاده و دفن این ماده را در انگلستان از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۳ و شکل (۲-۱۵) این مقادیر را برای کشورهای مختلف دنیا نشان می‌دهد.

می‌توان مشاهده کرد که از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ نرخ دفن این ماده بالاتر از میزان استفاده بوده است، سپس از سال ۲۰۰۳ به بعد این مقدار کمتر از میزان استفاده بوده به‌گونه‌ای که تا سال ۲۰۱۰ تنها ۳۶ درصد از مقدار خاکستر بادی تولید شده به مراکز دفن زباله ارسال شده و این مقدار در سال ۲۰۱۲ به ۴۸ درصد افزایش و در سال ۲۰۱۳ به ۳۸ درصد کاهش یافت. [۱۲، ۱۱]



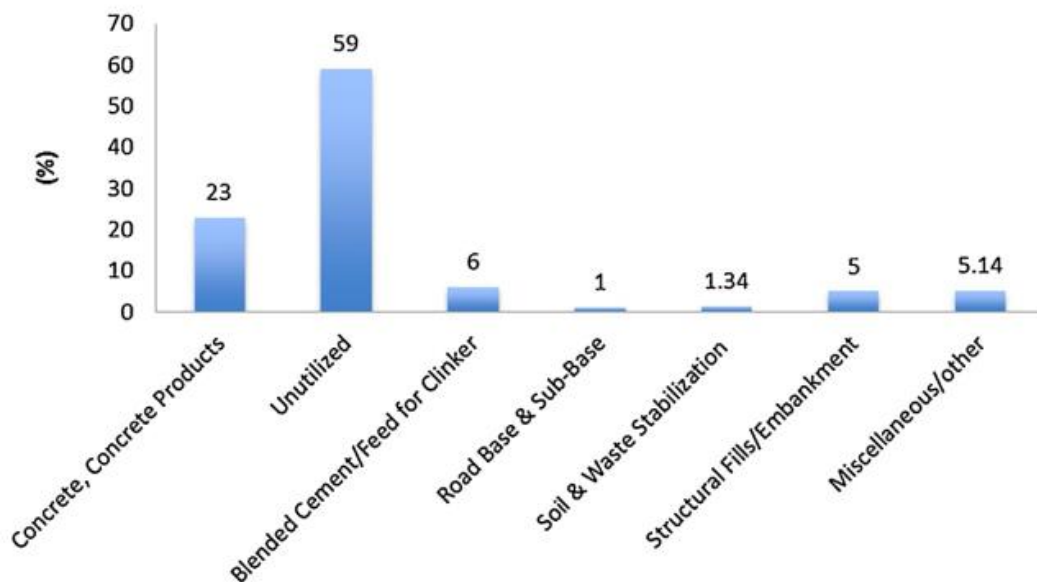
شکل ۲-۱۴ میزان تولید، استفاده و دفن خاکستر بادی در انگلستان [۱۲، ۱۱]



شکل ۲-۱۵ مقایسه میزان تولید و استفاده خاکستر بادی در کشورهای مختلف [۱۴]

۲-۹-۲- موارد استفاده از خاکستر بادی

خاکستر بادی طیف گسترده‌ای از کاربردها را در صنعت ساختمان دارد، شکل (۲-۱۶) کاربردهای مختلف این ماده را در مهندسی نشان می‌دهد. از جمله این موارد می‌توان به جایگزینی این ماده با سیمان پرتلند اشاره کرد که با حجم قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که تنها ۱/۳۴ درصد از کل خاکستر بادی تولید شده برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۵]



شکل ۲-۱۶ موارد کاربرد خاکستر بادی [۱۵]

۲-۹-۳- مزایای استفاده از خاکستر بادی

استفاده از خاکستر بادی در ساخت خاکریزها نه تنها به کاهش یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه محاسن زیر را نیز شامل می‌شود:

- کاهش هزینه‌های دفن زباله‌های جامد.
- کاهش نیاز به محل دفن زباله.

- کسب ارزش افزوده از مواد زائد.
- صرفه‌جویی در تولید انرژی.
- تأمین رشد اقتصادی.
- ارائه ساخت‌وساز پایدار. [۱۶]

۲-۹-۴- کاربرد خاکستر بادی در بهسازی خاک

بهسازی خاک تغییر در خصوصیات آن برای بهبود عملکرد است. خواص قابل تغییر خاک عبارت‌اند از چگالی، درصد رطوبت، شکل‌پذیری و مقاومت آن که اصلاح این خصوصیات باعث افزایش پایداری و سرعت بخشیدن به ساخت‌وساز می‌شود.

خاکستر بادی مورد استفاده برای تثبیت خاک به دودسته، کلاس C و F تقسیم‌بندی می‌شوند که ترکیب آن‌ها با آهک در پروژه‌های متعدد ژئوتکنیک و بزرگراه‌ها استفاده می‌شود که موجب افزایش مقاومت، کنترل تورم، تراکم بهتر و... می‌شود.

خاکستر بادی کلاس C را می‌توان به‌عنوان یک ماده مستقل به دلیل خواص خود سیمانی استفاده نمود، درحالی‌که کلاس F باید در کنار یک ماده فعال‌کننده مانند سیمان، آهک و سیدیم هیدروکسید و... استفاده نمود. [۸]

۲-۹-۵- بررسی تأثیر و عملکرد خاکستر بادی در محیط‌زیست طبق استاندارد EPA

خاکستر بادی به‌عنوان یک ماده پوزولانی می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ در ساخت و ساز استفاده گردد. استفاده از خاکستر بادی مزایای زیست محیطی قابل ملاحظه‌ای دارد :

۱. بتن ساخته شده با خاکستر بادی برای تولید به انرژی و آب کمتر نیاز دارد و در فرایند تولید

گاز گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کند .

۲. کاهش محوطه‌های دفن زباله

۳. حفاظت از سایر مواد و منابع طبیعی

در ایالات متحده موسسه حفاظت از محیط زیست (EPA) از سال ۱۹۷۰ تا کنون گزارش‌های زیادی مبنی بر استفاده از خاکستر بادی به عنوان یک ماده سازگار با محیط زیست منتشر کرده است. در سال ۱۹۸۰ قانونی تصویب شد که استفاده مفید از خاکستر بادی تحت اصلاحیه BEVILL منع قانونی نداشته و می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این قانون از خاکستر بادی به عنوان یک ضایعات دوست‌دار محیط زیست نام برده است و استفاده از آن را در پروژه‌های حمل و نقل موفقیت آمیز دانسته است. بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در زمینه استفاده از خاکستر بادی صورت گرفته‌اند عمدتاً به بررسی پارامترهای مقاومتی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها پرداخته‌اند. هر یک تن خاکستر بادی که در آفریقای جنوبی استفاده می‌گردد از انتشار یک تن کربن دی اکسید جلوگیری می‌کند. در هنگام استفاده از خاکستر بادی برای ساخت بتن، تخمین زده شده است که از تولید ۶ میلیون تن گاز گلخانه‌ای مضر در آفریقای جنوبی جلوگیری می‌گردد. در آفریقای جنوبی سالیانه میلیون‌ها تن خاکستر بادی تولید می‌شود که تنها ۶ درصد آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. محل‌های دفن خاکستر بادی یک نگرانی محیط زیستی می‌باشد که می‌توانند به زمین و آب‌های زیرزمینی پس از دفع مرتبط شود. زمانی که از این ماده برای تثبیت استفاده می‌شود واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد و ایجاد چسبندگی بین ذرات خاکستر باعث می‌شود که احتمال آلودگی ناچیز شود. سازمان حفاظت محیط زیست در سال ۱۹۹۹ اعلام کرد هیچ خطر قابل توجهی برای سلامت انسان و محیط زیست در استفاده از خاکستر بادی شناسایی نشده است و می‌توان از این ضایعات در کارهای مختلف استفاده کرد. تعداد زیادی پژوهش در رابطه با شسته شدن خاکستر بادی و تاثیر آن بر محیط زیست صورت گرفته است. مطالعات نشان داده است که وقتی این ماده در بتن استفاده می‌شود، حداقل خطر شسته شدن وجود دارد. طبق بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شده‌است که وقتی در پروژه‌های تثبیت راه از خاکستر بادی استفاده می‌شود، تنها مقادیر کمی از مواد معدنی را که برای محیط زیست مضر نیستند، آزاد می‌کند. همچنین ثابت شده‌است

که خاکستر بادی به عنوان یک عامل کنترل آلودگی برای آلودگی‌زدایی خاک، تصفیه لجن و پساب و تثبیت زباله‌های خطرناک استفاده می‌شود. خاکستر بادی می‌تواند به عنوان یک عامل محدود کننده، نقش مثبتی در کشاورزی و احیای اراضی ایفا کند. فلزات سنگین موجود در خاکستر بادی می‌توانند طیف گسترده‌ای از اثرات سمی را برای انسان، محیط زیست، خاک، آب و گیاهان کنترل کنند. بیشتر عناصر موجود در خاکستر بادی به صورت سیلیکات‌ها، اکسیدها، سولفات‌ها و سیلیکات‌های آلومینو هستند. این عناصر نمی‌توانند در محیط تجزیه یا تخریب شوند اما می‌توانند شکل خود را تغییر دهند. خاکستر بادی مقادیر زیادی از فلزات سنگین را در محل مصرف آزاد می‌کند و این فلزات سنگین نیز می‌توانند وارد محیط آبی شوند و در نتیجه منجر به ایجاد یک سطح زمین پایدار در این محل شوند.

نیز اشاره کردند که خاکستر بادی حاوی عناصر مغذی همچون سیلیسیم، اکسید آلومینیوم، اکسید آهن، کلسیم و گوگرد می‌باشد. وجود این عناصر برای تمام گیاهان و جانوران ضروری است. وجود گوگرد به عنوان یک انیدریت (CaSO) پس از هیدراتاسیون، باعث می‌شود خاکستر بادی به عنوان یک کود با عملکرد موفق برای بهبود گندم و برنج مورد استفاده قرار گیرد. سال ۲۰۰۲ مطالعه‌ای با تولید خاک مصنوعی با استفاده از خاکستر بادی، آهک و لجن فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. غلظت بالای فلزات سنگین و عناصر سمی لجن فاضلاب به عنوان ضایعات سمی طبقه بندی می‌شود. با افزودن خاکستر بادی واکنشی بین فلزات سنگین موجود به شکل هیدروکسیدهای فلز نامحلول در خاکستر بادی پیوند خورده ایجاد می‌شود. این ترکیب باعث بهبود بافت خاک و منجر به حاصلخیزی می‌شود.

نتایج مثبت به دست آمده منجر به کاشت مجموعه‌ای از محصولات و غلات شد. سیسو و همکاران در سال ۲۰۰۱ مقاله‌ای را با استفاده از خاک معدن ایتالیا آلوده به فلزات سنگین ارائه دادند. این مطالعه نشان داد که میزان فلزات سنگین در نفوذ آب به خاک کاهش یافته است و هم چنین نشان می‌دهد که خاکستر بادی در چنین خاک‌هایی می‌تواند منجر به بی‌حرکتی یون‌های فلزات سنگین شود. خاکستر بادی نیرگاه‌های آلمان هیچ آلودگی آبی ایجاد نمی‌کند زیرا که با آزمایش روی ماهی، موجودات آبی،

گیاهان آبی و موجودات ریز این امر مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این آزمایش ها از مخلوط خاکستر بادی و آب با نسبت ۱ به ۱ استفاده شده است و نتایج به دست آمده هیچ اثر دائمی و منفی بر روی موارد آزمایش نشان نداده است.

در انگلستان ، آژانس محیط زیست ارزیابی میزان سمی بودن را برای نظارت و کنترل تخلیه پساب های صنعتی در آب های سطحی مورد بررسی قرار داده است. این مطالعه نشان داده است که آب تخلیه شده از محل های تخلیه خاکستر بادی به قدری رقیق نمی شود تا تأثیری در آب شیرین داشته باشد. همچنین نتایج نشان داده است که رسوبات در مجاورت محل دفع خاکستر بادی، علیرغم اینکه برای سال های قابل توجهی کار می کنند، هیچ سمیت مشخصی ندارند. نتایج آزمایش ها نشان داده است که ترکیبات خاکستر بادی از تحرک محدودی برخوردار هستند. این مطالعه نشان داد که خاکستر بادی یک گزینه زیست محیطی است و هنگامی که به درستی برای تکنیک های تثبیت خاک استفاده می شود، دارای مزایای مهندسی است. [۱۰]

۲-۹-۶- تثبیت خاک با خاکستر بادی

خاکستر بادی در بسیاری از پروژه ها برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک عملکرد موافقی داشته است. از این ماده در پروژه های راه سازی می توان برای تثبیت خاک اساس و زیر اساس و همچنین پایداری خاک پشت دیوار حائل برای کاهش فشار خاک و تثبیت سدهای خاکی استفاده کرد. عمق معمول تثبیت خاک با این ماده بین ۱۵ تا ۴۶ سانتی متر است.

دلیل اصلی استفاده از خاکستر بادی در تثبیت خاک، بهبود مقاومت فشاری و برشی آن است. [۸]



شکل ۲-۱۷ تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی [۸]

۲-۱۰- فعال سازها

یکی از موارد اساسی در طراحی و استفاده از پسماندهای جامد در تثبیت خاک استفاده از فعال سازها می‌باشند. از مناسب‌ترین فعال کننده‌های که برای خاکستر بادی مناسب هستند می‌توان محلول سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات، سدیم کربنات و ترکیبی از این مواد را نام برد. مطالعات نشان می‌دهد سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات به دلیل عملکرد مناسبی که دارند بیشتر از سایر فعال سازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۱۷] از جمله دلایلی که باعث استفاده بیشتر از سدیم هیدروکسید جهت فعال سازی خاکستر بادی می‌شود، بالا بردن PH نمونه است که باعث تجزیه سریع تر این مواد می‌شود.

۲-۱۱- معرفی خانواده ژئوسنتتیک‌ها

۲-۱۱-۱- مقدمه

آنچه که امروزه با نام ژئوسنتتیک شناخته می‌شود در واقع محصولاتی است که نخستین بار در کارهای کنترل فرسایش زمین در سال ۱۹۶۶ مورد استفاده قرار گرفت. [۱۸، ۱۷] در کارهای اجرایی از نوع خاصی از ژئوسنتتیک در پشت دیوارهای بتنی که در معرض فرسایش قرار داشت استفاده گردید. این عناصر از الیاف تکرشته‌ای ساخته شده بودند و نسبت به منافع آنها به سطح کل ژئوسنتتیک، بین ۶ تا ۳۰ درصد

بود. معیارهای طراحی در این تجربیات نفوذپذیری کافی ژئوسنتتیک و درعین حال قابلیت نگهداری خاک به همراه مقاومت کافی الیاف در مقابل پاره شدگی بود. بر مبنای همین تجربه تا مدت‌ها بعد از این محصولات به عنوان فیلترهای مصنوعی یاد می‌کردند، درحالی‌که بعدها مشخص شد تنها یکی از عملکردهای اصلی ژئوسنتتیک‌ها خاصیت فیلتر بودن آنهاست.

در اواخر دهه ۱۹۶۰ در فرانسه نیز کار بر روی عملکردی دیگر از ژئوسنتتیک‌ها یعنی تسلیح لایه‌های خاک در حال شکل گرفتن بود. آنها در حقیقت با استفاده از الیاف غیر بافته در امر تسلیح لایه‌های خاک اولین گام را در استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در امر راه‌سازی برمی‌داشتند. هدف آنها تقویت لایه‌های خاکریز و بالادست در راه‌های شوسه و راه‌آهن و همچنین تقویت پی سدهای خاکی بود. البته تا آن زمان مجزا کردن عملکرد جداسازی ژئوسنتتیک‌ها از عملکرد تسلیح تقریباً امری ناشناخته بود و در اغلب موارد از ژئوسنتتیک‌ها به منظور برآوردن هر دو منظور استفاده می‌شد. استفاده از لایه‌های ضخیم نمد مانند در بین لایه‌های خاکریز جهت کاهش فشار منفذی و هدایت جریان آب در صفحه آن از دیگر موارد استفاده اولیه به شمار می‌رود. [۲۰]

۲-۱۱-۲- تعریف ژئوسنتتیک‌ها

ژئوسنتتیک‌ها در واقع محصولات مصنوعی هستند که از ترکیبات پلیمری ساخته شده و در فعالیت‌های عمرانی به کار می‌روند. ژئوسنتتیک‌ها در واقع همانند منسوجات مصنوعی از مواد پلیمری مثل پلی‌اتیلن و پروپیلن ساخته می‌شوند و توسط شرکت‌های مختلف و با نام‌های تجاری متفاوت به بازار مصرف عرضه می‌گردند مطابق تعریف مؤسسه ASTM-D 4439 ژئوسنتتیک‌ها محصولات مسطحی هستند از جنس مواد پلیمری که به عنوان جزئی جدایی‌ناپذیر همراه با مصالح طبیعی ژئوتکنیکی همانند خاک و سنگ در سازه‌های مهندسی عمران به کار برده می‌شوند.

۲-۱۱-۳- انواع ژئوسنتتیک‌ها

۲-۱۱-۳-۱- ژئوتکستایل‌ها

ژئوتکستایل‌ها از نظر نوع و کاربرد بزرگ‌ترین گروه ژئوسنتتیک‌ها را تشکیل می‌دهند. همان گونه که از نام این محصولات پیداست این دسته از ژئوسنتتیک‌ها در واقع مثل منسوجاتی هستند که به‌جای کاربرد الیاف طبیعی همانند نخ، ابریشم یا پشم در آنها، از الیاف مصنوعی و عمدتاً پلیمری در آنها استفاده می‌شود. آنها متخلخل و نفوذپذیر و از نظر ضخامت در ابعاد مختلف تولید می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها به دو گروه عمده بافته شده و بافته نشده قابل تقسیم هستند. ژئوتکستایل‌های بافته شده حاصل بافت الیاف مصنوعی تولید شده از مواد پلیمری هستند. در شکل (۲-۱۸) یک نوع ژئوتکستایل بافته شده نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸ ژئوتکستایل بافته شده

یکی از مشخصاتی که به کمک آن می‌توان محدوده عملکرد اصلی لایه‌های ژئوتکستایل را در امور راه‌سازی از یکدیگر تفکیک نمود و همچنین با استفاده از آن طراحی لازم را به انجام رساند، شاخص CBR بستر است. مقادیر این شاخص را می‌توان از طریق انجام آزمایشی با همین نام و طبق دستورالعمل ASTM-D1883 برای مصالح مختلف اندازه‌گیری کرد. در جدول (۲-۶) محدوده هر یک از عملکردهای اصلی لایه ژئوتکستایل در راه‌سازی با توجه به مشخصه مقاومتی بستر طبیعی زمین که

برحسب نتایج CBR ذکر شده، ارائه شده است.

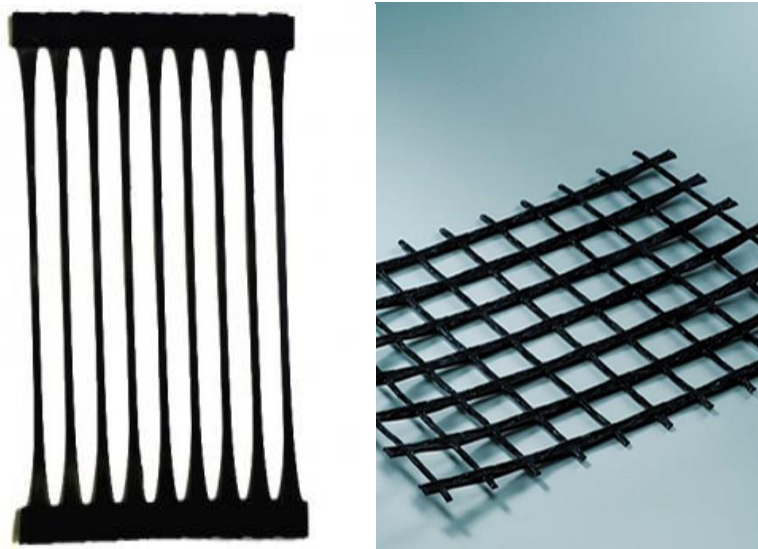
جدول ۶-۲ تفکیک عملکردهای اصلی ژئوتکستایل و ژئوگرید برحسب مقادیر CBR بستر طبیعی زمین

عملکرد ژئوتکستایل		مقادیر CBR بستر	
		خشک	غرقاب
جداسازی لایه‌ها		≥ 8	≥ 3
تثبیت (شامل جداسازی، زهکشی و فیلتراسیون در برخی موارد و تا حدودی نیز تسلیح)		۸-۳	۳-۱
تسلیح و جداسازی		≤ 3	≤ 1

مطابق این جدول در صورتی که CBR بستر طبیعی در حالت خشک بیشتر از ۸ و در حالت غرقاب بیشتر از ۳ باشد، عملکرد اصلی و قابل انتظار از ژئوتکستایل عملکرد جداسازی است. همچنین در شرایطی که CBR بستر در حالت خشک از ۳ و در حالت غرقاب از ۱ کوچک‌تر باشد می‌توان انتظار داشت که ژئوتکستایل به عنوان لایه تقویتی تسلیح کننده و جداکننده عمل می‌نماید.

۲-۱۱-۲- ژئوگریدها

ژئوگریدها به عنوان یکی از انواع ژئوسنتتیک‌ها محصولات پلیمری هستند که معمولاً به شکل شبکه‌های مشبک در یک جهت و یا در دو جهت ساخته می‌شوند. همان گونه که در شکل (۲-۱۸) ملاحظه می‌گردد، این شبکه‌ها و بخصوص حفره‌های میان آنها موجب می‌شود که ذرات خاک و یا مصالح سنگی به خوبی با آنها درگیر شده و مجموعه ژئوگرید و مصالح اطراف آنها از خاصیت قفل و بست خوبی برخوردار گردد. بدین ترتیب ژئوگرید به کار گرفته شده در لایه‌های خاگریز همانند عناصر مقاوم در مقابل کشش عمل کرده و در نواحی که تنش‌ها و تغییر شکل‌های کششی در خاک به وجود می‌آید به خوبی می‌تواند نیروها و تغییر شکل‌ها را در خود مهار نماید.



شکل ۲-۱۹ دو نمونه از انواع ژئوگریدها (تک محوره و دو محوره)

۲-۱۱-۳- ژئونت‌ها

ژئونت‌ها گروه دیگری از ژئوسنتتیک‌ها هستند که از مواد پلیمری و همانند شبکه‌های توری شکل تولید و عرضه می‌گردند. این نوع محصولات ابتدا در کشور انگلستان و به‌منظور حمل‌ونقل محصولات کشاورزی در فروشگاه ابداع گردید. آزمایش‌های مختلف بر روی این محصولات و به‌خصوص شکل هندسی توری‌ها و ضخامت تارهای به‌کاررفته در آنها نشان داد که این نوع محصولات از قابلیت زهکشی بالایی برخوردارند بدین ترتیب رفته‌رفته کاربرد ژئونت‌ها در فعالیت‌های مختلف عمرانی و به‌خصوص زهکشی خاک متداول گشت. ژئونت‌ها به‌خاطر قابلیت زهکشی در صفحاتشان این خاصیت را دارند که همراه با سایر ژئوسنتتیک‌ها و یا در امور مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۱۱-۴- ژئوممبرین‌ها

ژئوممبرین‌ها به غشاهایی از جنس مواد پلیمری پلاستیکی و یا لاستیکی هستند که نفوذپذیری بسیار اندکی دارند. این نوع از ژئوسنتتیک‌ها به دلیل خاصیت ناتراوایی که در مقابل عبور گازها و سیالات دارند دارای کاربردهای بسیار زیادی در صنعت می‌باشند. مواد پلیمری که به طور عمده در ساخت ژئوممبرین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد از نوع پلیمرهای ترموپلاستیک است. مشخصه اصلی این نوع

پلیمرها آن است که در مقابل حرارت گرما نرم و انعطاف پذیر می باشند اما خواص اصلی خود را حفظ می کنند. پس از سرد شدن مجدد خصوصیات اولیه خود را بازمی یابند بنابراین می توان به کمک گرما آنها را تغییر شکل داد و یا درزگیری کرد بدون آنکه خواص اولیه آنها از میان برود. شاید مهم ترین کاربرد این گروه از ژئوسنتتیک ها در فعالیت های عمرانی مقابله با پدیده تراوش و یا نفوذ آب و یا سایر مایعات و گازهای سمی و خطرناک در محل های نگهداری آنهاست. پوشش حوضچه ها و استخرهای نگهداری مایعات و عایق بندی مناطقی که در معرض نفوذ شیرابه های سمی هستند از دیگر کاربردهای ژئوممبرین ها است.

