

بررسی رفتار مخلوط خاک و خرده پلاستیک با استفاده از آزمایش‌های سه محوری و CBR

ام‌لیلا نجف‌زاده شوکی (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس نفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۸۱-۷۳

در این نوشتار، پتانسیل خرده‌های پلاستیک حاصل از بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی جهت تسلیح خاک و بهبود رفتار آن با انجام آزمایش‌های سه محوری و CBR بر روی ماسه‌ی تنها و ماسه‌ی مخلوط با خرده پلاستیک انجام شده است. آزمایش‌های سه محوری بر روی خاک و خاک مخلوط با دو اندازه‌ی کوچک و بزرگ خرده پلاستیک و آزمایش‌های CBR بر روی نمونه‌های خاک تنها و مخلوط خاک و خرده پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های سه محوری نشان می‌دهد که افزودن خرده پلاستیک به خاک، موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. به عنوان مثال، در فشار همه جانبه‌ی ۵۰ کیلو پاسکال، تراز کرنش ۶٪، تسلیح نمونه با ۱/۵٪ خرده پلاستیک موجب ۲۵٪ افزایش در میزان مقاومت شده است. این افزایش در مقاومت، با افزایش اندازه و درصد خرده پلاستیک و همچنین میزان کرنش اعمال شده بر نمونه قابل ملاحظه‌تر است. نتایج آزمایش‌های CBR نیز مبین کاهش نفوذ سنجه به داخل نمونه و افزایش در مقدار CBR با افزودن مقدار مناسب خرده پلاستیک به خاک شده است.

واژگان کلیدی: خاک، خرده پلاستیک، آزمایش‌های سه محوری، آزمایش CBR، مقاومت، کرنش.

l.najfzadeh.shavaki@gmail.com
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

با خاک مخلوط می‌شوند، در راه‌ها و خاکریزها، ضمن بهبود پاسخ و رفتار خاک موجب کاهش مصرف خاک مناسب قرضه‌ها به عنوان یک منبع طبیعی می‌شود. بنابراین، استفاده از این ضایعات پلاستیکی نظیر بطری‌های آب چند مزیت دارد: ۱. استفاده‌ی مجدد از مواد پلاستیکی؛ ۲. کاهش پراکندگی آن‌ها در طبیعت، مشکلات زیست محیطی و دفن آن‌ها؛ ۳. کاهش هزینه‌های مربوط به تهیه‌ی مسلح‌کننده‌های دیگر نظیر: ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل جهت تسلیح خاک؛ ۴. بالا بردن کیفیت رفتار خاک‌های نامرغوب؛ ۵. کاهش نیاز به تهیه‌ی خاک مناسب از قرضه. این تذکر لازم است که بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که زمان تجزیه‌ی کامل محصولات پلاستیکی بر حسب شرایط اقلیمی بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ سال است و با افزایش میزان دما، تجزیه‌ی آن‌ها در مدت زمان کمتری انجام می‌شود. این زمان در کشور ایران معمولاً بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ سال است.^[۱] بنابراین با توجه به عمر مفید سازه‌ها و همچنین بستر راه‌ها در ایران، امکان تجزیه‌ی خرده‌های پلاستیک در مخلوط با خاک (کاهش اندازه‌ی آن‌ها) و کاهش مقاومت مخلوط و رسیدن مقاومت آن به مقاومت طبیعی و اولیه در حین عمر بهره‌برداری تا حدی دور از انتظار به نظر می‌رسد. ضمن اینکه حتی پودر شدن احتمالی یا به شکل الیاف درآمدن خرده‌های پلاستیک مخلوط با خاک همچنان خاصیت مقاومتی در مخلوط با خاک دارد.^[۲-۵]

اگر چه در دهه‌های اخیر مطالعات و پژوهش‌های نسبتاً زیادی در رابطه با تسلیح خاک با پلاستیک ضایعاتی به صورت الیاف^۲ توسط پژوهشگران مختلف

طی چند سال اخیر، مسائل زیست محیطی و اقتصادی سبب توجه به استفاده از ضایعات حاصل از لاستیک‌های فرسوده، بطری‌ها، شیشه و... جهت اصلاح و بهبود خصوصیات خاک‌ها شده است. روش‌های پایدارسازی و تسلیح خاک، اغلب با استفاده از انواع ژئوسنتتیک‌ها، عوامل سیمانی‌کننده (آهک، سیمان پرتلند، آسفالت و...)، الیاف مصنوعی و غیرمصنوعی و یا خرده‌های لاستیک صورت می‌گیرد. خاک‌های پایدار شده یا تسلیح شده، اغلب مواد کامپوزیتی هستند که از ترکیب و بهینه‌کردن خواص تک تک مواد تشکیل‌دهنده نتیجه می‌شوند. یکی از جدیدترین روش‌های مطرح در زمینه‌ی اصلاح خصوصیات خاک، به کارگیری مواد بازیافتی حاصل از بطری‌های پلاستیکی از جنس PET^۱ است.^[۱] این مصالح به طور فراوان و گسترده توسط بشر در طبیعت رها می‌شوند و یا غالباً در محل‌هایی ذخیره و دور ریخته می‌شوند.^[۲] به طور کلی ماده‌ی اولیه‌ی بیشتر ظرف‌های پلاستیکی از نوع پلی استر است. از آنجا که تهیه ماده‌ی خام جهت تولید ظروف و محصولات ساخته شده از پلی استر در مجموع از نوع بازیافتی آن ارزان‌تر تمام می‌شود، لذا در بسیاری از موارد به جای بازیافت صنعتی آن‌ها، استفاده از این نوع پلاستیک ضایعاتی در زمینه‌های دیگر نظیر مهندسی ژئوتکنیک، ضمن کاهش میزان آن در طبیعت، می‌تواند جهت بهبود رفتار خاک مؤثر باشد.^[۳] زیاله‌های پلاستیکی وقتی