۲-۱۱-۳-۵- ژئوکامپوزیت ها

ژئوکامپوزیت ها مصنوعاتی ساخته شده از ترکیب دو یا چند نوع ژئوسنتتیک مختلف هستند. این محصولات گاهی اوقات همراه با سایر مواد پلیمری و یا غیر پلیمری نیز تولید می گردند هدف اصلی از تولید این گونه مصنوعات در واقع ترکیب ژئوسنتتیک های مختلف با خواص مناسب با یکدیگر و تولید محصولاتی است که بتواند به بهترین وجه و با کمترین هزینه مسائل خاصی را پاسخگو باشد. باتوجه به تعداد و تنوع ژئوسنتتیک ها مواد پلیمری و یا غیر پلیمری که در ساخت ژئو کامپوزیت ها به کار می روند، می توان ادعا نمود هیچ محدودیتی در تعداد و تنوع محصولات تولیدی از این نوع وجود ندارد. [۲۰]

جدول ۲-۷ کاربردهای اصلی ژئوسنتتیک ها در فعالیت های عمرانی [۲۱]

عملکرد اصلی ژئوسنتتیک					انواع
آب بند نمودن	زهکشی	فیلتراسیون	تسلیح و تقویت	جداسازی	ژئوسنتتیک
کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	ژئوتکستایل ها
کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد	ژئوگریدها
کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	ژئونت ها
کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد دارد	ژئوممبرین ها
کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	ژئوپایپ ها
کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	ژئوکامپوزیت ها

۱۲-۲- مطالعات پیشین

در این بخش به بررسی اثر تسلیح و تثبیت خاک با استفاده از ضایعات پلاستیکی و خاکستر بادی بر مقاومت خاک‌های مختلف در تحقیقات پیشین پرداخته شده است.

۱۲-۲-۱- بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک و مسلح کننده

در مقاوم‌سازی جاده‌ها از مصالح مختلفی استفاده می‌کنند این مسلح کننده‌ها به گونه‌ای هستند که باعث افزایش باربری، مقاومت و دوام لایه‌های بستر جاده‌ای می‌شود یکی از آزمایش‌هایی که برای بررسی این موضوع انجام می‌شود CBR است که در حالت خشک یا در حالت اشباع برای نمونه‌های مسلح شده انجام گرفته است در ادامه به بررسی پژوهش‌هایی که توسط محققین برای تسلیح خاک با مصالح مختلف صورت گرفته است پرداخته می‌شود.

آندرسلند^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ از پالپ فشرده خشک برای تقویت خاک اشباع کائولینیت استفاده کردند و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره دریافتند که افزودن این مواد به نمونه خاک منجر به افزایش مقاومت فشاری و افزایش کرنش محوری می‌شود. [۲۲]

ماهر و هو^۲ در ۱۹۹۴ آزمایش‌های سه محوری را بر روی ماسه مخلوط با سیمان و مسلح شده با الیاف PET به صورت توضیح تصادفی انجام دادند. نتایج نشان داد که تسلیح با الیاف، به طور چشمگیری مقاومت فشاری و کششی نمونه را افزایش می‌دهد. [۲۳]

گساوی و همکاران^۳ سال ۲۰۰۴ در پژوهشی که انجام دادند با مخلوط کردن تکه‌های جدا شده ژئوتکستایل و پشم شیشه در نمونه‌های خاک رسی به بررسی عملکرد آن تحت بارگذاری CBR پرداختند آن‌ها این مصالح مسلح کننده را در قالب‌های استاندارد تراکم سازی با خاک مخلوط کردند و با انجام

¹ O. B. Andersland

² M. H. Maher and Y. C. Ho

³ M. Gosavi et al

عملیات تراکم سازی در رطوبت بهینه و سپس انجام آزمایش‌های CBR نتایج را به صورت نمودارهای نشان دادند. جدول‌های (۸-۲) و (۹-۲) مشخصات خاک محل و همچنین مصالح مسلح کننده را نشان می‌دهد و جدول (۱۰-۲) نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. [۲۴]

جدول ۸-۲ مشخصات خاک محل [۲۴]

G	LL, %	PL, %	Optimum Moisture Content (OMC), %	Maximum Dry Density (MDD), t/m ³	Cohesion (c), t/m ²	Angle of Internal Friction (Φ), degree	California Bearing Ratio (CBR), %	Classification
2.36	38	14	21.04	1.44	4.1	14	4.9	Cl

جدول ۹-۲ مشخصات مصالح مصرفی [۲۴]

Type of Reinforcement	Diameter of Thread, mm	Aspect Ratio, Length Diameter	Reinforcement Mixed in Soil, %
Pieces cut as per the aspect ratio from woven fabrics	0.5	25 and 50	1, 2 and 3
Pieces cut as per the aspect ratio from fibre glass	0.1	250 and 500	1, 2 and 3

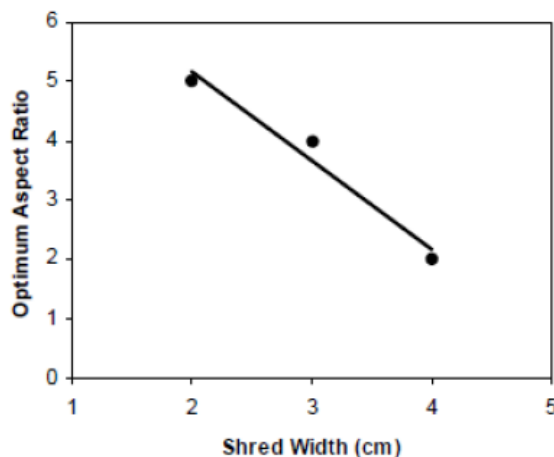
جدول ۱۰-۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها [۲۴]

Description	Aspect Ratio	Optimum Moisture Content (OMC), %	Maximum Dry Density (MDD), t/m ³	Cohesion (c), t/m ²	Angle of Internal Friction (Φ), degree	California Bearing Ratio (CBR), %
Soil without any fibre	—	21.04	1.440	4.1	14.0	4.90
Soil with woven fabrics						
1%	25	22.40	1.371	4.6	12.8	7.30
2%	25	23.73	1.369	5.2	12.5	7.65
3%	25	21.46	1.387	4.8	12.5	7.50
1%	50	22.55	1.382	5.2	13.0	7.85
2%	50	24.03	1.367	5.8	12.0	8.20
3%	50	21.73	1.390	5.3	12.5	8.05
Soil with fibreglass						
1%	250	22.15	1.350	4.6	12.8	7.00
2%	250	24.03	1.342	5.4	13.0	7.25
3%	250	21.73	1.360	5.1	13.5	7.10
1%	500	22.64	1.357	4.9	12.5	7.15
2%	500	24.78	1.330	5.6	12.0	7.60
3%	500	20.32	1.380	5.4	13.0	7.45

نتایج آن‌ها باتوجه به جدول (۱۰-۲) نشان از کاهش وزن مخصوص حداکثر، افزایش رطوبت بهینه و

همچنین افزایش مقادیر چسبندگی و CBR است. آن‌ها در بررسی خود به این نتیجه رسیدند که مصالح مسلح کننده با جایگزینی در بین ذرات خاک باعث کاهش وزن مخصوص مخلوط می‌شوند، اما با توجه به قرارگیری مناسب آن‌ها در بین ذرات خاک و بالا بودن مقاومت کششی آن‌ها، نتایج CBR و چسبندگی مقادیر بالاتری را نسبت به نمونه‌های غیرمسلح شده نشان می‌دهد. همچنین این محققین تأثیر بالارفتن چسبندگی خاک و کاهش ناچیز زاویه اصطکاک داخلی را در نتایج ظرفیت باربری و ضخامت لایه اساس مورد بررسی قراردادند که نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری و کاهش مناسب در ضخامت لایه اساس بوده است.

قضاوی و عامل سخی^۱ سال ۲۰۰۵ در پژوهشی عملکرد تراشه‌های لاستیکی در خاک ماسه‌ای متراکم را ارزیابی کردند و با انجام آزمایش CBR، اثر این مصالح مسلح کننده را بررسی کردند. این محققین بعد از انجام آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که در انرژی تراکم پایین‌تر، تأثیر ابعاد تراشه‌ها بیشتر است، همچنین تغییر مناسب در ابعاد تراشه‌ها می‌تواند باعث افزایش چشمگیری در مقدار CBR شود. شکل (۲۰-۲) برای هر عرض نسبت طول بهینه تراشه را نشان می‌دهد. [۲۵]



شکل ۲۰-۲ تغییرات ابعاد بهینه تراشه‌های لاستیکی بر حسب عرض تراشه‌ها [۲۵]

¹ M. Ghazavi and M. Amel Sakhi

عبدربور و اشماوی^۱ در سال ۲۰۰۷ با انجام آزمایش CBR، مسلح کردن ماسه با ژئوگرید را بررسی کردند. این محققین با قراردادن ژئوگرید در ارتفاعهای مختلف تأثیر آن‌ها را بر نتایج CBR بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند با نفوذ کم سنبه در خاک ژئوگرید نقش محدود کردن کرنش در خاک را ایفا می‌کند اما با نفوذ بیشتر سنبه، ژئوگرید عملکرد پراکنده کردن بار در لایه‌های زیرین و کاهش نشست در خاک را انجام می‌دهد. [۲۶]

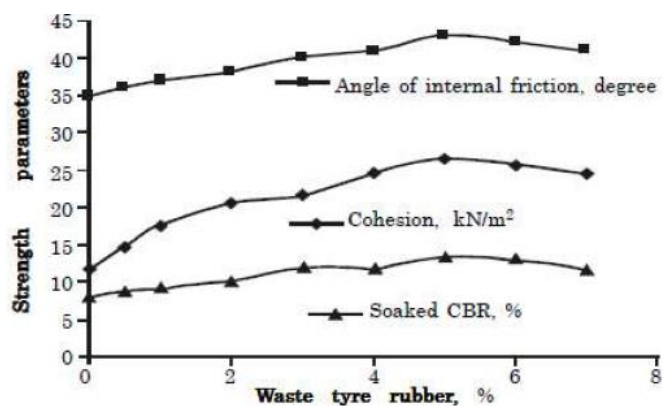
دوتا و ساردا^۲ در سال ۲۰۰۷ آزمایش‌های جهت بررسی مقدار CBR خاک رس اشباع در کنار خاکستر بادی مسلح شده به الیاف پلاستیکی انجام دادند. در این پژوهش، مقدار الیاف از ۰/۴ تا ۴ درصد متغیر بوده، آن‌ها نشان دادند که افزودن الیاف به خاکستر بادی بر روی خاک رس اشباع به میزان قابل توجهی مقدار CBR و مدول ثانویه خاک را افزایش می‌دهد. [۲۷]

پراساد و همکاران^۳ سال ۲۰۰۸ در مطالعات خود به بررسی تغییرات مقدار CBR در درصدهای مختلف خرده لاستیک و تکه‌های پلاستیک پرداختند. آن‌ها با افزودن درصدهای مختلف خرده لاستیک و تکه‌های پلاستیک به خاک شنی در حالت تراکم اصلاح‌شده و در درصدهای رطوبت بهینه نتایج CBR را حاصل کردند که شکل‌های (۲۱-۲) و (۲۲-۲) تغییرات مقادیر CBR را برای درصدهای مختلف خرده لاستیک و تکه‌های پلاستیکی نشان می‌دهد. این تغییرات رفتاری شامل تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و CBR است که به ترتیب از بالا به پایین نمودارهای مربوط به آن‌ها رسم شده است. لازم به ذکر است که خرده لاستیک‌های استفاده شده در این پژوهش رد شده از الک ۴.۷۵ میلی‌متر و تکه‌های پلاستیکی دارای ابعاد ۶×۱۲ میلی‌متر و ضخامت نیم میلی‌متر می‌باشند. [۲۸]

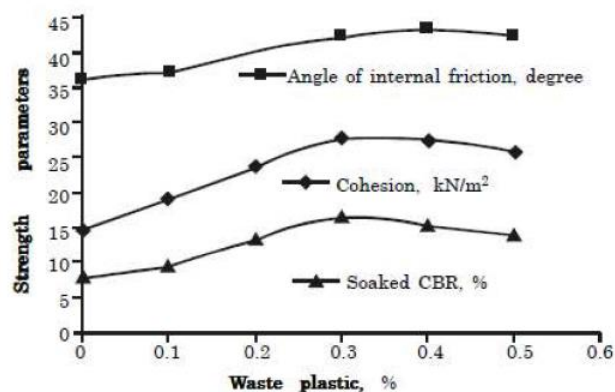
¹ F. M. Abdrabbo and A. K. Ashmawy

² R. K. Dutta and V. K. Sarda

³ D. S. V. Prasad et al



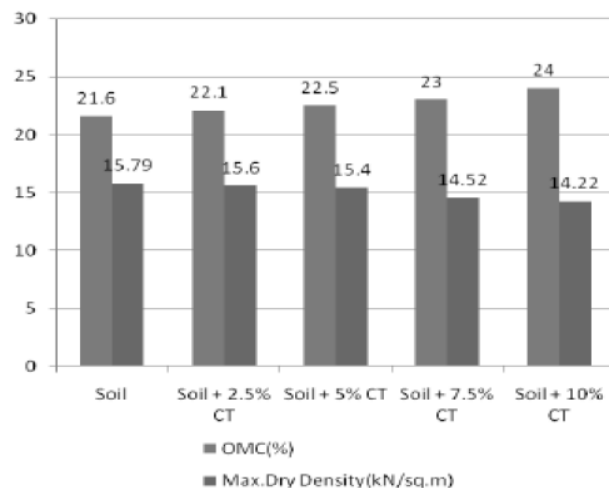
شکل ۲-۲۱ تغییرات نتایج CBR، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، برای درصد‌های وزنی مختلف تکه‌های لاستیک [۲۸]



شکل ۲-۲۲ تغییرات نتایج CBR، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، برای درصد‌های وزنی مختلف تکه‌های پلاستیک [۲۸]

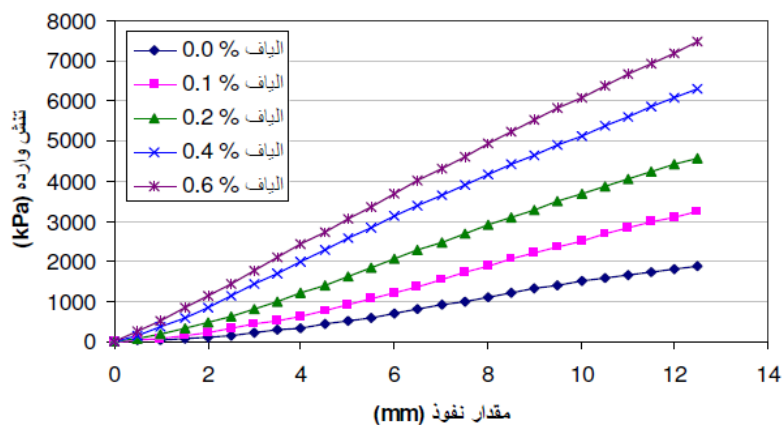
سوبراسانیان و چیا پریا^۱ سال ۲۰۰۹ در تحقیقات خود به بررسی عملکرد نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه، مسلح شده با پودر لاستیک‌ها و خرده پلاستیک‌ها تحت آزمایش CBR پرداختند. آزمایش‌های CBR را در دو حالت اشباع و غیراشباع انجام دادند که نتایج تغییرات این مقدار در شکل (۲۳-۲) آمده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از پودر لاستیک، باعث کاهش وزن مخصوص حداکثر و افزایش رطوبت بهینه خواهد شد، همچنین آن‌ها دریافتند درصد‌های بالای خرده پلاستیک باعث کاهش مقدار CBR خواهد شد. [۲۹]

¹ R. M. Subramaniam and Jeyapriya



شکل ۲۳-۲ مقایسه درصد‌های رطوبت بهینه (MPa) و حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m³) با تغییرات درصد وزنی پودر لاستیک‌ها [۲۹]

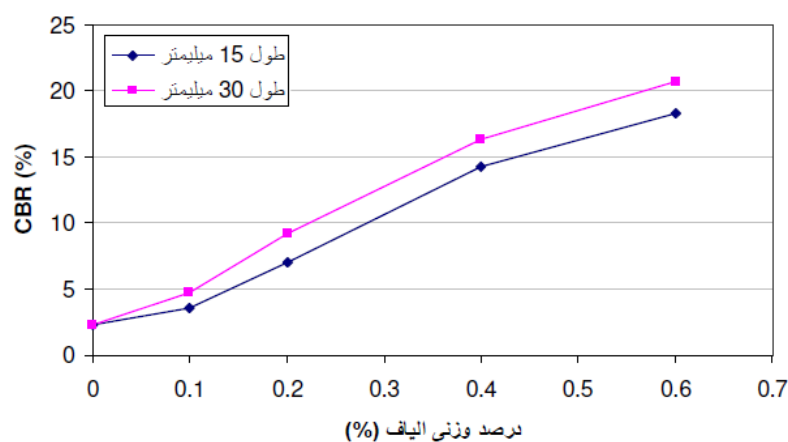
سیم نگار و کمالی در سال ۱۳۹۰ به مطالعه رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف PET (۰/۱ تا ۰/۶) پرداختند. بر روی نمونه‌های مسلح شده آزمایش‌های CBR، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم انجام دادند که نتایج حاصل از آزمایش‌های CBR در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است. [۳۰]



شکل ۲۴-۲ تغییرات تنش بر حسب نفوذ سنبه برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر [۳۰]

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود مقدار تنش با افزایش مقادیر نفوذ، افزایش یافته است که در نمونه‌های غیرمسلح یا مسلح شده با درصد الیاف کم نرخ افزایش تنش کاهش یافته است. ولی در سایر نمونه‌های مسلح شده با نرخ افزایش تنش ثابت مانده است یا به آرامی کاهش یافته است و پروسه

افزایش مقاومت با افزایش نفوذ، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

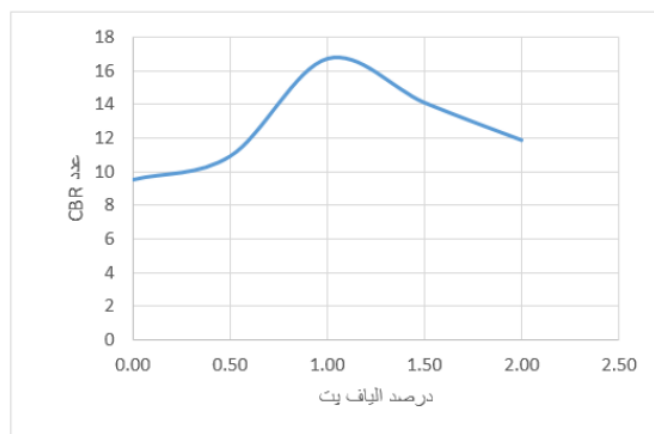


شکل ۲-۲۵ تغییرات CBR برحسب درصد الیاف [۳۰]

باتوجه به نمودار شکل (۲-۲۵) افزودن الیاف ضایعات پلاستیکی به خاک موجب افزایش مقدار CBR خاک شده و رسیدن به تنش حداکثر در کرنش‌های بالاتر، نشان می‌دهد تسلیح موجب افزایش شکل‌پذیری خاک شده است.

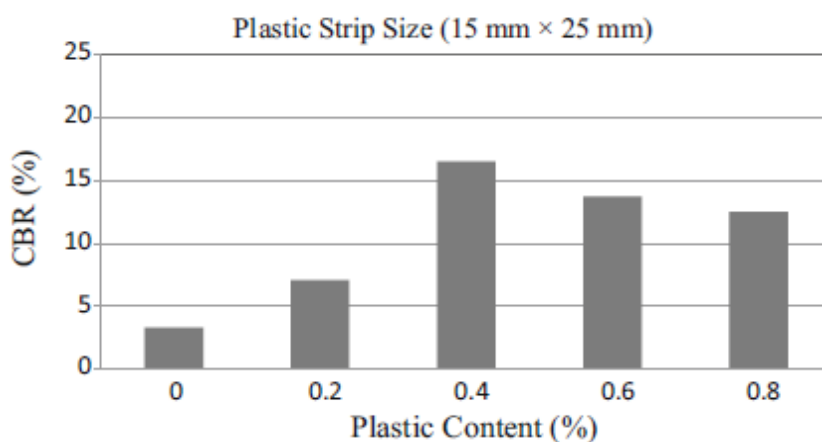
دادوند و همکاران در سال ۱۳۹۶ پژوهشی بر روی ماسه مسلح شده بابلسر با الیاف ضایعات پلاستیکی انجام دادند و در تحقیقات خود آزمایش‌های برش مستقیم و CBR را بررسی کردند. نتایج آزمایش CBR در شکل (۲-۲۵) آمده است، همان طور که قابل مشاهده است با افزایش مقدار الیاف تا ۱ درصد مقدار CBR در حال افزایش و سپس کاهش یافته است. [۳۱]

درصد الیاف	عدد cbr
0.00	9.5
0.5	10.9
1	16.7
1.5	14.08
2	11.85



شکل ۲-۲۶ تغییرات CBR در ماسه مسلح با الیاف ضایعات پلاستیکی [۳۱]

پدیا و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۸ با افزودن خرده PET با ابعاد ۱/۵×۲/۵ سانتیمتر در درصدهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ و با انجام آزمایش CBR به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که افزودن خرده PET باعث افزایش مقدار CBR نمونه خاک می‌شود. [۳۲]



شکل ۲-۲۷ تأثیر درصد الیاف PET بر مقدار CBR [۳۲]

۲-۱۲-۲- بررسی تأثیر تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی

مطالعات زیادی با رویکردهای مختلف در مورد استفاده از خاکستر بادی انجام شده است. در تحقیقات مختلف، برخی آزمایش‌های رایج برای بدست آوردن خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قبل و بعد از عملیات تثبیت خاک با خاکستر بادی صورت گرفته است. جدول شماره (۲-۱۱) نتایج تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از خاکستر بادی به همراه یک ماده فعال کننده را نشان داده است.

¹ S. Peddaiah et al

جدول ۱۱-۲ نتایج تثبیت خاک با استفاده از خاکستر بادی در مطالعات مختلف

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
کولياس و همکاران ^۱ (۲۰۰۴) [۳۳]	۹۱ روز عمل آوری			سیمان	رس سست	٪۲۰
	۳/۱	۰/۱	رطوبت بهینه (MPa)			
	٪۱۸۵	٪۱۰	مقاومت تک محوری			
	۱۳/۱	۱۵/۹	CBR			
	٪۳۰	٪۲۲	وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۲۸ روز عمل آوری			سیمان	رس سست	٪۲۰
	٪۳۰	٪۲۲	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱/۷	۰/۱	مقاومت تک محوری			
	۱۳/۱	۱۵/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۹۱ روز عمل آوری			سیمان	رس چسبنده	٪۲۰
	۱/۷۵	۰/۱	مقاومت تک محوری			
	٪۱۱۰	٪۱۰	CBR			
	۲۸ روز عمل آوری			سیمان	رس چسبنده	٪۲۰
	۱/۲۵	۰/۱	مقاومت تک محوری			
	۹۱ روز عمل آوری			سیمان	رس سست	٪۱۰
	٪۲۶	٪۲۲	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱/۹	۰/۱	مقاومت تک محوری			
	٪۱۴۰	٪۱۰	CBR			
	۱۴/۱	۱۵/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۲۸ روز عمل آوری			سیمان	رس سست	٪۱۰
	٪۲۶	٪۲۲	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱/۱	۰/۱	مقاومت تک محوری			
	۱۴/۱	۱۵/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۹۱ روز عمل آوری			سیمان	رس چسبنده	٪۱۰
	۰/۷	۰/۱	مقاومت تک محوری			

¹ S. Kolias et al

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
کولياس و همکاران	٪۶۰	٪۱۰	CBR			
	۰/۵	۰/۱	مقاومت تک محوری	سیمان	رس چسبنده	٪۱۰
	۲۸ روز عمل آوری			سیمان	ماسه سیلتی	٪۴۰
آیدلیک و آروزا ^۱ (۲۰۰۵) [۳۴]	۱۵/۴۶		حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			کلاس F
	۵		مقاومت تک محوری			
	۷ روز عمل آوری			سیمان	ماسه سیلتی	٪۴۰
	۱۵/۴۶		حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			کلاس F
	۳/۲		مقاومت تک محوری			
	٪۱۴۰		CBR			
	۲۸ روز عمل آوری			آهک	ماسه سیلتی	٪۴۰
	۱۵/۳۶		حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			کلاس F
	۰/۴		مقاومت تک محوری			
	۷ روز عمل آوری			آهک	ماسه سیلتی	٪۴۰
	۱۵/۳۶		حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			کلاس F
	۰/۳		مقاومت تک محوری			
	٪۳۶		CBR			
	۲۸ روز عمل آوری			رس با حد خمیری پایین		٪۶۰
	٪۲۸	٪۱۴	رطوبت بهینه (MPa)			
سانتوس و همکاران (۲۰۱۱) ^۲ [۳۵]	۱۳/۹	۱۷/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۲/۶۷		مقاومت تک محوری			

¹ A. H. Aydilek and S. Arora

² F. Santos et al

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
سائتوس و همکاران (۲۰۱۱) [۳۵]	۲۸ روز عمل آوری				رس با حد خمیری پایین	۴۰٪
	۲۵٪	۱۴٪	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴/۶	۱۷/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۲/۶۵		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری				رس با حد خمیری پایین	۲۰٪
	۲۲/۵٪	۱۴٪	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۵/۵	۱۷/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۱/۳۵		مقاومت تک محوری			
کریستلو و همکاران ^۱ (۲۰۱۱) [۳۶]	۸۴ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۲۰٪ کلاس F
	۸/۶		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۲۰٪ کلاس F
	۱/۷		مقاومت تک محوری			
	۸۴ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۲۰٪ کلاس C
	۳		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۲۰٪ کلاس C
	۱/۳		مقاومت تک محوری			
	۸۴ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۱۰٪ کلاس F
	۴/۲		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۱۰٪ کلاس F
	۰/۶		مقاومت تک محوری			

¹ N. Cristelo et al

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
کریستلو و همکاران (۲۰۱۱) [۳۶]	۸۴ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۱۰٪ کلاس C
	۲		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	رس چسبنده	۱۰٪ کلاس C
	۱/۱		مقاومت تک محوری			
ریس و پاندو ^۱ (۲۰۰۷) [۳۷]	۴۰ روز عمل آوری				رس با حد خمیری بالا	۲۰٪ کلاس C
		۱۲/۱	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۰/۹۶	۰/۲۴	مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری				رس با حد خمیری بالا	۲۰٪ کلاس C
		۱۲/۱	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۰/۹	۰/۲۴	مقاومت تک محوری			
	۴۰ روز عمل آوری				رس با حد خمیری بالا	۱۰٪ کلاس C
		۱۲/۱	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۰/۵۶	۰/۲۴	مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری				رس با حد خمیری بالا	۱۰٪ کلاس C
		۱۲/۱	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۰/۴۵	۰/۲۴	مقاومت تک محوری			
ساهو ^۲ (۲۰۰۱) [۳۸]	۷ روز عمل آوری				ماسه کالاهاری	۲۴٪
	۷٪	۵٪	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴/۷	۱۷/۳	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m ³)			
	۱۰٪	۴۰٪	CBR			

¹ A. Reyes and M. Pando

² B. K. Sahu

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
سأهو (۲۰۰۱) [۳۸]	۷ روز عمل آوری		رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه کلستر	٪۲۴	
	٪۱۷	٪۱۵/۶۰				
	۱۶/۳	۱۷/۲				
	٪۹۰	٪۴۰	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه سیلتی	٪۲۴	
	٪۹	٪۹				
	۱۸/۲	۱۹				
سأهو (۲۰۰۱) [۳۸]	٪۴۷۰	٪۸۰	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه سیلتی	٪۲۴	
	٪۲۳/۵۰	٪۲۰				
	۱۴/۸	۱۵/۱				
	٪۲۵	0%	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه کلستر	٪۲۴	
	٪۱۲/۳۰	۱۲٪				
	۱۸/۹	۱۹/۸				
سأهو (۲۰۰۱) [۳۸]	٪۲۳۰	٪۱۰	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه کلستر	٪۲۴	
	٪۷	٪۵				
	۱۶/۸	۱۷/۳				
سأهو (۲۰۰۱) [۳۸]	٪۳۰	٪۴۰	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه کلستر	٪۲۴	
	٪۱۹/۹۰	٪۱۵/۶۰				
	۱۶/۴	۱۷/۲				
	٪۶۰	٪۴۰	رطوبت بهینه (MPa) حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3) CBR	ماسه کلستر	٪۲۴	
	٪۱۹/۹۰	٪۱۵/۶۰				
	۱۶/۴	۱۷/۲				

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
سأهو (۲۰۰۱) [۳۸]	۷ روز عمل آوری				ماسه سیلتی	۸٪
	٪۸/۸۰	٪۹	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۸/۶	۱۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	٪۳۱۵	٪۸۰	CBR			
	۷ روز عمل آوری				خاک رس (خاک پنبه سیاه)	۸٪
	٪۲۲/۷۰	٪۲۰	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۵/۳	۱۵/۱	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	٪۵	٪۰	CBR			
	۷ روز عمل آوری				سیلت با حد پلاستیک پایین	۸٪
	٪۱۱/۹۰	۱۲٪	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۹/۶	۱۹/۸	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	٪۴۰	٪۱۰	CBR			
کریستلو و همکاران ^۱ (۲۰۱۱) [۳۹]	۳۶۵ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۴۰ کلاس F
	۴۳		مقاومت تک محوری			
	۹۰ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۴۰ کلاس F
	۱۷		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۴۰ کلاس F
	۸		مقاومت تک محوری			
	۳۶۵ روز عمل آوری			سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۲۰ کلاس F

¹ N. Cristelo et al

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
کریستلو و همکاران (۲۰۱۱) [۳۹]	۲۴		مقاومت تک محوری	سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۲۰ کلاس F
	۵		مقاومت تک محوری	سدیم هیدروکسید	خاک رسی	٪۲۰ کلاس F
	۳/۵		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس F
	۹۰ روز عمل آوری		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
مک کاراتی و همکاران ^۱ (۲۰۱۱) [۴۰]	٪۲۶/۹۰	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۴/۳	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱/۹		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۰/۲۸	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۳/۷	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱/۵		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۲۶/۹۰	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۴/۳	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱/۴		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۲۸ روز عمل آوری		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۰/۲۸	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱۳/۷	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C
	۱/۲		مقاومت تک محوری	آهک	خاک رس آکسفورد	٪۲۴ کلاس C

¹ M. J. Mccarthy et al

منابع	نتایج		تست	فعال ساز	خاک	خاکستر بادی
	بعد تثبیت	قبل تثبیت				
مک کارتی و همکاران (۲۰۱۱) [۴۰]	۹۰ روز عمل آوری			آهک	خاک رس آکسفورد	۱۲٪ کلاس F
	٪۲۶/۷۰	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴/۴	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۱/۷		مقاومت تک محوری			
	۹۰ روز عمل آوری			آهک	خاک رس آکسفورد	۱۲٪ کلاس C
	٪۲۷/۴۰	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۱/۴		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			آهک	خاک رس آکسفورد	۱۲٪ کلاس F
	٪۲۶/۷	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴/۴	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۱/۳		مقاومت تک محوری			
	۲۸ روز عمل آوری			آهک	خاک رس آکسفورد	۱۲٪ کلاس C
	٪۲۷/۴۰	٪۲۵	رطوبت بهینه (MPa)			
	۱۴	۱۴/۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (KN/m3)			
	۱/۲		مقاومت تک محوری			

پس از بررسی نتایج در جدول (۲-۱۱) می توان مشاهده کرد که اکثر تحقیقات بر روی نمونه های رسی صورت گرفته است. می توان دریافت که در تمام تحقیقات به جز یک مورد که CBR کاهش پیدا کرده، در بقیه موارد CBR افزایش پیدا کرده است. ساهو در تحقیقات خود به این نتیجه رسید وقتی که ۲۴٪ خاکستر بادی استفاده می شود مقدار CBR از ۴۰٪ به ۱۰٪ و زمانی که فقط ۸٪ به کار برده می شود این مقدار تا ۳۰٪ کاهش می یابد. کاهش این مقدار CBR احتمالاً ناشی از خواص ماسه منطقه ی

کالاهاری است. [۳۸] آیدیلک و آروزا در پژوهشی ماسه سیلتی را با ۴۰٪ خاکستر بادی کلاس F به همراه دو فعال کننده مختلف آهک و سیمان تثبیت کردند. پس از چهار هفته عمل آوری، نمونه تثبیت شده با سیمان دارای مقاومت فشاری ۵ مگاپاسکال بوده، یعنی دوازده برابر بیشتر از نمونه تثبیت شده با آهک بدست آمده است. [۳۴] همانطور که کریستلو و همکاران اشاره کردند مقاومت مکانیکی نمونه‌های پایه سیمانی به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های پایه آهکی است. [۳۶] سانتوس و همکاران نشان دادند وقتی خاکستر بادی از ۴۰٪ به ۶۰٪ افزایش یابد، بهبود قابل توجهی مشاهده نمی‌شود، در حالی که افزایش آن از ۲۰٪ به ۴۰٪ باعث بهبود چشمگیری می‌شود. [۳۵] کریستلو و همکاران نتایج یک تحقیق گسترده در مورد بهبود خاک با استفاده از خاکستر بادی کلاس F را منتشر کردند، نمونه‌های آن‌ها با ۴۰٪ خاکستر بادی و دوره عمل آوری ۳۶۵ روزه ساخته شدند، مقاومت فشاری محدود نشده از ۴ به ۴۳ مگاپاسکال رسیده است، در همین تحقیق مقدار مقاومت فشاری محدود نشده برای ۹۰ و ۲۸ روز عمل آوری نیز به ترتیب ۱۷ و ۸ مگاپاسکال به دست آمده است. [۳۹] کریستلو و همکاران تثبیت خاک را با استفاده از خاکستر بادی کلاس C و F با درصد مشابه (۲۰٪) خاکستر بادی و دوره عمل آوری ۸۴ روزه مقایسه کردند، نتایج آن‌ها نشان داد نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر بادی کلاس F تقریباً سه برابر مقاومت نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با کلاس C را داشتند. [۳۶] کریستلو و همکاران از سدیم هیدروکسید به عنوان فعال کننده استفاده کردند، که نتایج آن‌ها قابل قبول بود. [۳۸، ۳۵]

می‌توان نتیجه گرفت که مؤثرترین راه تثبیت، استفاده از خاکستر بادی کلاس F همراه با یک فعال کننده و در نهایت عمل آوری مناسب برای به حداکثر رسیدن مقاومت است.

فصل سوم

روش انجام تحقیق

۳-۱- مقدمه

در پژوهش حاضر، تسلیح و تثبیت خاک ماسه‌ای با استفاده از ضایعات پلاستیکی PET و خاکستر بادی صورت گرفته است. در این فصل تئوری آزمایش‌های انجام شده جهت شناسایی خاک از قبیل چگالی ویژه (Gs)، دانه‌بندی و آزمایش تراکم خاک جهت تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص خاک (γ_d) بیان شده است.

۳-۲- مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر بر روی تسلیح و تثبیت خاک ماسه‌ای ریزدانه بندر انزلی با خرده‌ها، نوارها و Geopet به همراه خاکستر بادی به‌عنوان تثبیت‌کننده، تحت آزمایش CBR کار شده است. در این قسمت به معرفی مصالح و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده پرداخته شده است.

۳-۲-۱- ماسه

خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این تحقیق که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، از نوع ماسه کربناته به‌صورت یکنواخت و بد دانه‌بندی شده است که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)^۱ در گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر آزمایش‌ها بر روی این خاک در دو حالت خشک و رطوبت بهینه انجام شده است. بر اساس آزمایش دانه‌بندی خاک و الک‌های به کاربرد شده که بر اساس استاندارد ASTM D422-87 صورت گرفته است مشخصات فیزیکی به‌دست‌آمده مطابق جدول (۳-۱) است.

جدول ۳-۱ مشخصات فیزیکی ماسه مصرفی

ویژگی	Gs	emax	emin	$(\gamma_d)_{min}$	$(\gamma_d)_{max}$	D50(mm)	Cu	Cc
مقدار	۲٫۶۸	۰٫۶۵	۱٫۱۲	۱٫۲۳	۱٫۵۹	۰٫۱۷	۱٫۲۵	۱٫۰۷

^۱ Unified Soil Classification System



شکل ۳-۱ خاک ماسه‌ای مصرفی در این پژوهش

۳-۲-۲- PET

خرده‌ها و نوارهای PET مصرفی در آزمایش‌های تحقیق حاضر، به صورت خرده‌های چپس ۱×۱ سانتی‌متری و نوارهای ۵×۱ سانتی‌متری با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و Geopet با اندازه چشمه‌های متفاوت (۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳) و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر بوده‌اند، برای ساخت Geopet ها ورقه‌های PET از کارخانه بازیافت ضایعات پلاستیکی فیروزپلاست به صورت رول تهیه شده، سپس توسط برش لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر به اندازه چشمه‌های مدنظر درآورده شده‌اند. ضایعات پلاستیکی به عنوان المان‌های تسلیح در خاک به کار گرفته رفته‌اند. در شکل (۳-۲) PET های مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ PETهای مصرفی در این پژوهش الف: PET نواری، ب: PET خرد، ج: Geopet

۳-۲-۳- خاکستر بادی

طبق استاندارد ASTM C618 خاکستر بادی مصرفی بر اساس ترکیب شیمیایی از نوع کلاس F (دارای حداقل ۷۰ درصد وزنی $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) است. در جدول (۲-۳) نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی خاکستر بادی مصرفی در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۲-۳ اکسیدهای تشکیل دهنده خاکستر بادی مصرفی

مواد شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Cao	Mgo	So_3	L.o.I
درصد	۸۷٫۸۳	۶٫۷۹	۰٫۹۹	۰٫۷	۱٫۵	۱٫۱۶	۴٫۱۷

باتوجه به نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی واضح است که خاکستر بادی مصرفی در این پژوهش از نوع کلاس F است.

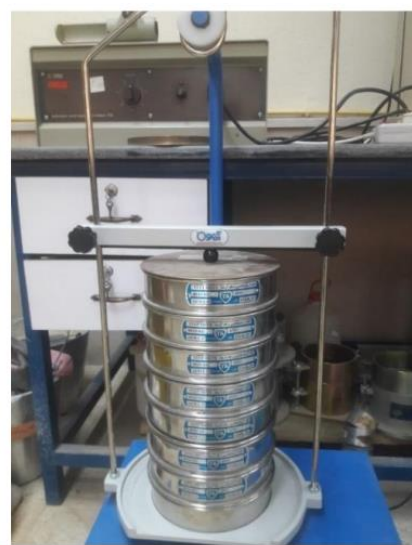
۳-۲-۴- فعال کننده قلیایی

ماده فعال ساز استفاده شده در این تحقیق سدیم هیدروکسید به فرمول شیمیایی NaOH که به صورت سود جامد بوده و در آزمایشگاه باتوجه به غلظت مورد نظر به صورت محلول در آمد. غلظت انتخاب شده در این پژوهش ۸ مولار بوده که باتوجه به تحقیقات پیشین این مقدار برای فعال سازی خاکستر بادی به نظر بهینه می آید.

۳-۳- آزمایش های شناسایی خاک

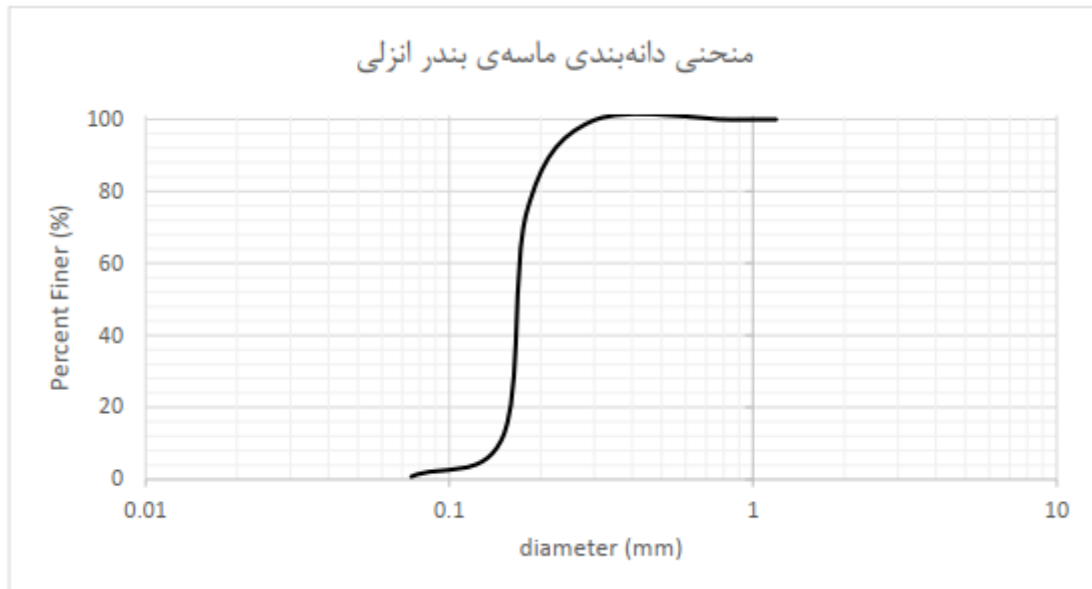
۳-۳-۱- آزمایش دانه بندی

آزمایش دانه بندی خاک مطابق استاندارد ASTM D422-87 صورت گرفت. هدف این آزمایش تعیین چگونگی توزیع اندازه مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه به وسیله الک کردن است. توزیع ذرات درشت تر از ۰/۰۷۵ میلی متر با انجام آزمایش دانه بندی توسط الک حاصل می شود، از آنجا که در خاک مصرفی این مقدار بسیار کم بود (کمتر از ۱٪ وزنی خاک)، لذا خاک فاقد ریزدانه محسوب شده و در شکل (۳-۳) تصویری از الک های به کار رفته در این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ الک های به کار رفته جهت آزمایش دانه بندی

باتوجه به منحنی دانه‌بندی خاک، نشان داده شده در شکل (۳-۴) مشهود است که ماسه استفاده شده در این پژوهش، ماسه یکنواختی بوده و ذرات خاک محدوده ابعادی محدودی دارند.



شکل ۳-۴ منحنی دانه‌بندی ماسه بندر انزلی

همان طور که در منحنی دانه‌بندی مشاهده می‌شود، ماسه مصرفی از نوع بد دانه‌بندی شده است که در گروه‌بندی یونیفاید یا متحد، در دسته SP قرار می‌گیرد.

۳-۲-۳-۳- آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد (G_s)

چگالی ویژه به بخش جامد خاک، به نسبت حجمی واحد بخش جامد به وزن همان حجم از آب مقطر بدون گاز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد گفته می‌شود. آزمایش تعیین چگالی ویژه در این پژوهش، بر اساس استاندارد ASTM D854-87 و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_3}{W_3 - W_1 + W_2} \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

در رابطه فوق چگالی دانه‌های جامد خاک (G_s) محاسبه می‌شود که γ_s چگالی دانه‌های جامد خاک، γ_w وزن مخصوص آب، W_3 وزن خاک، W_2 وزن پیکنومتر و آب و W وزن پیکنومتر، آب و خاک است.

GS ماسه مورد استفاده در پژوهش حاضر مطابق با رابطه (۳-۱) ۲/۶۸ محاسبه گردید.

۳-۳-۳- آزمایش‌های تجربی تعیین حداقل و حداکثر چگالی ماسه خشک (γ_d) جهت

اعمال تراکم نسبی (D_r) ۷۰٪ بر نمونه خاک

در پژوهش حاضر، نمونه‌های خاک مسلح با تراکم نسبی ۷۰٪ ساخته شدند. برای اعمال این تراکم بر نمونه خاک در قالب ۶ اینچ، مطابق رابطه (۳-۲) باید چگالی خشک خاک (γ_d) به صورت تجربی اعمال شود.

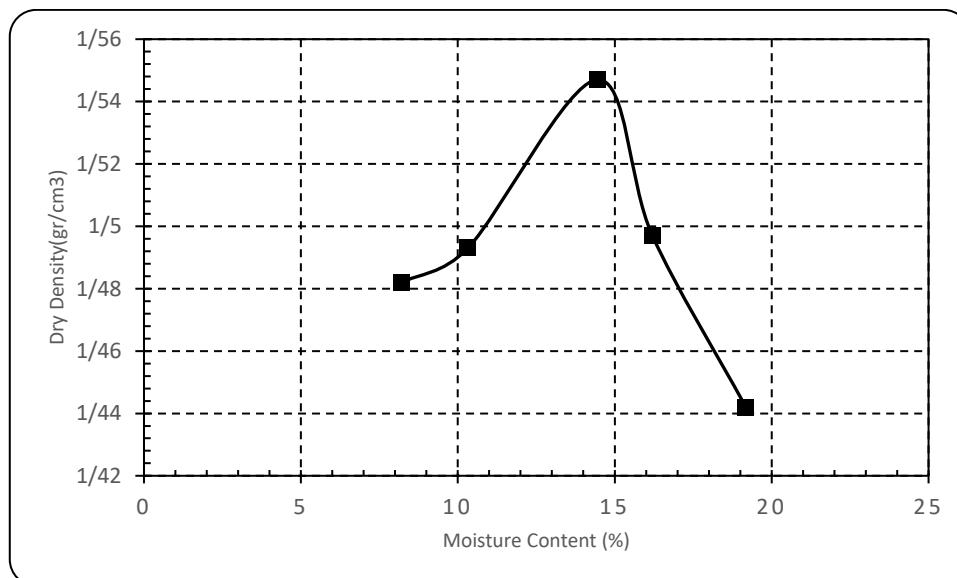
$$D_r = \frac{(\gamma_d)_{max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - (\gamma_d)_{min}}{(\gamma_d)_{max} - (\gamma_d)_{min}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

برای به دست آوردن $(\gamma_d)_{max}$ و $(\gamma_d)_{min}$ ، خاک با وزن ثابت از ارتفاع‌های مختلف و با میزان کوبش‌های مختلف در درون قالب ریخته شد تا به حجم‌های برای چگالی‌های مختلف برسد که در نهایت $(\gamma_d)_{max}$ و $(\gamma_d)_{min}$ برای رسیدن به تراکم نسبی ۷۰٪ به صورت زیر حاصل گردید.

$$(\gamma_d)_{min} = 1.23, \quad (\gamma_d)_{max} = 1.59$$

۳-۳-۴- آزمایش تراکم اصلاح شده

در این آزمایش که طبق استاندارد ASTM D698-1 صورت می‌گیرد متراکم کردن خاک با اعمال انرژی مکانیکی به توده خاک انجام می‌شود. با انجام این عمل هوای محبوس بین حفرات خاک خارج شده و دانه‌ها به هم نزدیک‌تر می‌شوند و باعث افزایش درگیری بین آن‌ها می‌شود. هدف از این آزمایش تعیین درصد رطوبتی برای خاک است که به‌ازای آن، متراکم‌ترین حالت را داشته باشد. شکل (۳-۵) منحنی تراکم خاک ماسه بندر انزلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ منحنی تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی

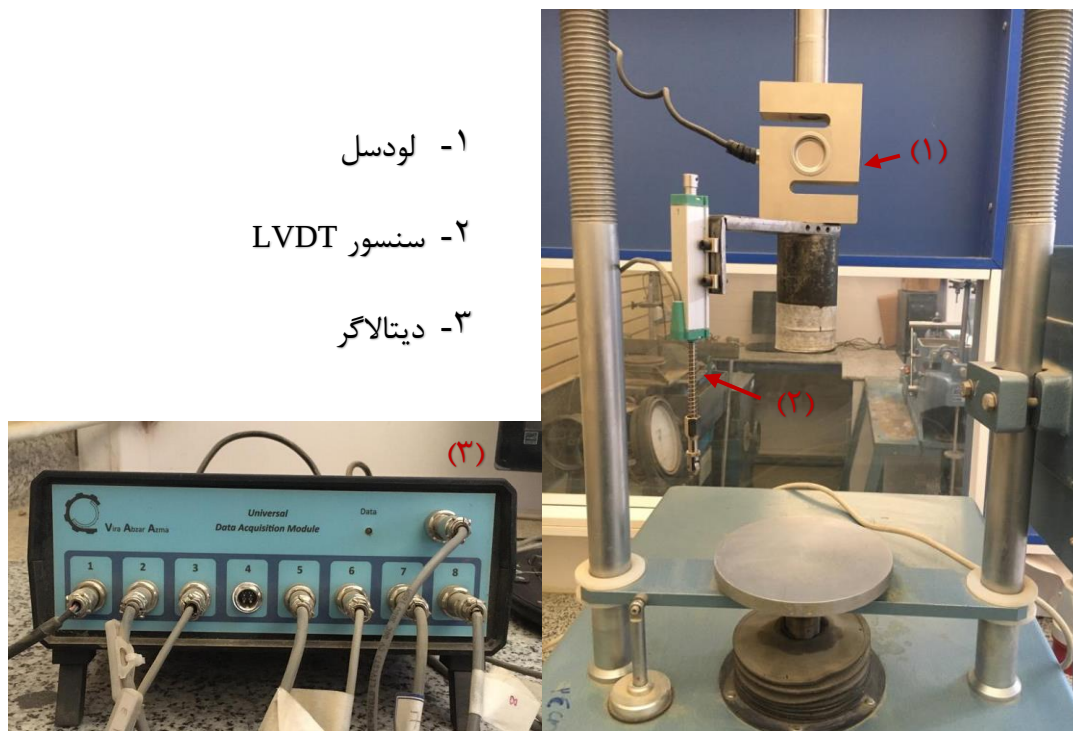
۳-۳-۵- آزمایش‌های CBR

آزمایش CBR متداول‌ترین روش برای تعیین مقاومت نسبی خاک در راه‌سازی است. این آزمایش در اداره راه‌سازی ایالت کالیفرنیا آمریکا ثبت و مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان ظرفیت باربری خاک بستر را به دست آورد و بر اساس مشخصات آن لایه‌های اساس و زیراساس را طراحی نمود.

۳-۴- دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش CBR در این پژوهش

در پژوهش حاضر آزمایش‌های CBR جهت تعیین مقاومت نسبی خاک در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده بر روی ماسه بندر انزلی انجام شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از سیستم بارگذاری دستگاه تک‌محوری انجام گرفته‌اند. در این آزمایش‌ها، جابه‌جایی قائم، به وسیله یک عدد سنسور LVDT، با کورس ۱۰۰ میلی‌متر و با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. همچنین تنش قائم به وسیله یک لودسل ۵ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم-فورس با نرخ هر ۰/۰۲۵ در ثانیه (۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه) اندازه‌گیری شده و اطلاعات از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر انتقال داده شده است. تجهیزات

سیستم بارگذاری در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. داده‌های خروجی در کامپیوتر، در محیط نرم‌افزار Vira data soft جمع‌آوری و پردازش می‌شوند. در این نرم‌افزار برای هریک از سنسورها، کانال مجزا تعریف شده که می‌توان کالیبراسیون سنسور را بر روی آن کانال انجام داد و پارامترهای موردنظر را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۳-۶ سیستم بارگذاری

۳-۴-۱- تجهیزات آزمایش

در پژوهش حاضر برای انجام آزمایش‌های CBR جهت تعیین ظرفیت باربری خاک از تجهیزات مختلفی به شرح زیر استفاده شده است.

- قالب تراکم، قالبی با ارتفاع ۱۷٫۸ سانتی‌متر و قطر ۱۵٫۲ سانتی‌متر
- چکش تراکم به وزن ۴٫۵ کیلوگرم
- سیستم اعمال فشار برای فرو بردن سنبه با نرخ بارگذاری ۱٫۲۷ میلی‌متر بر دقیقه

- دستگاه کرنش سنج با دقت ۰/۰۱ میلی متر
- وزنه های اعمال سربار
- سنبه فولادی به سطح مقطع ۳ اینچ مربع
- صفحه فلزی آبکش ته قالب
- الک شماره ۴
- ظرف آب برای اشباع کردن نمونه
- ترازو به دقت ۰/۰۱ گرم
- لوازم متفرقه شامل، سینی، قاشق، ترازو، خطکش لبه تیز و کاردک

۳-۵- ساخت نمونه ها

ساخت نمونه ها در این پژوهش به سه قسمت اصلی تقسیم می شود که توضیح هر بخش در ادامه آمده است.

۳-۵-۱- ساخت نمونه های مسلح شده با خرده ها و نوارهای PET

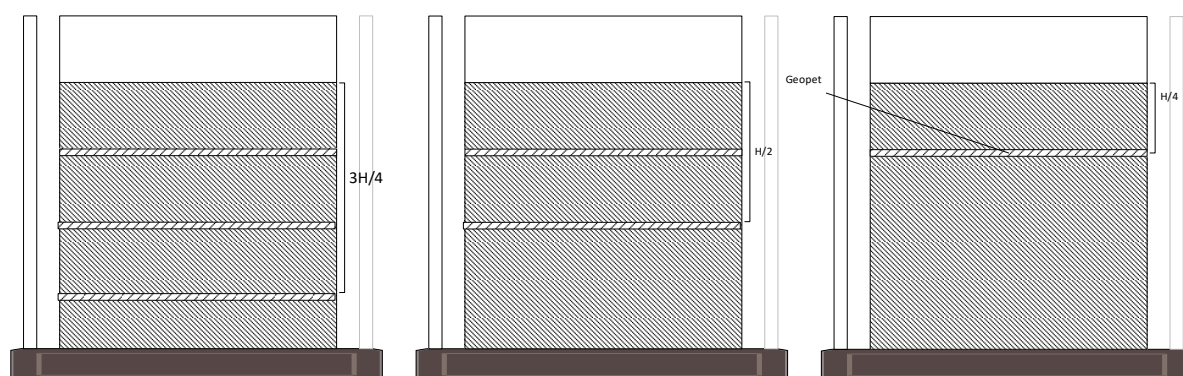
نمونه های در نظر گرفته شده برای بارگذاری تحت آزمایش CBR در این بخش به دودسته کلی تقسیم می شوند. دسته اول نمونه های ماسه ای مخلوط با خرده PET با ابعاد ۱×۱ سانتی متر و دسته دوم نمونه های ماسه ای ترکیب شده با PET های نواری با ابعاد ۵×۱ سانتی متر می باشند. در حالت اول ماسه با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی خرده PET مخلوط شده و در قالب CBR بارگذاری می شود. برای حالت دوم نیز ماسه با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی PET های نواری ترکیب شده و بارگذاری صورت می گیرد. آزمایش های انجام شده در این قسمت در حالت خشک با تراکم نسبی ۷۰٪ ($Dr=70\%$) صورت گرفته اند. برنامه آزمایش های این قسمت در جدول (۳-۳) نشان داده شده است.

جدول ۳-۳ برنامه آزمایش‌های ماسه مسلح شده با خرده‌ها و نوارهای PET

ردیف	درصد PET (%)	ابعاد PET (cm)	تراکم نسبی (Dr)
۱	۰	-	٪۷۰
۲	۰.۱	CH ^۱ (۱×۱)	٪۷۰
۳	۰.۲	CH(۱×۱)	٪۷۰
۴	۰.۵	CH(۱×۱)	٪۷۰
۵	۱	CH(۱×۱)	٪۷۰
۶	۲	CH(۱×۱)	٪۷۰
۷	۰.۱	S ^۲ (۱×۵)	٪۷۰
۸	۰.۲	S(۱×۵)	٪۷۰
۹	۰.۵	S(۱×۵)	٪۷۰
۱۰	۱	S(۱×۵)	٪۷۰
۱۱	۲	S(۱×۵)	٪۷۰

۳-۵-۲- ساخت نمونه‌های مسلح شده با Geopet

آزمایش‌های CBR در این قسمت بر روی خاک در دو حالت خشک و رطوبت بهینه صورت گرفته و در شکل (۷-۳) نمایی شماتیک از نحوه قرارگیری این صفحات در داخل قالب CBR نشان داده شده است.



شکل ۷-۳ شماتیک قرارگیری Geopet در قالب CBR

^۱ CH حرف اول Chips بوده و منظور خرده‌های PET ۱×۱ سانتی‌متری است

^۲ S حرف اول Strips بوده و منظور خرده‌های PET ۱×۵ سانتی‌متری است

در هرکدام از دو حالت گفته شده Geopet با اندازه چشمه‌ها (۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳) و تعداد لایه‌های مختلف (۱، ۲ و ۳ لایه) در سه ارتفاع متفاوت استفاده شده‌اند.

جدول ۳-۴ برنامه آزمایش‌های تسلیح خاک با Geopet

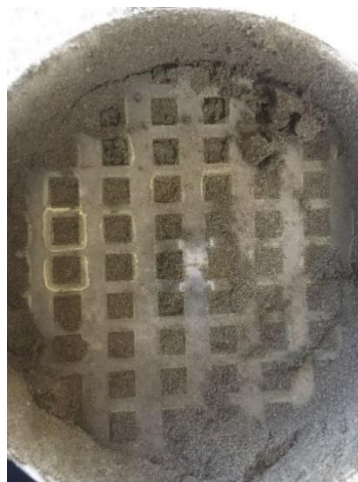
ردیف	نوع Geopet	تعداد لایه‌ها	تراکم نسبی (Dr)	درصد رطوبت (بهینه)
۱	Gp ¹ (۱×۱)	۱	۷۰٪	–
۲	Gp(۱×۱)	۲	۷۰٪	–
۳	Gp(۱×۱)	۳	۷۰٪	–
۴	Gp(۲×۲)	۱	۷۰٪	–
۵	Gp(۲×۲)	۲	۷۰٪	–
۶	Gp(۲×۲)	۳	۷۰٪	–
۷	Gp(۳×۳)	۱	۷۰٪	–
۸	Gp(۳×۳)	۲	۷۰٪	–
۹	Gp(۳×۳)	۳	۷۰٪	–
۱۰	Gp(۱×۱)	۱	–	۱۴/۴۴
۱۱	Gp(۱×۱)	۲	–	۱۴/۴۴
۱۲	Gp(۱×۱)	۳	–	۱۴/۴۴
۱۳	Gp(۲×۲)	۱	–	۱۴/۴۴
۱۴	Gp(۲×۲)	۲	–	۱۴/۴۴
۱۵	Gp(۲×۲)	۳	–	۱۴/۴۴
۱۶	Gp(۳×۳)	۱	–	۱۴/۴۴
۱۷	Gp(۳×۳)	۲	–	۱۴/۴۴
۱۸	Gp(۳×۳)	۳	–	۱۴/۴۴

۳-۵-۳- ساخت نمونه‌های مسلح و تثبیت شده با Geopet و خاکستر بادی

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های این بخش، خاک موردنظر با درصدهای مختلف خاکستر بادی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) به‌خوبی مخلوط شد، سپس محلول فعال‌ساز اضافه و مجدداً ترکیب حاصل به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد تا کاملاً یکنواخت شود، در نهایت با قرارگیری Geopet (مطابق با شکل ۳-۷) کار

¹ Geopet

ساخت نمونه‌ها انجام شد. در این قسمت از پژوهش نمونه‌ها به مدت ۷ روز و در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) عمل‌آوری شده‌اند. علت عمل‌آوری در دمای محیط این است که در مناطقی که میانگین دما در بعضی از فصول سال در این محدوده است اعمال دماهای بالاتر از نظر اجرایی با هزینه‌های بالا و مشکلات زیادی روبه‌رو است. شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) به ترتیب نحوه قرارگیری Geopet در قالب CBR و عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۸ نحوه قرارگیری Geopet در قالب CBR



شکل ۳-۹ عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط

روند انجام آزمایش‌های CBR در ساخت تمام نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D1883 است.

جدول ۵-۳ برنامه آزمایش‌های تسلیح و تثبیت خاک با Geopet و خاکستر بادی

ردیف	درصد خاکستر بادی	نوع Geopet	تعداد لایه‌ها	درصد رطوبت	مدت عمل‌آوری	ماده فعال‌ساز (سدیم هیدروکسید)
۱	%۵	Gp(۱×۱)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲	%۵	Gp(۱×۱)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۳	%۵	Gp(۱×۱)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۴	%۵	Gp(۲×۲)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۵	%۵	Gp(۲×۲)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۶	%۵	Gp(۲×۲)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۷	%۵	Gp(۳×۳)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۸	%۵	Gp(۳×۳)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۹	%۵	Gp(۳×۳)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۰	%۱۰	Gp(۱×۱)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۱	%۱۰	Gp(۱×۱)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۲	%۱۰	Gp(۱×۱)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۳	%۱۰	Gp(۲×۲)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۴	%۱۰	Gp(۲×۲)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۵	%۱۰	Gp(۲×۲)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۶	%۱۰	Gp(۳×۳)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۷	%۱۰	Gp(۳×۳)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۸	%۱۰	Gp(۳×۳)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۱۹	%۱۵	Gp(۱×۱)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۰	%۱۵	Gp(۱×۱)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۱	%۱۵	Gp(۱×۱)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۲	%۱۵	Gp(۲×۲)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۳	%۱۵	Gp(۲×۲)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۴	%۱۵	Gp(۲×۲)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۵	%۱۵	Gp(۳×۳)	۱	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۶	%۱۵	Gp(۳×۳)	۲	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۷	%۱۵	Gp(۳×۳)	۳	۱۴/۴۴	۷ روزه	*
۲۸	%۱۵	Gp(۱×۱)	۱	۱۴/۴۴	-	*
۲۹	%۱۵	Gp(۱×۱)	۲	۱۴/۴۴	-	*
۳۰	%۱۵	Gp(۱×۱)	۳	۱۴/۴۴	-	*
۳۱	%۱۵	Gp(۱×۱)	۱	۱۴/۴۴	-	-
۳۲	%۱۵	Gp(۱×۱)	۲	۱۴/۴۴	-	-
۳۳	%۱۵	Gp(۱×۱)	۳	۱۴/۴۴	-	-

فصل چهارم

بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه

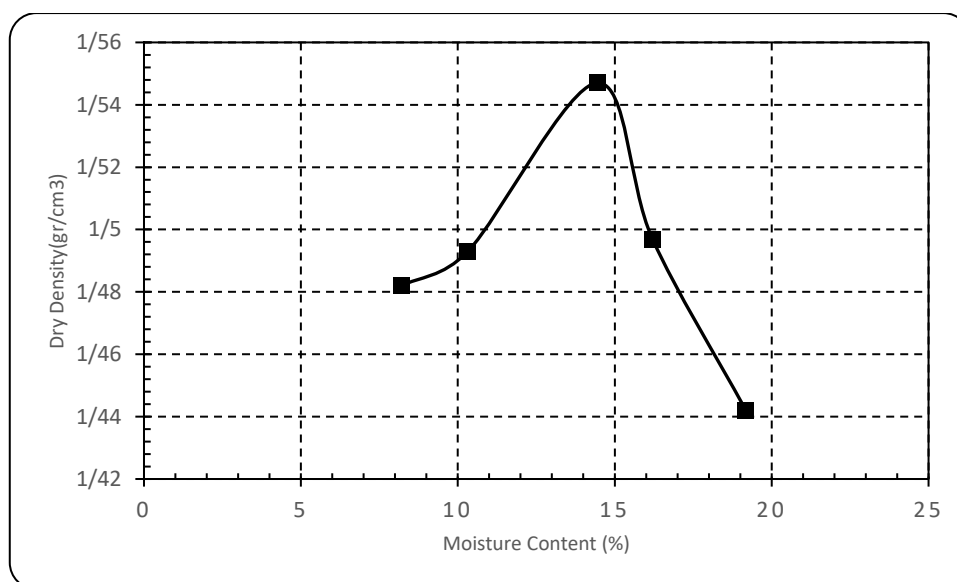
همان طور که در فصل‌های پیشین بیان شده است، جهت بررسی رفتار و تعیین ظرفیت باربری نمونه‌های خاک مسلح و تثبیت شده با ضایعات پلاستیکی و خاکستر بادی، خروجی آزمایش‌های CBR با استفاده از سنسورهای نیرو و جابه‌جایی ثبت شده است. در این فصل نتایج این آزمایش‌ها به همراه نمودارها و جداول مربوطه و همچنین تحلیل و تفسیر آن‌ها ارائه شده است.

۴-۲- بررسی و تحلیل و نتایج آزمایش‌ها

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های تراکم و CBR و تأثیر تسلیح و تثبیت خاک با درصد‌های وزنی، ابعاد و اشکال مختلف ضایعات پلاستیکی همراه با خاکستر بادی پرداخته شده است.

۴-۲-۱- نتایج آزمایش‌های تراکم اصلاح شده

۴-۲-۱-۱- بررسی مقدار رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک نمونه مرجع

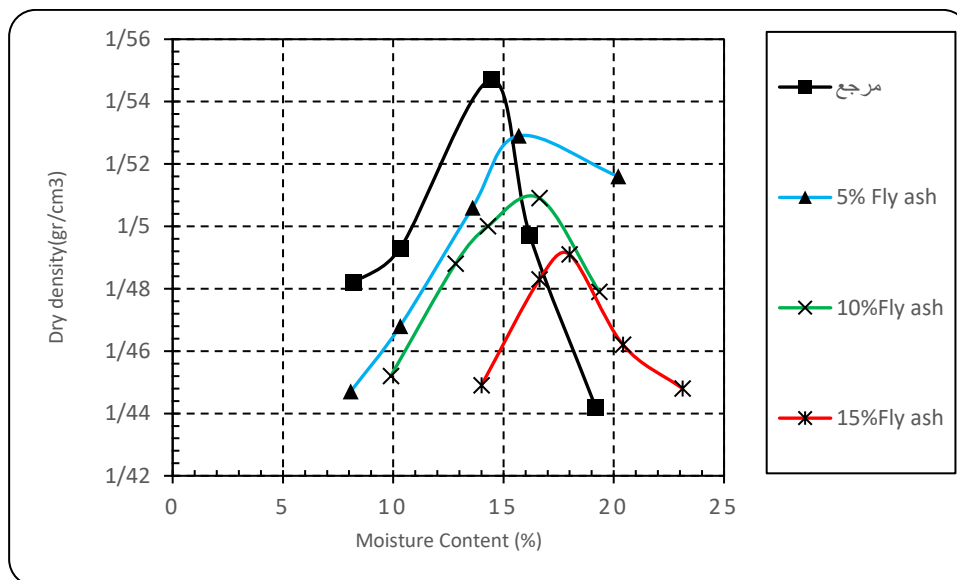


شکل ۴-۱ منحنی تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی

همان طور که در فصل سوم اشاره شد، آزمایش تراکم اصلاح شده طبق استاندارد ASTM D 698-1

انجام شد، بر اساس نتایج این آزمایش مقدار رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه خاک مرجع به ترتیب ۱۴/۴۴٪ و $1/54 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمده است.

۲-۱-۲-۴- تأثیر خاکستر بادی بر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها



شکل ۲-۴ منحنی‌های تراکم خاک ماسه‌ای بندر انزلی مخلوط شده با درصدهای مختلف خاکستر بادی

باتوجه به شکل (۲-۴) می‌توان گفت با افزایش مقدار خاکستر بادی رطوبت بهینه به میزان کمی افزایش و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد، دلیل این امر ماهیت خاکستر بادی است که خاصیت نگهداری و جذب آب را در خود دارا است و همین دلیل باعث افزایش رطوبت می‌شود و از سوی دیگر وجود ذرات باردار در خاکستر بادی دانه‌های خاک را از هم جدا کرده و ضمناً کمی از انرژی تراکم را به خود گرفته و مانع از تراکم بهتر خاک شده همچنین وزن مخصوص ماسه به مراتب بیشتر از خاکستر بادی است که در نتیجه وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد.

همچنین در ضمن آزمایش‌ها مشاهده شد با ترکیب خاک و خاکستر بادی در رطوبت‌های بالا مخلوط دچار آب انداختگی شده است، درحالی‌که در نمونه‌های مرجع (بدون افزودن خاکستر بادی) این آب انداختگی مشاهده نمی‌شد. آئین‌نامه اداره فدرال بزرگراه‌های ایالات متحده آمریکا دلیل این امر را کاهش

نیاز نمونه‌ها به آب در هنگام حضور خاکستر بادی می‌داند. این کاهش نیاز به آب به علت شکل و ریزدانه بودن خاکستر بادی است که در نتیجه فضاهای خالی بین دانه‌ای کاسته شده و با افزایش آب دانه‌ها نمی‌توانند آن را در کنار خود نگهدارند و به سطح مخلوط می‌آید. [۴۲،۴۱]

کوگبارا و همکاران^۱ نشان دادند افزودن مواد چسبنده (سیمان و خاکستر بادی) وزن مخصوص خشک حداکثر را کمی افزایش می‌دهد، ولی تأثیری بر روی رطوبت بهینه ندارد. [۴۳]

کنیراج و هاوانگی^۲ یافتند که افزایش میزان خاکستر بادی در ساخت نمونه‌ها تأثیری بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه ندارد. [۴۴]

پاداد و ماندل^۳ بیان کردند افزودن خاکستر بادی تأثیری بسیار ناچیز بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه نمونه‌ها دارد. [۴۵]

بروکس و همکاران^۴ دریافتند که با افزایش میزان خاکستر بادی مقدار رطوبت بهینه حدود ۹٪ افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر حدود ۶٪ کاهش می‌یابد. [۴۶]

اوگونتا و مانیکا^۵ دریافتند که افزودن خاکستر بادی به مقدار ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪ به ترتیب ۲، ۳ و ۶ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر را کاهش داده و ۸، ۱۶ و ۲۴ درصد رطوبت بهینه را افزایش می‌دهد. [۴۷]

۴-۲-۲- نتایج آزمایش‌های CBR

۴-۲-۲-۱- تأثیر خرده‌ها و نوارهای PET بر مقادیر CBR

شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) تغییرات نیرو - نفوذ را برای نمونه‌های مسلح شده در شرایط نمونه مرجع

¹ R. B. Kogbara et al

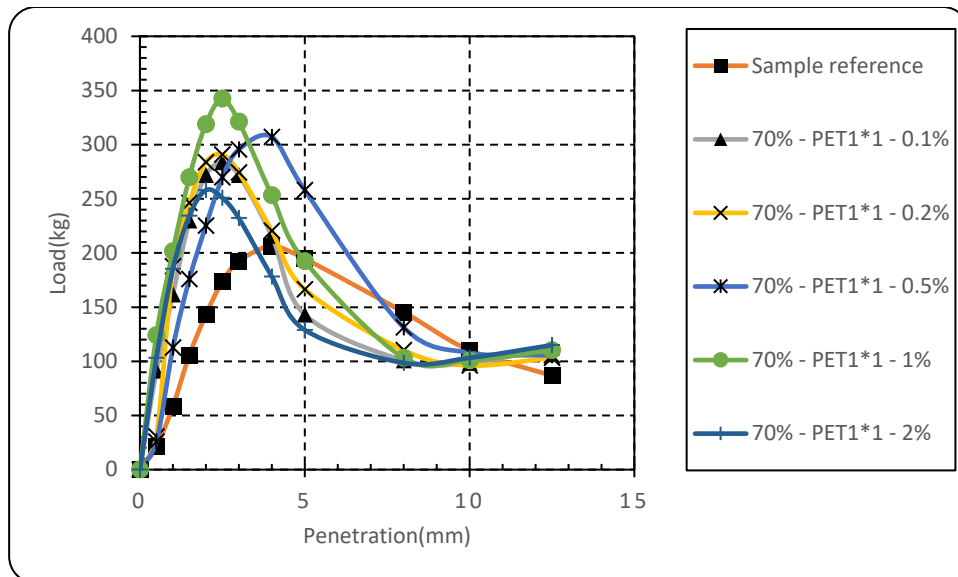
² S. R. Kaniraj and Havanagi

³ A. H. Padade and J. N. Mandal

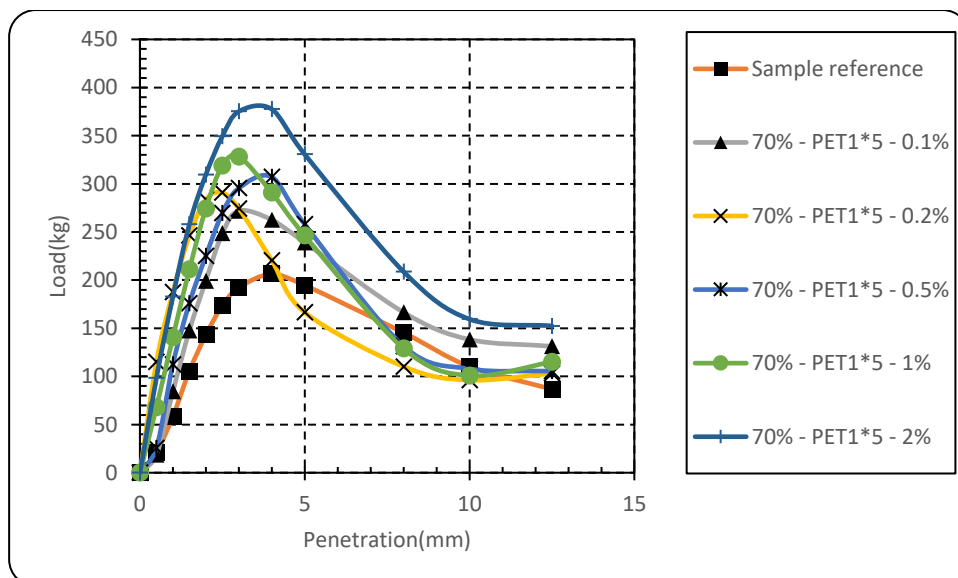
⁴ R. Brooks et al

⁵ F. N. Okonta and T. M. Manciya

که با درصدهای وزنی مختلف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد) از PET مسلح شده‌اند و تحت آزمایش CBR قرار گرفته‌اند: نشان می‌دهند.



شکل ۳-۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصدهای وزنی مختلف از خرده PET (در حالت خشک (Dr=70%))



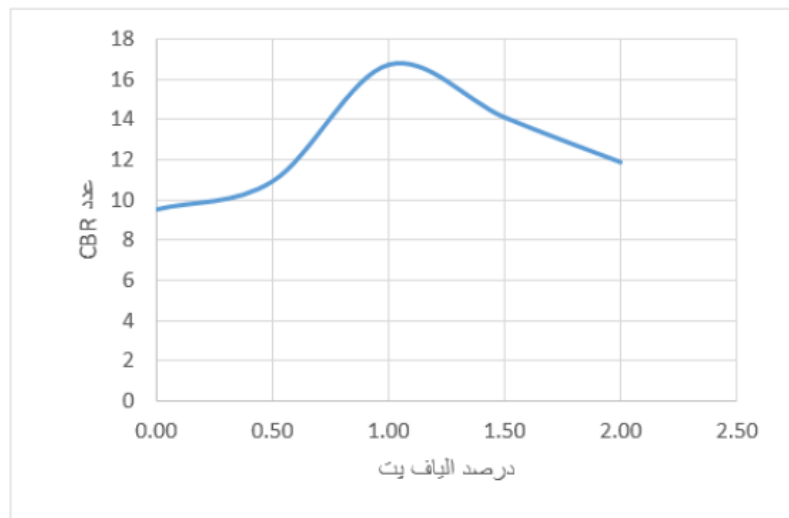
شکل ۴-۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصدهای وزنی مختلف از نوارهای PET (در حالت خشک (Dr=70%))

همان طور که در شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) دیده می‌شود، هر یک از منحنی‌های نیرو - نفوذ دارای یک قله بوده که متناظر با نقطه گسیختگی نمونه است. علت گسیخته شدن نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها

در حالت دانسیته خشک ($D_r=70\%$) است که این امر سبب جابه‌جایی دانه‌های خاک هنگام اعمال فشار شده و در نتیجه باعث گسیخته شدن خاک می‌شود، در صورتی آزمایش‌ها در حالت رطوبت بهینه انجام شوند گسیختگی رخ نمی‌دهد و نمودارهای نیرو - نفوذ به صورت صعودی خواهند بود. همان طور که مشاهده می‌شود رفتار نمونه‌های مسلح شده نسبت به نمونه مرجع بهبود یافته است که این تغییر باتوجه به مقدار و ابعاد مسلح کننده‌ها متغیر است به طوری که با افزایش درصد وزنی PET در نمونه‌ها (تا ۱٪ برای خرده‌ها و ۲٪ برای نوارهای PET) مقدار تنش قائم افزایش یافته و نمونه‌ها مقاوم‌تر و شکل پذیرتر شده‌اند.

در مورد مشابه می‌توان به نتایج آزمایش‌های دادوند و همکاران که در حالت رطوبت بهینه صورت گرفته‌اند اشاره کرد. شکل (۴-۵) نتایج آزمایش‌های CBR انجام شده توسط ایشان بر روی ماسه بابلر مسلح شده با بطری‌های ضایعاتی PET و درصدهای مختلف ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ درصد را نشان می‌دهد.

درصد الیاف	عدد cbr
0.00	9.5
0.5	10.9
1	16.7
1.5	14.08
2	11.85



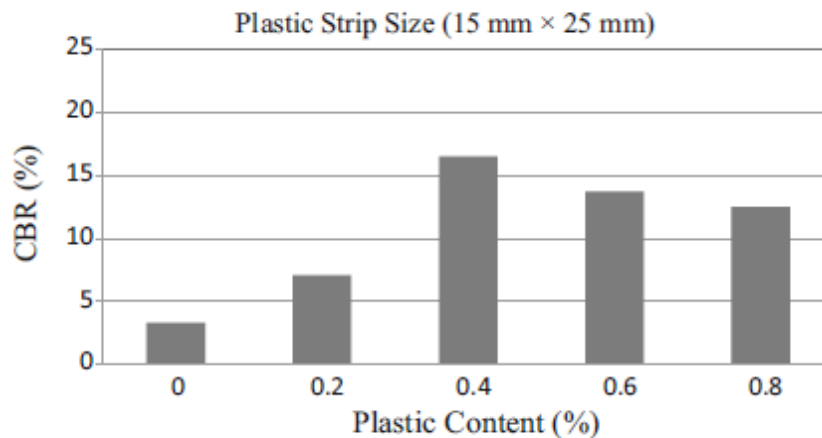
شکل ۴-۵ تغییرات CBR در ماسه مسلح با الیاف PET [۳۱]

باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی PET تا ۱٪ مقدار CBR مخلوط ماسه و

PET افزایش می‌یابد اما با افزایش بیشتر از ۱٪ این روند کاهش می‌یابد. [۳۱]

از دیگر موارد مشابه می‌توان به نتایج آزمایش‌های پدیا و همکاران که در فصل دوم ذکر شد، اشاره

کرد. شکل (۴-۶) نتایج آزمایش‌های CBR انجام شده در پژوهش ایشان بر روی خاک ماسه‌ای مسلح شده با خرده‌های PET با ابعاد $2/5 \times 1/5$ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ تأثیر درصد خرده PET بر CBR [۳۲]

همان طور که از این شکل پیداست با افزایش خرده PET تا ۰/۴ درصد در ماسه، مقدار CBR افزایش پیدا کرده و بعد از آن این مقدار کاهش یافته است. [۳۲]

۳-۲-۴- تأثیر تسلیح خاک با Geopet بر مقادیر CBR

۱-۳-۲-۴- بررسی عملکرد ژئوسنتتیک‌ها و Geopet

در میان عملکردهای مختلف ژئوسنتتیک‌های مسلح کننده، سه مکانیسم وجود دارد:

۱- نوع غشایی ۲- نوع برشی (ظرفیت باربری) ۳- نوع مهاري

مسلح کردن در روسازی‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان به بسیج نیروهای کششی در صفحه غشاء مسلح کننده تعریف کرد که قادر است نیروی متمرکز را روی سطح وسیعی در بستر پخش کند و از افزایش بار به صورت موضعی و بیش از ظرفیت باربری آن جلوگیری کند.

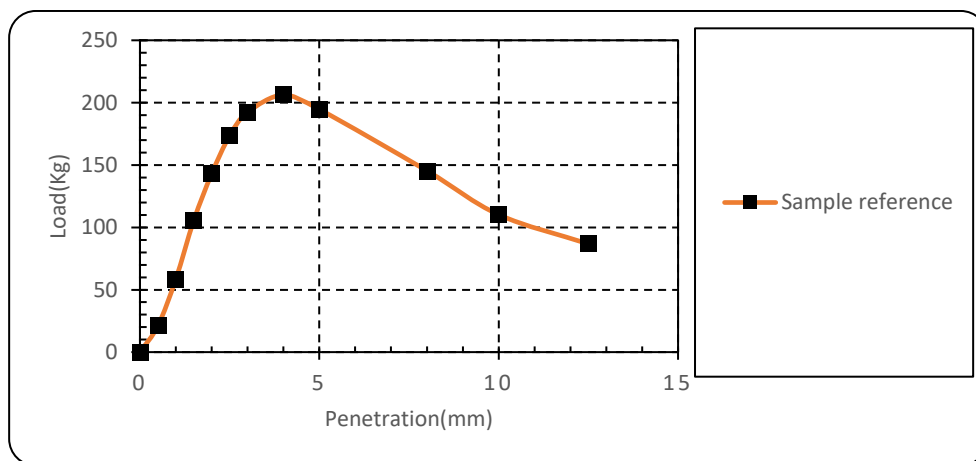
مسلح کردن غشاء کششی مشخصه ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها می‌باشد و یک عملکرد از مدل

کششی ژئوسنتتیک‌ها است. مسلح کردن غشایی وقتی تحقق پیدا می‌کند که بستر تغییر شکل دهد. این نوع از مسلح کردن زمانی اهمیت دارد که لایه اساس بر روی بستر با ظرفیت باربری محدود اجرا شود. مواد ژئوسنتتیک در زمان تغییر شکل بستر تحت بار همانند یک غشاء عمل می‌کنند و در نتیجه مولفه عمودی کشش بر منطقه وسیع‌تری توزیع می‌شود. تغییر شکل و در نتیجه آن توزیع بار در ژئوسنتتیک تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تعادل برقرار شود یعنی بستر بتواند بار را بدون تغییر شکل پلاستیک توزیع کند. در جاهایی که بستر دارای ظرفیت باربری متفاوت است ژئوسنتتیک می‌تواند باعث کاهش تنش در نقاط ضعیف و گسترش تغییر شکل یکنواخت در بستر شوند. با توجه به عملکرد ژئوسنتتیک‌ها و موارد گفته شده می‌توان گفت مهار جانبی به‌عنوان وظیفه اصلی Geopet بررسی می‌شود و عمدتاً از طریق برهم‌کنش برشی بین لایه اساس و Geopet در قسمت تحتانی لایه اساس دانه‌ای توسعه می‌یابد. به‌وسیله مهار جانبی خاک، چهار مولفه تقویتی حاصل می‌شود. اولین مولفه مربوط به ممانعت مستقیم از گسترش جانبی لایه اساس می‌شود. چسبندگی پایین مصالح که باعث می‌شود لایه اساس مقاومت کششی کمی داشته و برای مهیا کردن مهار جانبی به بستر متکی شود. در بسترهای ضعیف، مهار جانبی بسیار پایینی فراهم شده‌است. بنابراین سنگدانه‌ها در قسمت پایین لایه اساس تمایل به جابه‌جایی دارند. قرارگیری لایه Geopet در اساس، مجوز توسعه برهم‌کنش برشی بین دانه‌های خاک و Geopet را به عنوان تلاش اساس برای گسترش جانبی می‌دهد که ناشی از تراکم (قفل‌شدگی) خاک در چشمه Geopet‌ها می‌باشد. نیرو کششی به‌طور موثری از دانه‌های خاک به Geopet منتقل شده و چون Geopet در مقایسه با دانه‌های خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای در کشش بهتر (سخت‌تر) عمل می‌کند در نتیجه کرنش کششی جانبی توسعه‌یافته را کاهش خواهد داد. دومین مولفه مکانیسم مهار جانبی، افزایش سختی دانه‌های خاک هنگامی که برهم‌کنش به‌اندازه کافی بین خاک و Geopet‌ها توسعه بیابد. تنش برشی توسعه‌یافته بین خاک و Geopet‌ها افزایش تنش جانبی در درون لایه‌های خاک را فراهم می‌کند که این روند باعث افزایش مدول مصالح شده که در نتیجه این افزایش سختی،

کرنش قائم در اساس کاهش پیدا می‌کند. سومین مولفه تقویتی حاصل شده، بهبود توزیع تنش قائم در بستر می‌باشد. حضور لایه Geopet در خاک منجر به تغییر در وضعیت تنش و کرنش در لایه بستر می‌شود. در سیستم‌های لایه‌ای، مصالح بستر ضعیف در زیر لایه اساس قرار گرفته و افزایش در سختی لایه اساس باعث بهبود در توزیع تنش قائم در لایه بستر می‌شود. چهارمین مکانیسم تقویتی، کاهش تنش برشی در خاک بستر است. این امر قابل پیش‌بینی خواهد بود که تنش برشی انتقال یافته از لایه اساس به بستر کاهش پیدا کند چون نیروی برشی اساس، نیروی کششی را به تقویت‌کننده (Geopet) انتقال می‌دهد.

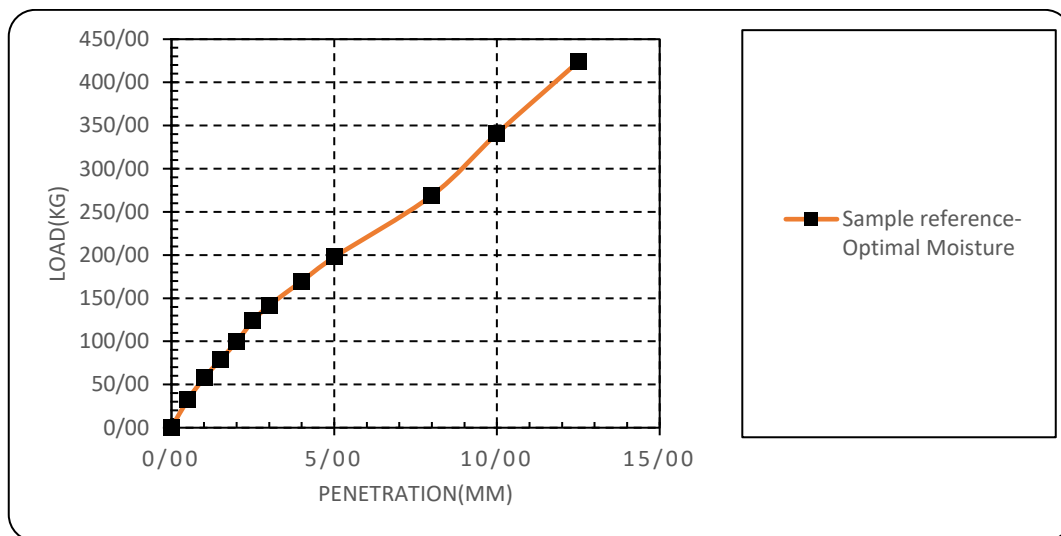
۲-۳-۲-۴- نمونه‌های مرجع

در این قسمت، رفتار خاک غیر مسلح تحت عنوان نمودار نفوذ مرجع بررسی شده است. به این منظور نمودار نیرو- نفوذ تحت آزمایش CBR در تراکم نسبی ۷۰ درصد رسم شده است. در شکل (۴-۷) نمودار نیرو - نفوذ نمونه مرجع، نشان داده شده است.



شکل ۴-۷ نمودار نیرو - نفوذ نمونه مرجع در حالت خشک ($D_r=70\%$)

همانطور که پیشتر گفته شد، نمونه ماسه‌ای غیر مسلح با تراکم نسبی ۷۰ درصد تحت آزمایش CBR قرار گرفته است. بر اساس نمودار در این نمونه مقدار نسبت باربری کالیفرنیا ۱۳/۸۹ درصد به دست آمده است.



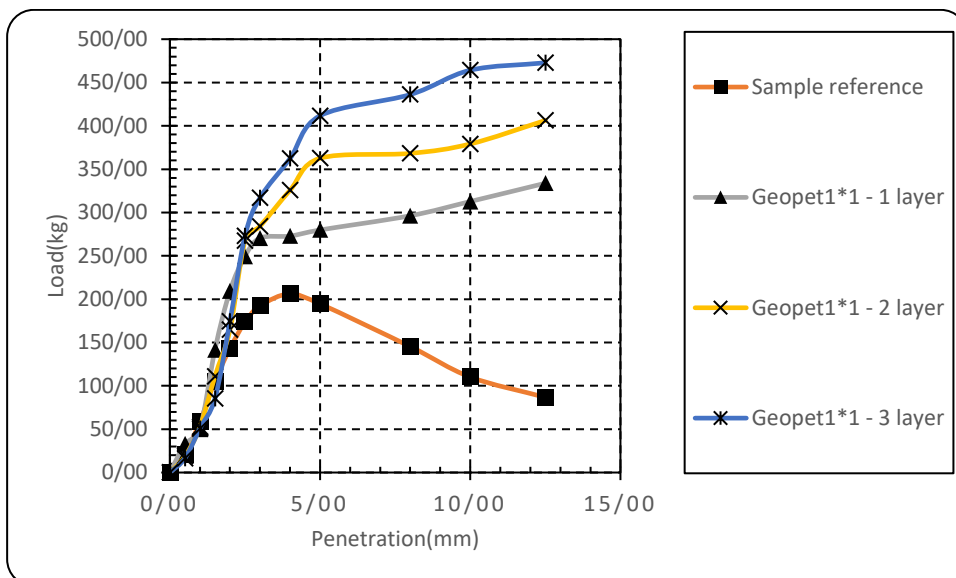
شکل ۸-۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه مرجع در حالت رطوبت بهینه

همانطور که از نتایج آزمایش CBR بر روی خاک بدون مسلح کننده در حالت رطوبت بهینه مشخص است مقدار عدد CBR برای این نمونه ۵۴/۱۰٪ به دست آمده است. علت تغییر شکل نمودار در این حالت نسبت به حالت خشک وجود رطوبت می باشد که باعث روغن کاری بین دانه و جلوگیری از گسیختگی خاک شده است.

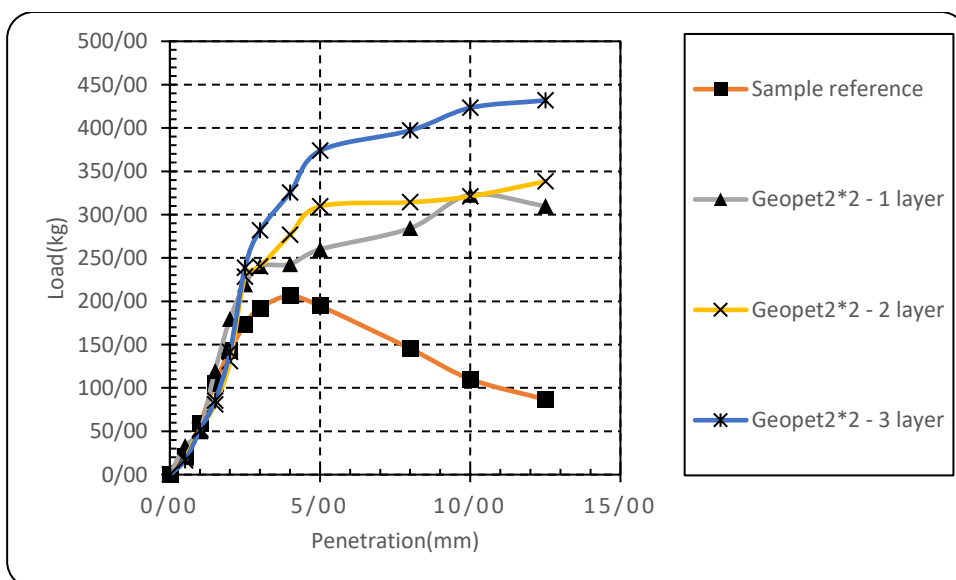
۴-۲-۳-۳- نتایج نمونه های مسلح شده

در این بخش میزان تأثیر Geopet ها بر عملکرد مکانیکی خاک ماسه ای بندر انزلی به لحاظ ظرفیت باربری و میزان فرورفتگی نمونه ها تحت بارگذاری مورد پردازش و تحلیل قرار گرفته و نمودارهای مربوطه رسم شده است. تسلیح خاک ماسه ای به وسیله ی Geopet ها با اندازه چشمه های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ و جای گیری در ترازهای ۳H/4، H/2 و H/4 از سطح قالب در دو حالت رطوبت بهینه و دانسیته خشک (Dr=70%) صورت گرفته است.

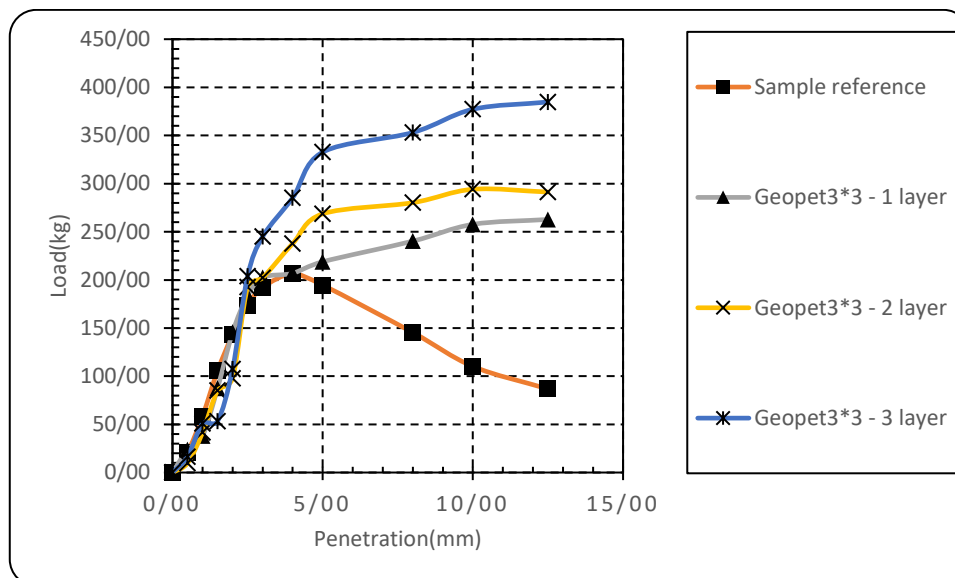
منحنی های نیرو - نفوذ خاک ماسه ای مسلح شده با Geopet ها در حالت دانسیته خشک (Dr=70%) در شکل های (۹-۴)، (۱۰-۴) و (۱۱-۴) همچنین نمودارهای خاک مسلح شده با این عناصر در حالت رطوبت بهینه در شکل های (۱۲-۴)، (۱۳-۴) و (۱۴-۴)، نشان داده شده است.



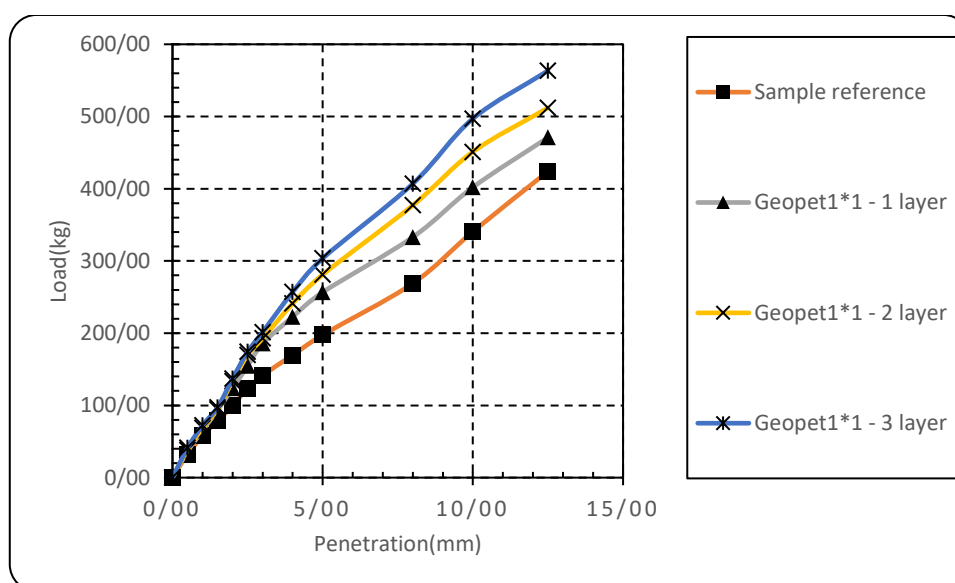
شکل ۴-۹ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 (در حالت خشک (Dr=70%))



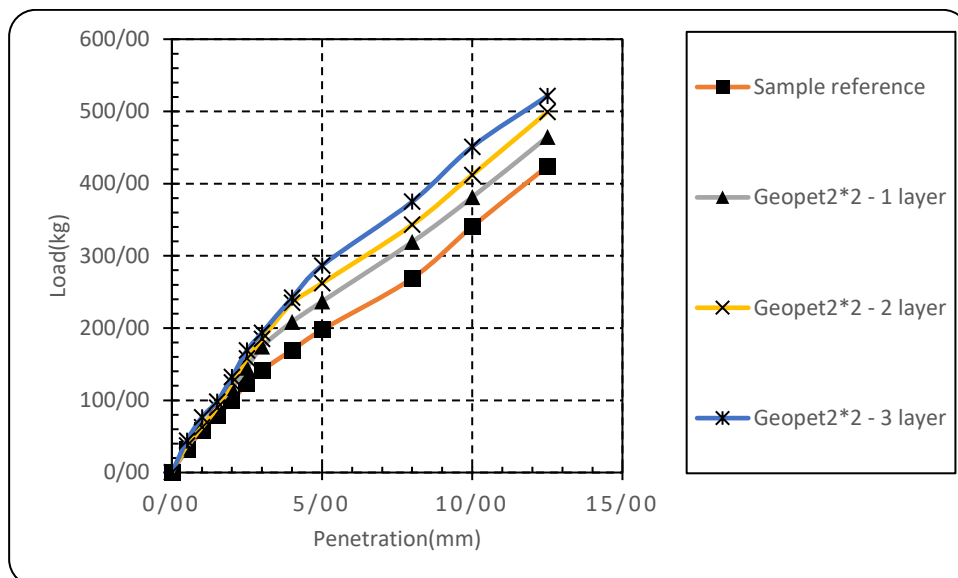
شکل ۴-۱۰ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 (در حالت خشک (Dr=70%))



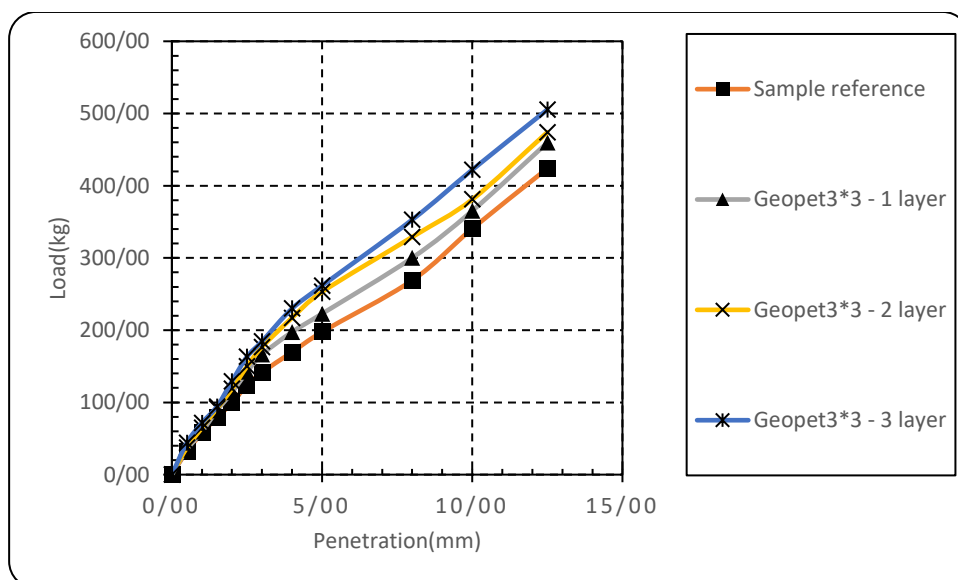
شکل ۴-۱۱ نمودار نیرو - نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 (در حالت خشک (Dr=70%))



شکل ۴-۱۲ نمودار نیرو - نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 (در حالت رطوبت بهینه)



شکل ۴-۱۳ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2x2 (در حالت رطوبت بهینه)



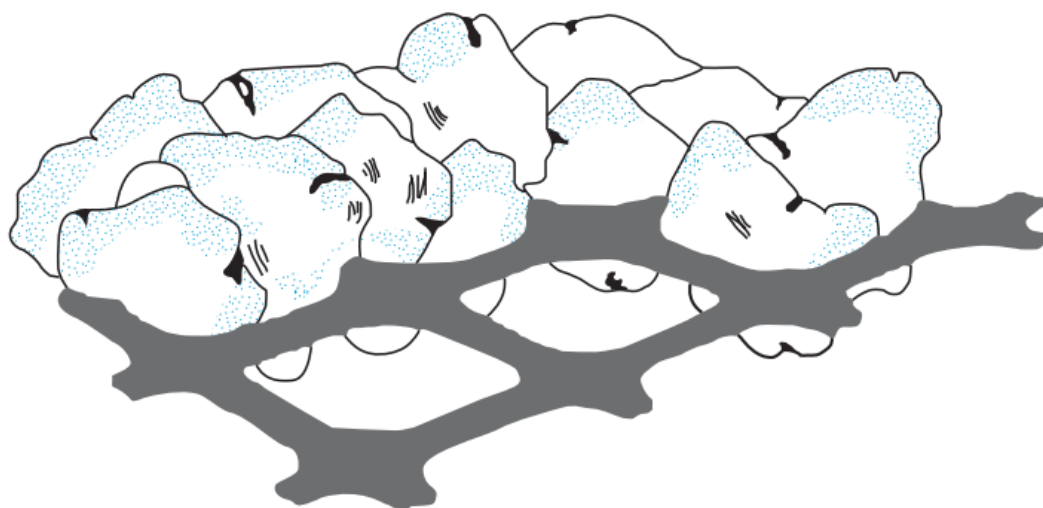
شکل ۴-۱۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3x3 (در حالت رطوبت بهینه)

باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌های حالت دانسیته خشک و رطوبت بهینه، مقدار تنش با افزایش میزان نفوذ سنبه فولادی در خاک افزایش یافته و شیب منحنی‌های نیرو - نفوذ در ابتدا بیشتر و با افزایش میزان نفوذ به تدریج کاهش می‌یابد، این رفتار نشان‌دهنده نفوذ تدریجی سنبه در خاک است. همان طور که از منحنی‌های نیرو - نفوذ پیداست استفاده از Geopet مانع از وقوع گسیختگی

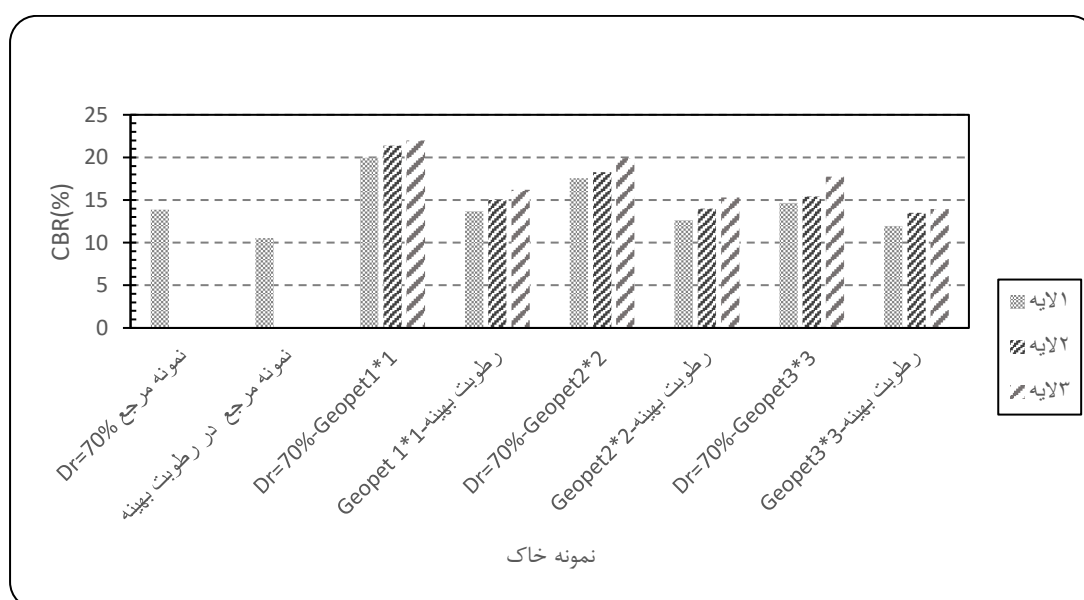
در نمونه‌ها شده است، علت این امر محدود کردن حرکت دانه‌های خاک توسط Geopet است. با اعمال بار، به سطح خاک لایه‌های مسلح کننده (Geopet) قرار گرفته در ماسه به تدریج به کشش می‌افتند. باتوجه به سختی مسلح کننده لایه‌های Geopet تغییر شکل داده و برای تحمل بار، نیرویی به سمت بالا وارد می‌کنند. اعمال این نیروی دوطرفه (از طرف سنبه فولادی و Geopet) به دانه‌های خاک باعث درگیری بیشتر بین دانه‌های خاک باهم و چشمه‌های Geopet شده است، از طرفی دیگر به کشش افتادن لایه‌های Geopet نشان‌دهنده بسیج شدن مقاومت آن‌ها در برابر اعمال بار است. باتوجه به موارد فوق شکل‌های (۹-۴) تا (۱۴-۴) تغییرات فشار در برابر نفوذ سنبه را برای ماسه مسلح شده به Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ در سه ارتفاع $H/4$ ، $H/2$ و $3H/4$ در حالت دانسیته خشک و رطوبت بهینه نشان می‌دهند. هرچه ذرات درشت‌دانه بهتر بتوانند در چشمه‌های Geopet درگیر شوند، ظرفیت باربری بیشتری را از طرف خاک شاهد خواهیم بود و از آن جایی که خاک مصرفی در این پژوهش خاک درشت‌دانه ماسه‌ای (SP) بوده، هرچه اندازه چشمه‌های Geopet کوچک‌تر باشد عملکرد بهتری دارد. در ضمن در کتاب اصول مهندسی پی اثر بر اجا ام داس به این مورد اشاره شده است که چشمه‌های ژئوگرید باید به اندازه کافی بزرگ باشند که امکان قفل و بست با خاک یا سنگ اطراف را برای انجام عملکرد مسلح کنندگی فراهم کند. شکل (۱۵-۴) نمای از درگیری دانه‌های خاک با ژئوگرید را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در حالت دانسیته خشک و رطوبت بهینه، Geopet با اندازه چشمه‌های ۱×۱ سانتی‌متر به صورت ۳ لایه بیشترین افزایش در مقدار فشار بر حسب نفوذ سنبه و در نتیجه بیشترین مقدار CBR را مطابق با شکل (۱۶-۴) به دنبال داشته است. جدول (۱-۴) مقدار CBR در حالت‌های مختلف استفاده از Geopet نشان می‌دهد. سارسی سال ۱۹۸۵ تاثیر اندازه چشمه بر اندازه ذرات خاک را برای حداکثر بازده اصطکاکی (یا عملکرد در برابر کشش) بررسی کرد. طبق این مطالعه، بالاترین بازدهی زمانی رخ می‌دهد که رابطه زیر برقرار باشد. [۴۸]

$$BGG > 3.5D50$$

که BGG برابر با حداقل ابعاد چشمه ژئوگرید و D50 قطر متوسط دانه‌ها است.



شکل ۴-۱۵ نمایی از درگیری دانه‌های خاک با ژئوگرید [۴۸]



شکل ۴-۱۶ مقایسه مقادیر CBR در نمونه‌های مختلف خاک

جدول ۴-۱ بررسی تأثیر Geopet بر مقادیر CBR در حالت‌های مختلف

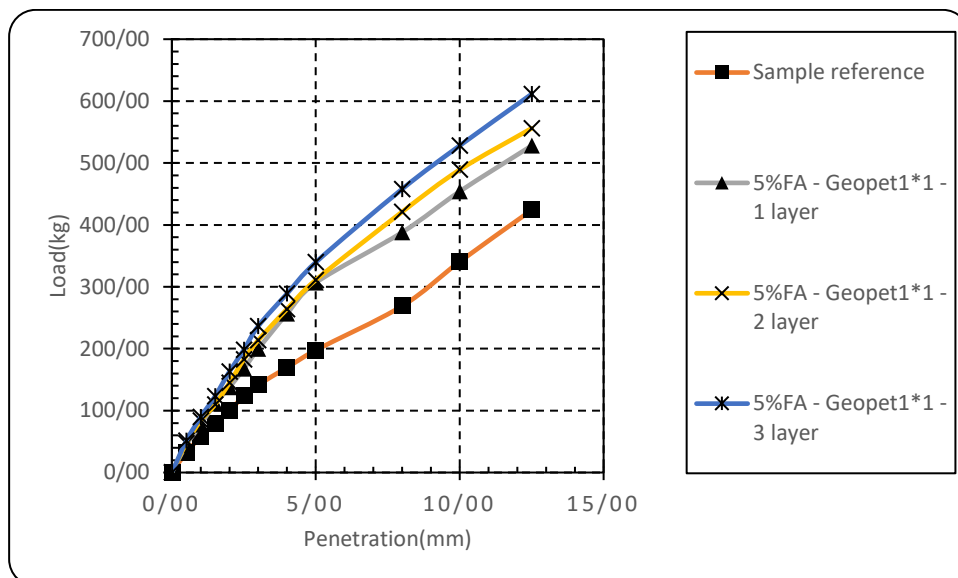
ردیف	اندازه چشمه Geopet (cm)	تعداد لایه‌ها	دانشسته خشک (Dr=70%)	رطوبت بهینه	مقدار CBR(%)
۱	-	-	*	-	٪۱۳٫۸۹
۲	-	-	-	*	٪۱۰٫۵۴
۳	۱×۱	۱	*	-	٪۱۹٫۹۶
۴	۱×۱	۲	*	-	٪۲۱٫۴۰

۵	۱×۱	۳	*	-	٪۲۱٫۹۷
۶	۱×۱	۱	-	*	٪۱۳٫۶۹
۷	۱×۱	۲	-	*	٪۱۴٫۹۹
۸	۱×۱	۳	-	*	٪۱۶٫۲۰
۹	۲×۲	۱	*	-	٪۱۷٫۵۶
۱۰	۲×۲	۲	*	-	٪۱۸٫۲۸
۱۱	۲×۲	۳	*	-	٪۱۹٫۹۴
۱۲	۲×۲	۱	-	*	٪۱۲٫۶۳
۱۳	۲×۲	۲	-	*	٪۱۳٫۹۸
۱۴	۲×۲	۳	-	*	٪۱۵٫۲۹
۱۵	۳×۳	۱	*	-	٪۱۴٫۶۸
۱۶	۳×۳	۲	*	-	٪۱۵٫۴۰
۱۷	۳×۳	۳	*	-	٪۱۷٫۷۵
۱۸	۳×۳	۱	-	*	٪۱۱٫۸۹
۱۹	۳×۳	۲	-	*	٪۱۳٫۵۰
۲۰	۳×۳	۳	-	*	٪۱۳٫۹۶

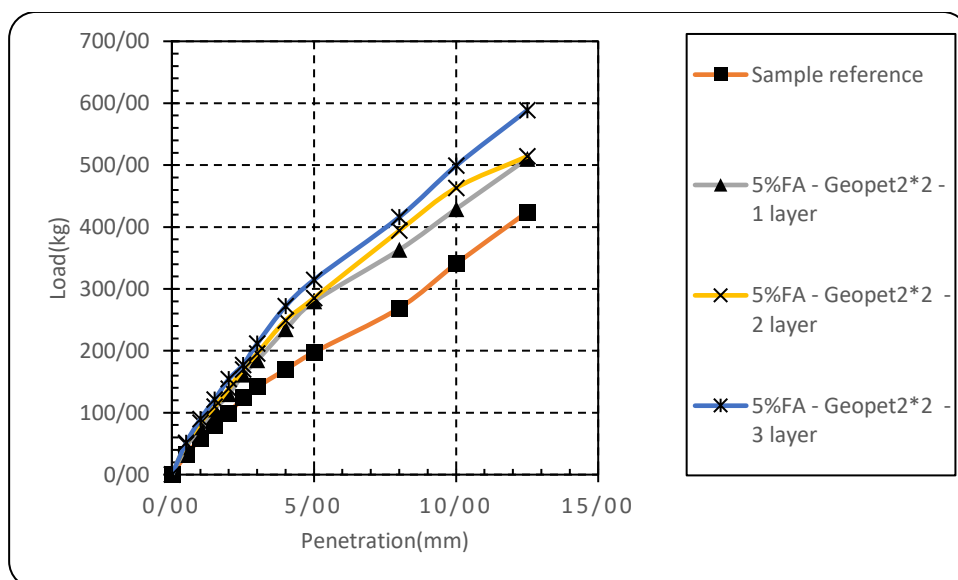
۴-۲-۴- تأثیر تسلیح و تثبیت خاک با استفاده از Geopet و خاکستر بادی بر مقادیر

CBR

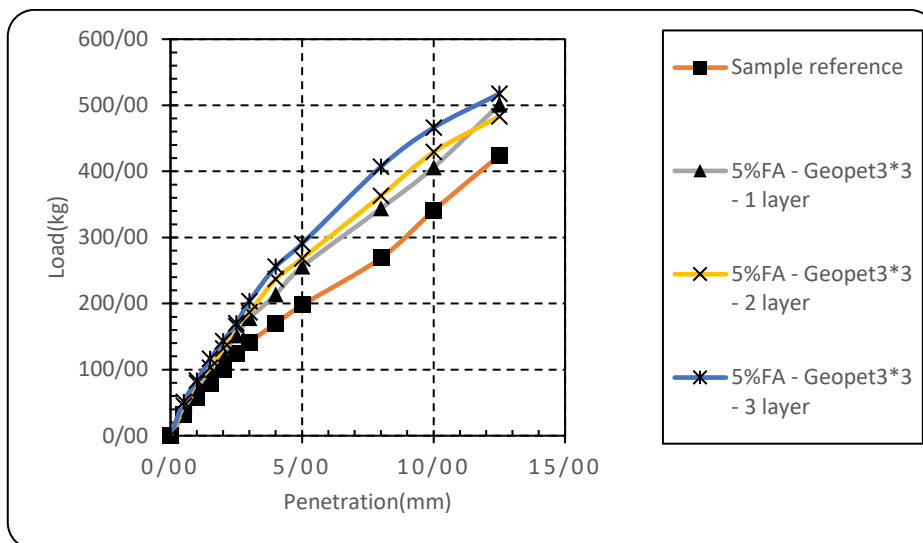
در آزمایش‌های مربوط به این مرحله، نمونه‌های ماسه‌ای توسط سه نوع Geopet به همراه خاکستر بادی و ماده فعال‌ساز (سدیم هیدروکسید) تسلیح و تثبیت شده‌اند. همان‌طور که در فصل سوم ذکر شد تمامی نمونه‌های ساخته شده در این بخش به مدت ۷ روز در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) عمل‌آوری شده‌اند. این قسمت از پژوهش شامل ۲۷ آزمایش است. لایه‌های مسلح کننده مانند قسمت قبل در عمق‌های $H/4$ ، $H/2$ و $3H/4$ از سطح نمونه تعبیه شده‌اند، در این قسمت از کار جهت تثبیت خاک ماسه از خاکستر بادی با درصدهای مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به همراه سدیم هیدروکسید به اندازه ۳ درصد وزنی خاکستر بادی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های این بخش در شکل‌های (۴-۱۷) تا (۴-۲۵) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۷ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه

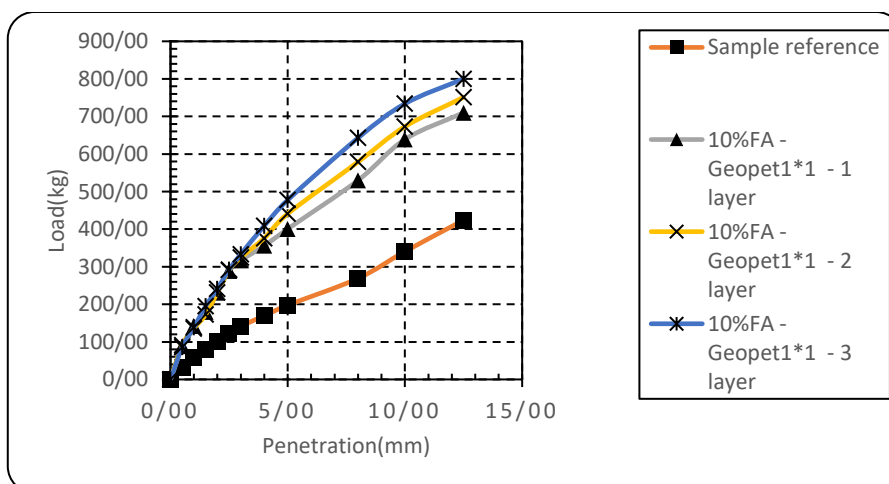


شکل ۴-۱۸ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه

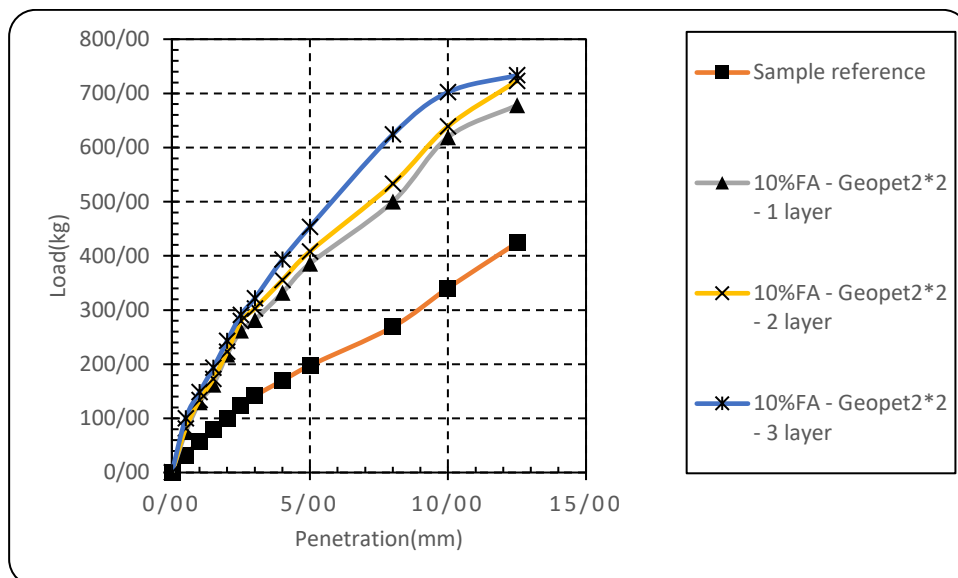


شکل ۴-۱۹ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه ۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه

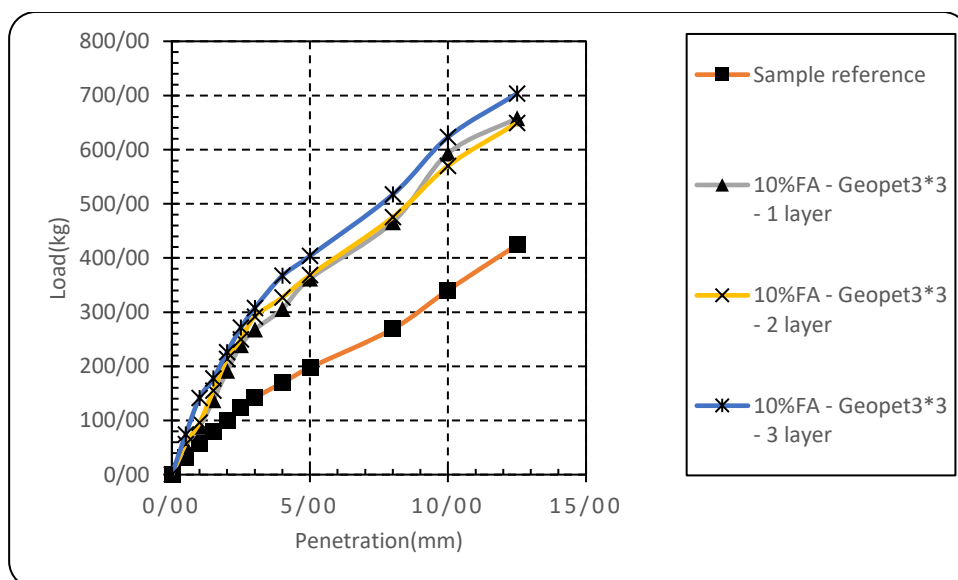
باتوجه به شکل‌های (۴-۱۷) تا (۴-۱۹) مشاهده می‌شود اضافه کردن خاکستر بادی همراه با سدیم هیدروکسید به عنوان ماده فعال‌ساز به نمونه‌ها باعث افزایش مقدار فشار برحسب نفوذ سنبه نسبت به حالت بدون استفاده از این مواد افزودنی شده است. علت این امر وقوع واکنش‌های شیمیایی خاکستر بادی در حضور آب و دماهای معمولی با سدیم هیدروکسید است که باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر نفوذ و در نتیجه افزایش مقادیر CBR می‌شود.



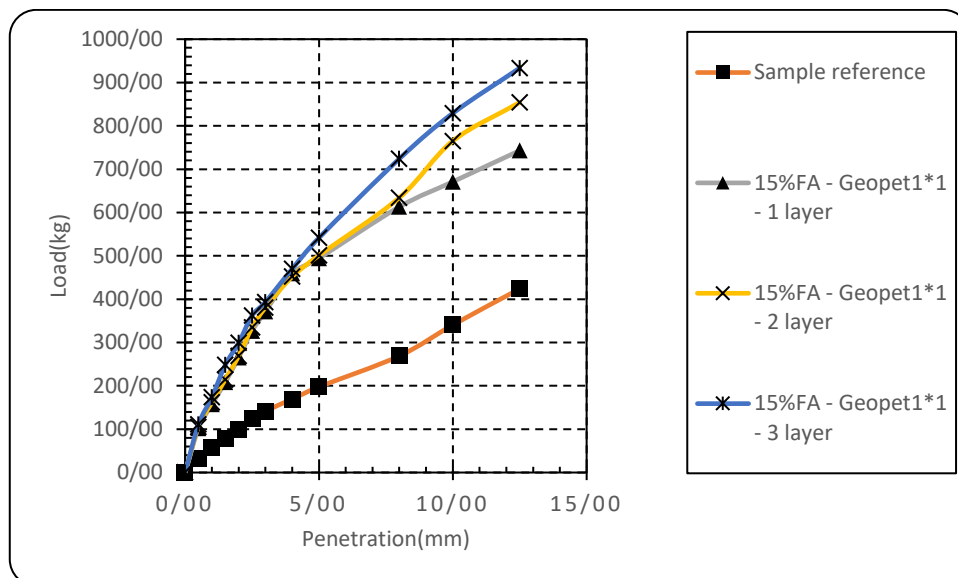
شکل ۴-۲۰ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه



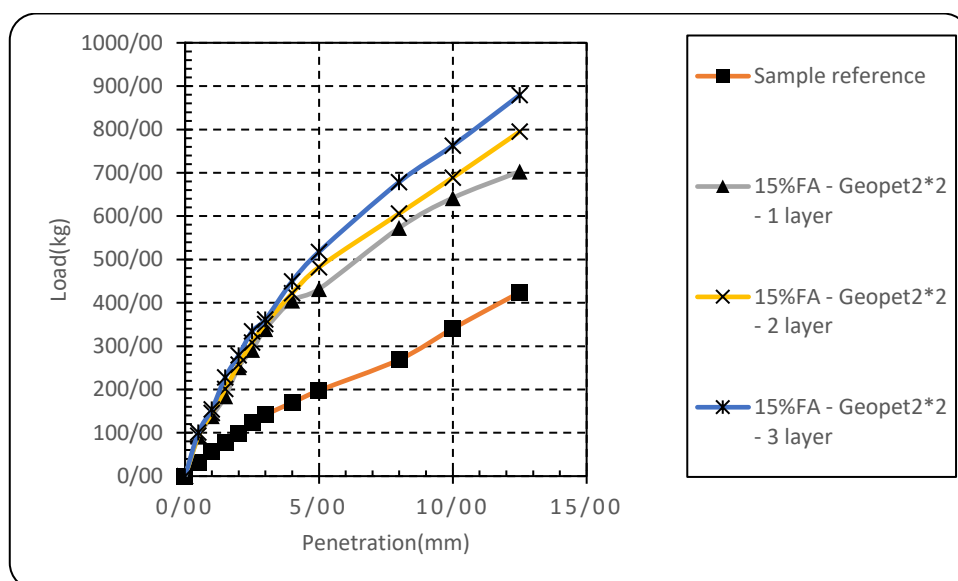
شکل ۴-۲۱ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه



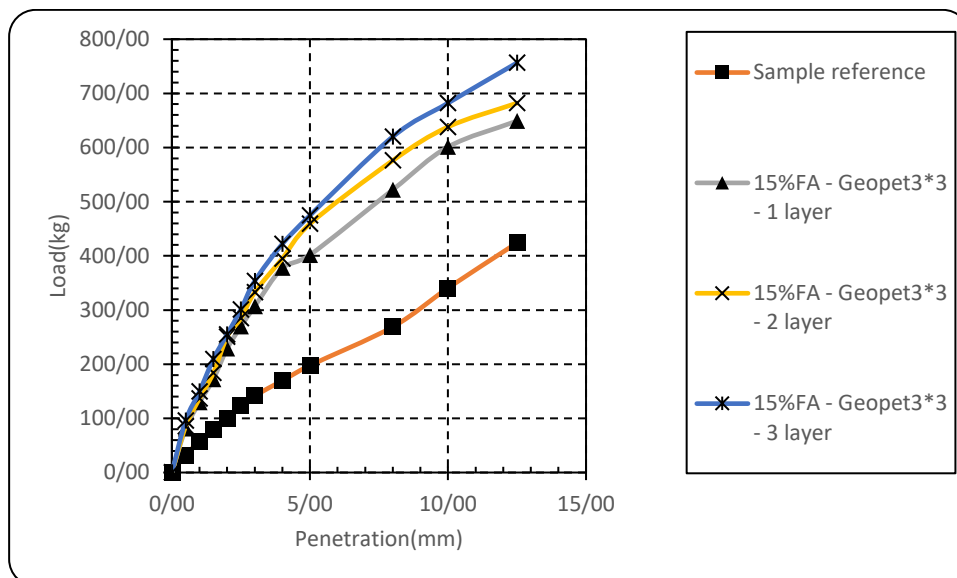
شکل ۴-۲۲ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه ۱۰٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۴-۲۳ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۴-۲۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 2×2 به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه



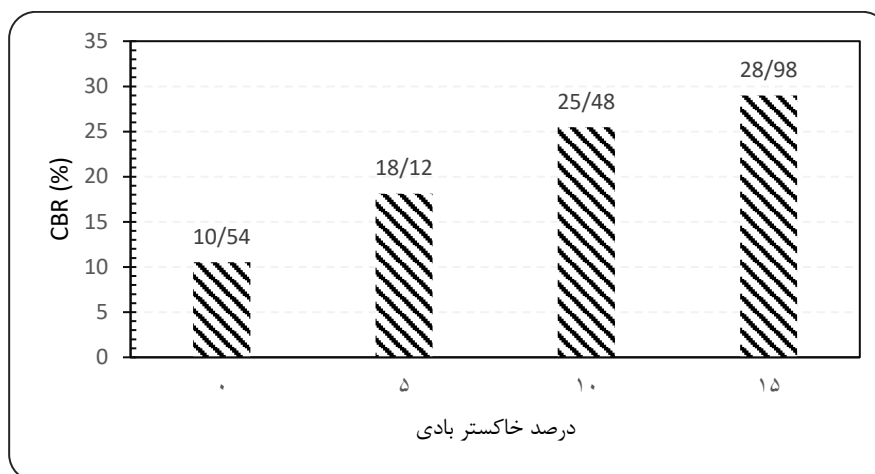
شکل ۴-۲۵ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 3×3 به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل‌آوری ۷ روزه

باتوجه به نتایج به دست آمده در بخش (۳-۲-۴) و همچنین منحنی‌های نیرو - نفوذ در این قسمت مشاهده می‌شود بهترین عملکرد Geopet در نمونه‌های خاک ماسه‌ای تحت آزمایش CBR به صورت سه لایه با اندازه چشمه‌های ۱×۱ سانتی‌متر است. منحنی‌های نیرو - نفوذ در این بخش نشان‌دهنده بهبود پارامترهای مقاومتی خاک در هنگام استفاده از خاکستر بادی می‌باشند، همان طور که مشاهده می‌شود اضافه کردن خاکستر بادی به خاک باعث افزایش مقدار فشار بر حسب نفوذ سنبه و در نتیجه افزایش مقادیر CBR خاک می‌شود؛ علت این امر پر کردن فضای خالی بین دانه‌های خاک توسط خاکستر بادی است. به طوری که با افزودن خاکستر بادی به میزان ۵ درصد در نمونه خاک ماسه‌ای مسلح شده با سه لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه ۱×۱ مقدار CBR از ۱۰/۵۴٪ به ۱۸/۱۲٪ افزایش پیدا کرده است. اضافه کردن این ماده به نمونه‌ها به میزان ۱۰ و ۱۵ درصد نیز به مقدار قابل توجهی مقادیر CBR را افزایش می‌دهند، به طوری که در نمونه‌های با ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر بادی مقدار CBR نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۲/۴۱ و ۲/۷۴ برابر شده است. باتوجه به رابطه نقش مستقیم افزایش مقدار خاکستر بادی در افزایش مقادیر CBR انتظار می‌رفت با اضافه کردن خاکستر بادی با درصدهای

بالاتر از ۱۵ درصد مقدار CBR افزایش یابد، اما باتوجه به افزایش حجم نمونه و عدم امکان تراکم آن در رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر مدنظر، از این حالت صرف نظر شد.

جدول ۲-۴ مقادیر CBR برای نمونه‌های با رطوبت بهینه و ۷ روز عمل‌آوری

ردیف	خاکستر بادی (%)	اندازه چشمه Geopet (cm)	تعداد لایه‌ها	CBR(%)
۱	٪۵	۱×۱	۱	۱۶,۳۶
۲	٪۵	۱×۱	۲	۱۶,۶۰
۳	٪۵	۱×۱	۳	۱۸,۱۲
۴	٪۱۰	۱×۱	۱	۲۳,۱۰
۵	٪۱۰	۱×۱	۲	۲۳,۵۳
۶	٪۱۰	۱×۱	۳	۲۵,۴۸
۷	٪۱۵	۱×۱	۱	۲۶,۳۹
۸	٪۱۵	۱×۱	۲	۲۶,۷۹
۹	٪۱۵	۱×۱	۳	۲۸,۹۸
۱۰	٪۵	۲×۲	۱	۱۴,۹۲
۱۱	٪۵	۲×۲	۲	۱۵,۲۱
۱۲	٪۵	۲×۲	۳	۱۶,۷۸
۱۳	٪۱۰	۲×۲	۱	۲۰,۹۴
۱۴	٪۱۰	۲×۲	۲	۲۱,۷۷
۱۵	٪۱۰	۲×۲	۳	۲۴,۲۰
۱۶	٪۱۵	۲×۲	۱	۲۳,۳۴
۱۷	٪۱۵	۲×۲	۲	۲۵,۷۲
۱۸	٪۱۵	۲×۲	۳	۲۷,۶۲
۱۹	٪۵	۳×۳	۱	۱۳,۶۴
۲۰	٪۵	۳×۳	۲	۱۴,۳۰
۲۱	٪۵	۳×۳	۳	۱۵,۵۰
۲۲	٪۱۰	۳×۳	۱	۱۹,۳۰
۲۳	٪۱۰	۳×۳	۲	۱۹,۹۸
۲۴	٪۱۰	۳×۳	۳	۲۱,۷۰
۲۵	٪۱۵	۳×۳	۱	۲۱,۵۸
۲۶	٪۱۵	۳×۳	۲	۲۴,۴۹
۲۷	٪۱۵	۳×۳	۳	۲۵,۳۲

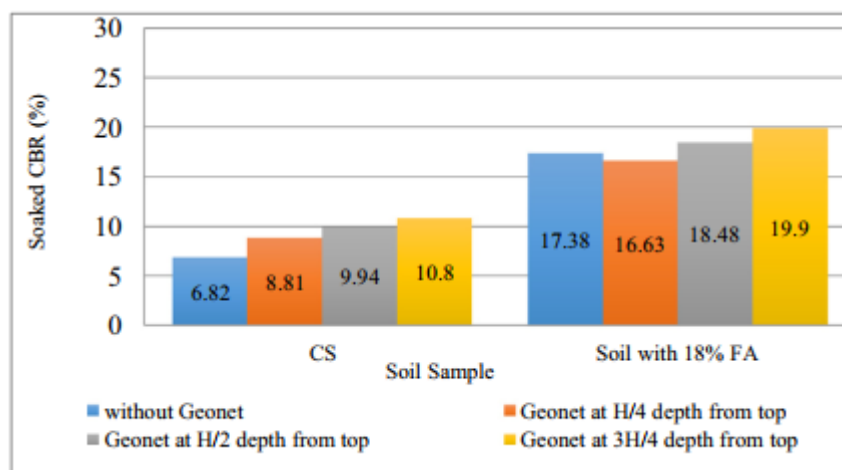


شکل ۴-۲۶ مقایسه مقادیر CBR در حالت بهینه استفاده از Geopet در سه درصد وزنی خاکستر بادی

همان طور که طبق شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود در نمونه‌های مسلح شده با Geopet افزایش مقدار خاکستر بادی باعث افزایش مقادیر CBR شده است. به‌طوری‌که افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر بادی به نمونه خاک مرجع به ترتیب باعث افزایش ۷۱/۹، ۱۴۱/۷ و ۱۷۴/۹ درصدی مقدار CBR شده است. طبق استاندارد FHWA مرتبط با خاکستر بادی هنگام استفاده از خاکستر بادی کلاس F باید از یک ماده فعال کننده استفاده کرد، که در این پژوهش از سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار استفاده شده است. نتایج مقایسه نمونه‌های با سدیم هیدروکسید و بدون این ماده در بند (۴-۳) آورده شده است. باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود استفاده از ۱۵٪ خاکستر بادی به همراه سه‌لایه Geopet به ابعاد اندازه چشمه ۱×۱ بهینه‌ترین حالت استفاده از این عناصر می‌باشد.

در موارد مشابه کولیاس و همکاران بیان کردند اضافه کردن ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر بادی به خاک رس (CL) مقدار CBR نمونه‌ها را به ترتیب ۷، ۱۴ و ۱۸ برابر، همچنین افزودن همین مقادیر خاکستر بادی به خاک رس (CH) مقدار CBR را حدود ۲، ۶ و ۱۱ برابر می‌کند. [۴۹] اوگوتا و مانیکا در پژوهشی مشاهده کردند افزودن ۶، ۱۲ و ۱۸ درصد خاکستر بادی به خاک ماسه‌ای مقدار CBR را در نمونه‌ها به میزان ۵۰، ۱۴۰ و ۲۰۷ درصد افزایش می‌دهد. [۴۷] بروکس و همکاران در پژوهشی به این نتیجه رسیده‌اند افزودن ۵ و ۲۵ درصد خاکستر بادی به خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۲ و ۲۵ درصد

مقدار CBR نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. [۴۶] موتولاکشمی و همکاران^۱ در پژوهشی با استفاده از خاکستر بادی و ژئونت به تسلیح و تثبیت خاک پرداختند. شکل (۴-۲۷) نتایج آزمایش‌های CBR انجام شده توسط ایشان بر روی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصدهای مختلف خاکستر بادی (۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۲ و ۲۶ درصد) به همراه یک لایه ژئونت در عمق‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۷ نتایج آزمایش‌های CBR برای نمونه‌های مسلح و تثبیت شده با ژئونت و خاکستر بادی در پژوهش موتولاکشمی و همکاران [۵۰]

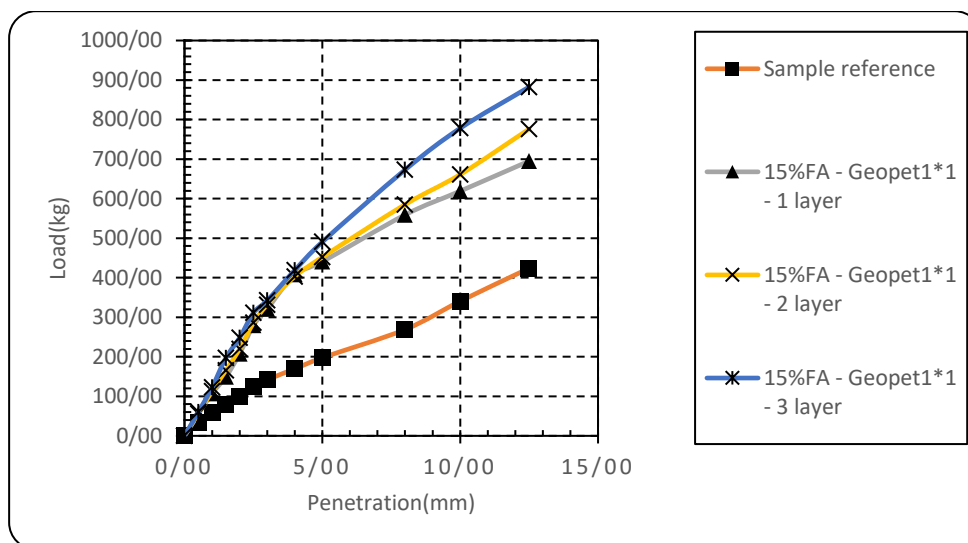
باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود که اضافه کردن ۱۸ درصد خاکستر بادی به همراه یک لایه ژئونت در عمق $3H/4$ ارتفاع از سطح قالب بهترین عملکرد را برای تسلیح و تثبیت خاک با این عناصر دارد. [۵۰]

۴-۳- بررسی اثر فعال کننده بر عملکرد خاکستر بادی در تثبیت خاک ماسه‌ای

در این بخش به بررسی اثر فعال کننده بر عملکرد خاکستر بادی که از عوامل بسیار تأثیرگذار بر مقاومت نمونه‌هاست می‌پردازیم. در فناوری ژئوپلیمر، محلول قلیایی باعث انحلال مواد آلومینوسیلیکات می‌شود و ترکیبات سیلیسی و آلومینی را تشکیل می‌دهد. در محصولات نهایی، کاتیون‌های فلزی قلیایی در شبکه پلیمری به هم متصل می‌شوند تا بارهای منفی را متعادل کنند. [۵۰، ۵۱] بنابراین، استفاده ناکافی از فعال کننده قلیایی ممکن است منجر به انحلال ناقص مواد و در نتیجه درجه پایین تر

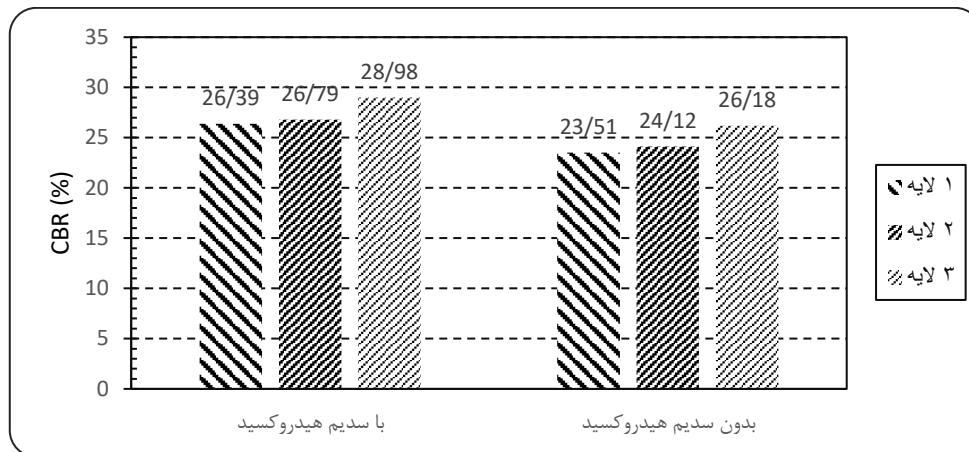
¹ S. Muthu Lakshmi et al

ژئوپلیمریزاسیون شود. با این وجود، فعال کننده بیش از حد نیز برای توسعه مقاومت بازدارنده خواهد شد، زیرا محافظت الکترواستاتیک فعالیت یون ها را کاهش داده و مانع فروشویی فازهای جامد می شود. [۵۳] شکل (۴-۲۸) نمودارهای نیرو- نفوذ نمونه های ساخته شده از خاک ماسه ای با ۱، ۲ و ۳ لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه های ۱×۱ سانتی متر در ارتفاع های مختلف به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی با عمل آوری ۷ روزه در شرایط دمای محیط بدون استفاده از محلول فعال ساز را نشان می دهد.



شکل ۴-۲۸ نمودار نیرو-نفوذ نمونه های ماسه ای غیرمسلح و مسلح شده با 1×1 Geopet به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی با عمل آوری ۷ روزه بدون محلول فعال ساز

شکل (۴-۲۹) نیز مقایسه بین مقادیر CBR در نمونه های با سه لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه ۱×۱ سانتی متر به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی در دو حالت استفاده از محلول فعال ساز و بدون به کارگیری این ماده را نشان می دهد.



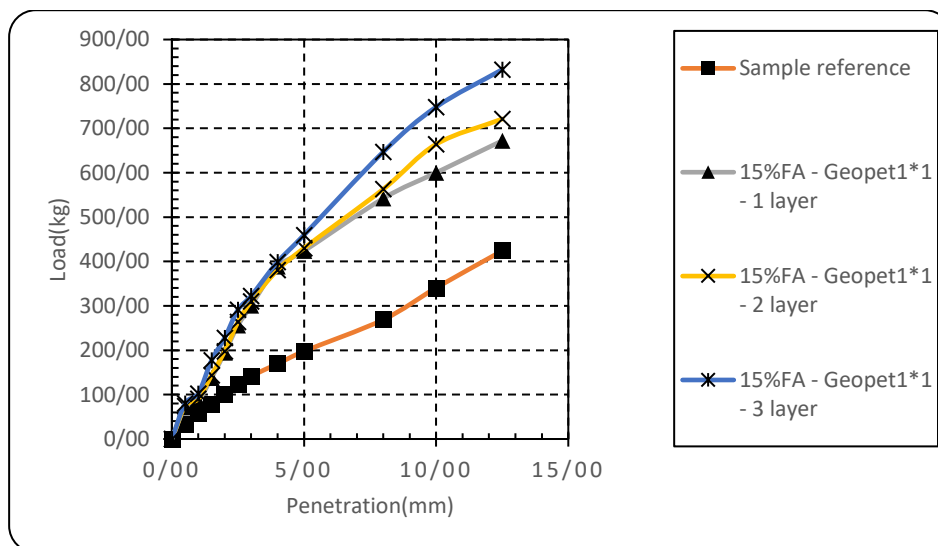
شکل ۴-۲۹ مقایسه مقادیر CBR در دو حالت استفاده از محلول فعال ساز و بدون به کارگیری این ماده در Geopet 1×1 با ۱۵٪ خاکستر بادی

همان طور که طبق نتایج مشاهده می شود، در حالت بدون استفاده از محلول فعال ساز (سدیم هیدروکسید) مقدار فشار بر حسب نفوذ سنبه نسبت به حالت استفاده از این ماده کاهش پیدا کرده است. با اضافه کردن سدیم هیدروکسید به عنوان ماده فعال ساز در کنار خاکستر بادی مقادیر CBR تغییرات چشمگیری داشته است، به گونه ای که در حالت بدون استفاده از این ماده مقدار CBR در نمونه خاک ماسه ای مسلح شده با سه لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه ۱×۱ سانتی متر به مقدار ۹.۶ درصد کاهش پیدا کرده است. از موارد مشابه می توان به پژوهش ساهو اشاره کرد، ایشان در پژوهشی بر روی خاک ماسه ای تثبیت شده با خاکستر بادی مقادیر CBR را در دو حالت استفاده از سدیم هیدروکسید و بدون استفاده از این ماده بررسی کرده اند. نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که از سدیم هیدروکسید در نمونه ها استفاده نمی شود مقدار CBR از ۴۰ درصد به ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است. [۳۸]

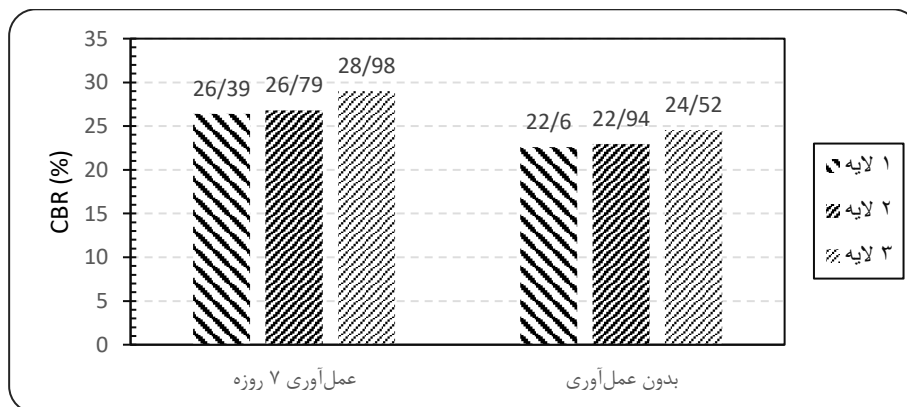
۴-۴- بررسی اثر زمان و دمای عمل آوری

شرایط عمل آوری که شامل زمان و دما می شود اثر چشم گیری بر ظرفیت باربری نمونه ها دارد. [۵۴] به علاوه، طولانی شدن زمان عمل آوری می تواند باعث شود واکنش های لازم به طور کامل تری انجام شود؛ ژئوپلیمرهای با دمای عمل آوری کم معمولاً به زمان طولانی تری نیاز دارند تا اجزای آلومینوسیلیکات به

اندازه کافی و موثر حل شوند. با این حال، عمل‌آوری در دماهای بالا و به مدت طولانی باعث شکسته شدن ساختار ژئوپلیمر، کم‌آبی نمونه و تجزیه شدن آن شده که در نهایت باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود. در نتیجه عمل‌آوری بسیار طولانی مدت می‌تواند اثر منفی بر ظرفیت باربری نمونه‌ها داشته باشد. [۵۵] شکل (۳۰-۴) نمودارهای نیرو-نفوذ مربوط به نمونه‌های ماسه‌ای مسلح شده با سه لایه Geopet به صورت ۱، ۲ و ۳ لایه با ابعاد اندازه چشمه‌های ۱×۱ سانتی‌متر به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی بدون مدت زمان عمل‌آوری و شکل (۳۱-۴) مقایسه مقادیر CBR در نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری و بدون عمل‌آوری را نشان می‌دهند.



شکل ۳۰-۴ نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با Geopet 1×1 به همراه ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی بدون عمل‌آوری



شکل ۳۱-۴ مقایسه مقادیر CBR در دو حالت نمونه‌های با عمل‌آوری ۷ روزه و بدون عمل‌آوری Geopet 1×1 در ۱۵٪ خاکستر بادی

همان طور که در نتایج مشاهده می‌شود مقدار فشار بر حسب نفوذ سنبه در نمونه‌های بدون عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های با عمل‌آوری ۷ روزه کاهش یافته است. علت این امر عدم زمان کافی برای انحلال آلومینوسیلیکات‌ها در نمونه است که باعث می‌شود ژئوپلیمریزاسیون به طور کامل انجام نگیرد. باتوجه به نتایج مقادیر CBR مشاهده می‌شود مقدار CBR در نمونه‌های بدون مدت‌زمان عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۷ روز کاهش یافته است؛ به‌طوری‌که این مقدار در نمونه مسلح شده با سه‌لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه 1×1 سانتی‌متر به همراه ۱۵ درصد خاکستر بادی به میزان $15/3$ درصد نسبت به نمونه مشابه با عمل‌آوری ۷ روزه کاهش پیدا کرده است.

۴-۵- جمع‌بندی فصل

در این فصل، باتوجه به موضوع پژوهش، نتایج به‌صورت تأثیرات حالت‌های مختلف استفاده از ضایعات پلاستیکی (به‌صورت خرده، نواری و Geopet) و خاکستر بادی بر پارامترهای مقاومتی خاک، تحلیل شدند. در ابتدای فصل، نمودار آزمایش‌های مرجع و در بخش‌های بعدی تأثیر تغییر شرایط نمونه خاک مورد بررسی قرار گرفت. در بخش (۴-۲-۲-۱) نشان داده شد که با افزایش درصد PET (تا ۱ درصد برای خرده‌ها و ۲ درصد برای PET‌های نواری)، ظرفیت باربری نمونه افزایش یافته است. در بخش (۴-۳-۲) تأثیر استفاده از Geopet با ابعاد اندازه چشمه‌ها و تعداد لایه‌های مختلف بر مقدار ظرفیت باربری نمونه‌ها در دو حالت دانسیته خشک ($Dr=70\%$) و رطوبت بهینه مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد استفاده از سه‌لایه Geopet با ابعاد اندازه چشمه 1×1 سانتی‌متر بهترین حالت استفاده از این مسلح کننده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از Geopet مانع از گسیختگی نمونه خاک در هر دو حالت دانسیته خشک و رطوبت بهینه شده است. در بخش (۴-۲-۴) نشان داده شد با افزایش مقدار خاکستر بادی (تا ۱۵ درصد) و کاهش ابعاد اندازه چشمه‌های Geopet، ظرفیت باربری و در نتیجه مقادیر CBR نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. در بخش‌های (۴-۳) و (۴-۴) نیز به بررسی تأثیر ماده فعال‌ساز و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها پرداخته شده و نتایج نشان داد استفاده از سدیم هیدروکسید به‌عنوان ماده

فعال‌ساز و زمان عمل‌آوری مناسب باعث افزایش چشمگیر مقادیر CBR شده است.

نتایج کلی حاصل از آزمایش‌ها و خروجی‌ها و نیز پیشنهادهایی در این زمینه، در فصل بعد ارائه شده

است.

فصل پنجم

جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

همان طور که در فصل‌های پیشین بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای مسلح و تثبیت شده با اشکال مختلف PET (خرده، نواری و Geopet) در درصد‌های وزنی و حالت‌های متفاوت به همراه خاکستر بادی تحت آزمایش CBR بوده است. خاک ماسه‌ای مورد مطالعه از سواحل بندر انزلی برداشت شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. طرح بررسی شده موردنظر نیز می‌تواند به‌عنوان یک طرح عملیاتی بهسازی بر روی ماسه بندر انزلی انجام پذیرد. در قالب این پژوهش بنابراین بود تا تأثیر عواملی همچون درصد وزنی، ابعاد و اشکال مختلف مسلح کننده (PET)، تأثیر مقادیر مختلف خاکستر بادی، اثر سدیم هیدروکسید به‌عنوان ماده فعال‌ساز و همچنین تأثیر زمان عمل‌آوری بر ظرفیت باربری نمونه خاک مورد بررسی قرار گیرد. به‌منظور انجام تحلیل بر روی نمونه‌های مسلح شده و مقایسه آن با نمونه‌های غیرمسلح، بر روی نمونه خاک آزمایش CBR انجام گرفت و نتایج در قالب نمودارهای استاندارد با تحلیل مقادیر نیرو - نفوذ و CBR ارائه گردید.

۵-۲- نتیجه‌گیری

استفاده مجدد پسماندهای جامد جهت تسلیح و تثبیت خاک در پروژه‌های عمرانی از دو حیث حائز اهمیت است؛ مورد اول کمک به حفظ محیط زیست از طریق کاهش ضایعات و دیگری بهبود رفتار مکانیکی خاک. از طرفی رشد جمعیت موجب شده است تا زمین‌های دارای خصوصیات ژئوتکنیکی مناسب کاهش یابند بنابراین امروزه نیاز به بهسازی خصوصیات مکانیکی خاک بیش از پیش احساس می‌شود.

در این مطالعه با انجام آزمایش‌های CBR بر روی ماسه مسلح و تثبیت‌شده بندر انزلی با اشکال مختلف PET (خرده‌ها، نوارها و Geopet) همراه با خاکستر بادی و سدیم هیدروکسید مشاهده گردید که شکل‌پذیری و ظرفیت باربری خاک با افزایش قابل‌توجهی نسبت به حالت غیرمسلح همراه بوده است.

نتایج دقیق‌تر این بررسی در زیر آورده شده است:

- در آزمایش CBR، افزودن خرده‌ها و نوارهای PET به ترتیب تا ۱٪ و ۲٪ به ماسه (به طور جداگانه) موجب افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه نسبت به حالت غیرمسلح شده است. به عبارتی خاک مسلح مقاومت بیشتری نسبت به خاک غیرمسلح از خود نشان داده است.
- با تسلیح ماسه توسط لایه‌های Geopet، به دلیل اثر غشایی و اصطکاک Geopet با خاک و اثر محصور شدگی و غشایی این عناصر ظرفیت باربری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. قراردادن سه‌لایه Geopet در ارتفاع‌های $H/4$ ، $H/2$ و $3H/4$ از سطح نمونه باعث افزایش مقدار فشار برحسب نفوذ سنبه نسبت به حالت‌های یک، دو لایه و خاک بدون مسلح کننده می‌گردد.
- با افزایش مقدار خاکستر بادی رطوبت بهینه کمی زیاد شده ولی وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد.
- افزایش میزان خاکستر بادی در نمونه‌ها مقادیر CBR آن‌ها را افزایش می‌دهد. این موضوع به دلیل افزایش واکنش‌های پوزولانی ناشی از حضور خاکستر بادی است.
- در نمونه‌های تثبیت شده و مسلح، به دلیل مقاومت کششی Geopet، مقدار فشار برحسب نفوذ پس از رسیدن به مقدار حداکثر، کاهش نیافته و روند افزایش فشار برحسب نفوذ سنبه با شیب ملایم‌تری ادامه پیدا می‌کند. در تنش‌های پایین ظرفیت باربری ایجاد شده، بیشتر ناشی از مقاومت لایه‌های ماسه تثبیت شده است ولی با ادامه افزایش تنش و ایجاد تغییر شکل در مسلح کننده‌ها، لایه‌های تسلیح نقش خود را در افزایش مقدار فشار برحسب نفوذ سنبه و در نتیجه افزایش مقدار CBR نشان داده و مانع از کاهش ظرفیت باربری می‌شود.
- اضافه کردن سدیم هیدروکسید به نمونه‌ها باعث انحلال مواد آلومینوسیلیکات در خاکستر بادی شده و سبب می‌شود ژئوپلیمریزاسیون به طور کامل صورت گیرد و باعث افزایش

مقادیر CBR نسبت به نمونه‌های بدون سدیم هیدروکسید شود.

- عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۷ روز منجر به افزایش مقدار فشار برحسب نفوذ و در نتیجه افزایش مقادیر CBR شد. به‌طوری‌که در شرایط یکسان برای یک نمونه بدون شرایط عمل‌آوری مقدار CBR، ۱۵/۳ درصد کاهش پیدا کرد.

۵-۳- پیشنهادها

- ۱- انجام آزمایش‌های سه محوری و ادنومتر برای بررسی دقیق‌تر رفتار مخلوط‌های Geopet، خاکستر بادی و سدیم هیدروکسید
- ۲- انجام آزمایش‌های برش مستقیم با نمونه‌سازی مشابه این پایان‌نامه در حالت خشک و اشباع
- ۳- انجام آزمایش‌های دینامیکی از قبیل برش ساده سایلنیک و سه محوری سایلنیک بر روی نمونه‌های ماسه‌ای یا رسی تثبیت شده و مسلح، با عناصر مصرفی در این پایان‌نامه.
- ۴- اختلاط خاک ماسه‌ای با درصدهای بالاتر از ۱۵٪ خاکستر بادی و همچنین حالت‌های دیگر به‌کارگیری ضایعات پلاستیکی
- ۵- بررسی حالت‌های مختلف عمل‌آوری نمونه‌ها
- ۶- سنجش پارامترهای مقاومت برشی ماسه مسلح شده با عناصر مصرفی در این پژوهش در درصد رطوبت‌های مختلف
- ۷- پیشنهاد می‌شود به‌منظور بررسی تغییرات سختی خاک بعد از تثبیت با خاکستر بادی مطالعاتی در خصوص بررسی کرنش‌های لحظه گسیختگی و مدول سکانتی نمونه‌ها انجام شود

-
- [1] L. E. E. W. Abramson and D. A. Bruce, *Ground Control and Improvement*. John Wiley & Sons, 1994.
- [2] F. C. Chebet and D. Kalumba, "Laboratory Investigation on Re-Using Polyethylene (Plastic) Bag Waste Material for Soil Reinforcement in Geotechnical Engineering," *Civ. Eng. Urban Plan. An Int. J.*, vol. 1, no. 1, 2014.
- [3] N. C. Consoli, M. A. Vendruscolo, A. Fonini, and F. D. Rosa, "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range," *Geotext. Geomembranes*, vol. 27, no. 3, pp. 196–203, 2009, doi: 10.1016/j.geotextmem.2008.11.005.
- [4] S. Mahvash, S. López-Querol, and A. Bahadori-Jahromi, "Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization," *Heliyon*, vol. 3, no. 3, p. e00274, 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00274.
- [5] J. Han, *Principles and Practice of Ground Improvement*, vol. 11, no. 3. John Wiley & Sons, 2015.
- [6] American Coal Ash Association, *Fly Ash Facts for Highway Engineers*, vol. 53, no. 9. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2013.
- [7] H. V. S. GangaRao, N. Taly, and P. V. Vijay, *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. CRC press, 2006.
- [8] American Coal Ash Association, "Fly Ash Facts for Highway Engineers," US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2013.
- [9] P. G. Nicholson, *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [10] B. Erickson, "U.S. environmental protection agency," *Today's Chemist at Work*, 1999. www.epa.gov.

[۱۱] ع. ارومیه ای، پلی/تیلن ترفتالات. انجمن علوم و مهندسی پلیمر ایران، ۱۳۹۳.

- [12] R. A. Carroll, "Coal Combustion Products in the United Kingdom and the Potential of Stockpile Ash," 2015, [Online]. Available: <http://www.flyash.info/2015/140->

carroll-edit-2015.pdf.

[13] UKQAA, "UKQAA Ash Availability Report," pp. 1–11, 2016.

[14] V. C. Pandey and N. Singh, "Impact of fly ash incorporation in soil systems," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 136, no. 1–2, pp. 16–27, 2010, doi: 10.1016/j.agee.2009.11.013.

[15] B. Celauro, A. Bevilacqua, D. Lo Bosco, and C. Celauro, "Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 1-Review of Design Methods," in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, vol. 53, pp. 754–763, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.925.

[16] B. Cetin and A. H. Aydilek, "PH and fly ash type effect on trace metal leaching from embankment soils," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 80, no. 1, pp. 107–117, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.09.006.

[17] J. J. Chang, "A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 7, pp. 1005–1011, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01096-7.

[18] R. J. Barrett, "Use of Plastic Filters in Coastal Structures," in *Coastal Engineering Proceedings*, 1966, vol. 1, no. 10, p. 61, doi: 10.9753/icce.v10.61.

[۱۹] ک. فخاریان و م. مجتهدی، "ژئوسینتتیک ها: معرفی، کاربرد و وضعیت آنها در جهان و ایران"،

۱۳۸۰.

[۲۰] غ. شفا بخش، ع. حداد و م. اکبری، *مبانی شناسایی ژئوسنتتیک ها*، چاپ اول. دانشگاه سمنان،

۱۳۹۰.

[21] R. M. Koerner, "Emerging and Future Developments of Selected Geosynthetic Applications," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 126, no. 4, pp. 293–306, 2000, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:4(293).

[22] O. B. Andersland, "Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture," in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*, 1979, vol. 1.

[23] M. H. Maher and Y. C. Ho, "Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite," *J. Geotech. Eng.*, vol. 120, no. 8, pp. 1381–1393, 1994, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:8(1381).

[24] M. Gosavi, K. A. Patil, S. Mittal, and S. Saran, "Improvement of properties of

black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement,” *J. Inst. Eng. Civ. Eng. Div.*, vol. 84, no. 4, pp. 257–262, 2004.

[25] M. Ghazavi and M. Amel Sakhi, “Optimization of aspect ratio of waste tire shreds in sand-shred mixtures using CBR tests,” *Geotech. Test. J.*, vol. 28, no. 6, pp. 564–569, 2005, doi: 10.1520/gtj12126.

[26] F. M. Abdrabbo and A. K. Ashmawy, “California Bearing Ratio (Cbr) and Bearing Capacity of Geogrid Reinforced Soil,” in *International Conference on Soil and Rock Engineering*, 2007, pp. 2–8.

[27] R. K. Dutta and V. K. Sarda, “CBR behaviour of waste plastic strip-reinforced stone dust/fly ash overlying saturated clay,” *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 171–182, 2007, doi: 10.3906/zoo-1301-10.

[28] D. S. V. Prasad, G. V. R. Prasada Raju, and V. Ramana Murthy, “Use of waste plastic and tyre in pavement systems,” *J. Inst. Eng. Civ. Eng. Div.*, vol. 89, no. AUGUST, pp. 31–35, 2008.

[29] R. M. Subramaniam and S. P. Jeyapriya, “Study on Effect of Waste Tyres in Flexible Pavement System,” *Indian Geotech. Soc. Chennai Chapter*, pp. 20–24, 2009.

[۳۰] س. سیم نگار و غ. کمالی، “بررسی آزمایشگاهی تسلیح ماسه با الیاف پلاستیک باطله پلی اتیلن

ترفتالات (پت). ” ۱۳۹۰.

[۳۱] م. دادوند، ن. رنجبر مالی دره، ج. برنجیان و ا. نوری دلاور، “بررسی تاثیر پلی اتیلن ترفتالات

(پت) بر رفتار مهندسی خاک های ماسه ای، ” ۱۳۹۶.

[32] S. Peddaiah, A. Burman, and S. Sreedeeep, “Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 36, no. 5, pp. 2907–2920, 2018, doi: 10.1007/s10706-018-0512-0.

[33] S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, and A. Karahalios, “Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 301–313, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019.

[34] S. Arora and A. H. Aydilek, “Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 640–649, 2005, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:6(640).

[35] F. Santos, L. Li, Y. Li, and F. Amini, “Geotechnical Properties of Fly Ash and

Soil Mixtures for Use in Highway Embankments,” 2011, [Online]. Available: <http://www.flyash.info/>.

[36] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, and A. T. Pinto, “Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 167–174, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049.

[37] A. Reyes and M. Pando, “Evaluation of CFBC fly ash for Improvement of Soft Clays,” in *2007 World of Coal Ash (W0CA)*, 2007, no. December, pp. 1–13.

[38] B. K. Sahu, “Improvement in California Bearing Ratio of Various Soils in Botswana by Fly Ash,” in *International Ash Utilization Symposium*, 2001, pp. 22–24.

[39] N. Cristelo, S. Glendinning, and A. T. Pinto, “Deep soft soil improvement by alkaline activation,” in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2011, vol. 164, no. 2, pp. 73–82, doi: 10.1680/grim.900032.

[40] M. J. McCarthy, L. J. Csetenyi, and M. R. Jones, “Clay-Lime Stabilization : Characterizing Fly Ash Effects in Minimizing the Risk of Sulfate Heave,” 2011.

[41] M. Rossow, “Fly Ash Facts for Highway Engineers,” 2003.

[42] L. G. Archuleta, P. J. Tikalsky, and R. L. Carrasquillo, “Production of concrete containing fly ash for structural applications,” University of Texas at Austin, 1985.

[43] R. B. Kogbara, A. Al-Tabbaa, Y. Yi, and J. A. Stegemann, “Cement–fly ash stabilisation/solidification of contaminated soil: Performance properties and initiation of operating envelopes,” *Appl. Geochemistry*, vol. 33, pp. 64–75, 2013.

[44] S. R. Kaniraj and V. G. Havanagi, “Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures,” *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, vol. 127, no. 7, pp. 574–584, 2001.

[45] A. H. Padade and J. N. Mandal, “Expanded Polystyrene-Based Geomaterial with Fly Ash,” *Int. J. Geomech.*, vol. 14, no. 6, p. 06014013, 2014, doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000390.

[46] R. Brooks, F. F. Udoeyo, and K. V. Takkalapelli, “Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 711–716, 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000214.

[47] F. N. Okonta and T. M. Manciya, “Compaction and strength of Lime - Fly ash stabilized collapsible residual sand,” *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 15 R, pp. 1976–1988, 2010.

[48] B. M. Das and N. Sivakugan, *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning, 2016.

[49] S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, and A. Karahalios, “Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 301–313, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019.

[50] S. Muthu Lakshmi *et al.*, “Enhancement of strength characteristics of Clayey Sand using fly ash and geonet,” *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.078.

[51] J. J. Thomas, A. J. Allen, and H. M. Jennings, “Density and water content of nanoscale solid C-S-H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 377–383, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.11.003.

[52] J. Davidovits, “Properties of Geopolymer Cements,” in *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1994, vol. 1, pp. 131–149.

[53] J. C. Petermann, A. Saeed, and M. I. Hammons, “Alkali-activated geopolymers: a literature review,” Applied Research Associates Inc Panama City Fl, 2010.

[54] M. Zribi, B. Samet, and S. Baklouti, “Effect of curing temperature on the synthesis, structure and mechanical properties of phosphate-based geopolymers,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 511, pp. 62–67, 2019, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.01.032.

[55] J. Li *et al.*, “Synthesis of electrolytic manganese residue-fly ash based geopolymers with high compressive strength,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, p. 118489, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118489.

Abstract

There is an international concern about the disposal or recycling of waste materials in the world, due to the increasing production of solid waste. One of the way to reuse solid waste is to use it in engineering and remediation of buildings or loose soil. The purpose of this study is to find a way to reuse a special type of plastic (bottles of buttermilk, soft drinks, mineral water, etc.) along with ash in geotechnical works to improve the soil. In this research, it Has been evaluated, the mechanical behavior of the sand of Anzali port, which has been reinforced and stabilized with different forms of plastic waste, fragments, strips and plastic sheets with different amounts, along with ash (Geopet)). California Bearing Ratio (CBR) tests have been performed on specimens with a relative density of 70% and also at optimum humidity. The results show that although polyethylene terephthalate (PET) fragment and strips have improved the mechanical behavior of sandy soils, the effect of Geopet reinforcement is more greater on improving soil mechanical behavior. The use of fly ash as a stabilizer in conjunction with Geopet has also had a significant effect on CBR values. Optimal use of these materials obtained in 7 days curing; Geopet with mesh dimensions of 1*1 in three layers with 15% ash content. Comparison between reinforced and unreinforced samples showed that in the optimal state, the CBR value improved by 174.9%.

Keywords: Anzali Port Sand, Soil Reinforcement, Soil Stabilization, Polyethylene Terephthalate (PET), California Bearing Ratio (CBR)



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Investigation Resistance Parameters of Sand Mixture of
Anzali Port Reinforced with wastes(PET) Using CBR Test**

By:

Mohammad Reza karami

Supervisor:

Dr. Mohsen Keramti

Dr. Reza Naderi

February 2021