* نویسنده مسئول

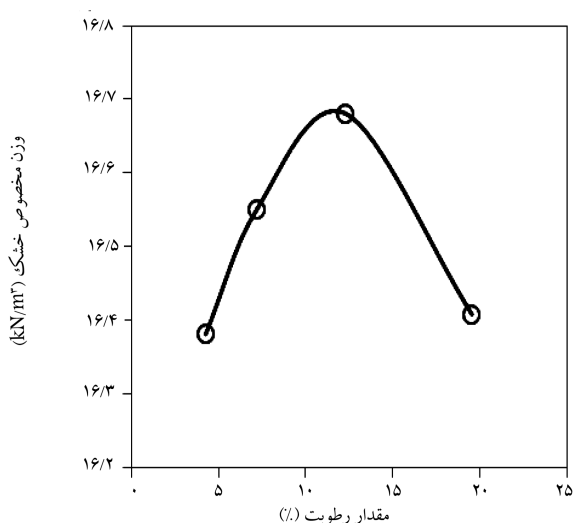
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۴/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۶

۲. مصالح مصرفی

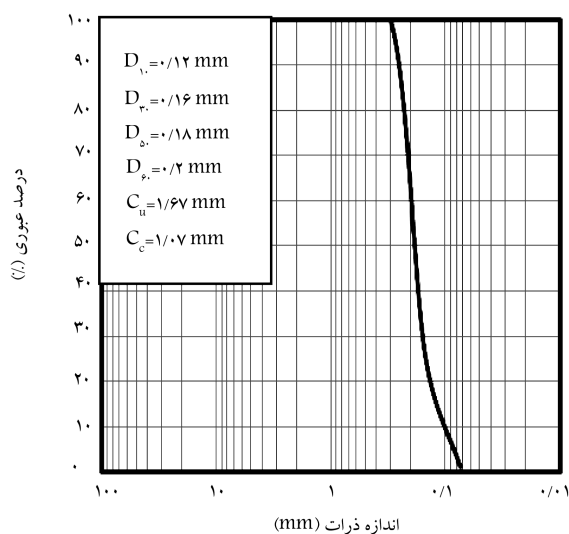
۱.۲. خاک

خاک مورد استفاده در کلیه آزمایش‌ها، ماسه‌ی ساحل شهرستان رودسر واقع در کرانه‌ی جنوبی دریای مازندران است. با توجه به آزمایش تراکم اصلاح شده روی نمونه ماسه‌ی موردنظر (شکل ۱) مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک برابر ۱۶/۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب و میزان رطوبت بهینه‌ی آن حدود ۱۱/۵٪ هستند. هم چنین کمینه‌ی وزن مخصوص خشک ۱۴/۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب و توده‌ی ویژه‌ی آن نیز برابر $G_s = ۲/۶۸$ اندازه‌گیری شده است.

توزیع اندازه‌ی ذرات ماسه توسط آزمایش دانه‌بندی مطابق شکل ۲ است. این منحنی نشان می‌دهد که ماسه‌ی موردنظر تقریباً یکنواخت و با اندازه‌ی ذرات بین ۰/۰۶ و ۰/۳ میلی‌متر است. مطابق سیستم طبقه‌بندی یکنواخت (ASTM D ۲۴۸۷-۱۱)،^[۲۰] خاک مورد آزمایش به صورت ماسه با دانه‌بندی بد (SP) طبقه‌بندی می‌شود.



شکل ۱. تغییرات وزن مخصوص خشک خاک در مقابل درصد رطوبت آن.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش.

انجام شده است،^[۱۸-۵] اما در خصوص استفاده‌ی مستقیم از خرده‌های حاصل از بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی در مخلوط با خاک (تسلیح خاک)، فقط تعداد بسیار محدودی مطالعه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته است.^[۲۱] استفاده از خرده‌های پلاستیک به جای الیاف، آن‌ها را بی‌نیاز از فرآیند تبدیل ضایعات بطری‌های پلاستیکی به الیاف در کارخانه می‌کند، به طوری که با خردکردن آن‌ها توسط خردکن در یک کارگاه می‌توان با صرف هزینه‌ی تولید کمتر در مقایسه با هزینه‌ی تولید الیاف، آن‌ها را جهت تسلیح خاک استفاده کرد.

پژوهشگران در مطالعه‌ی خود آزمایش‌های سه‌محوری و تحکیم یک بعدی بر روی رس و ماسه‌ی مسلح شده با خرده‌های حاصل از بطری‌های پلاستیکی آب را انجام داده‌اند. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری آنها بیان‌گر مقاومت فشاری بیشتر در نمونه‌های مسلح در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح بوده است. نتایج آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی نیز کاهش مقادیر نشانه‌های تورم و فشردگی با افزایش میزان خرده‌پلاستیک نمونه‌ها را نشان داده‌اند. هم چنین آنها افزایش بیشتر مقاومت در ماسه‌ی مخلوط با خرده‌پلاستیک نسبت به رس مخلوط با خرده‌پلاستیک را گزارش کرده‌اند.^[۲]

پژوهشگران دیگری نیز یک سری آزمایش فشاری محدود نشده، کششی و نیز آزمایش موئینگی بر روی خاک مخلوط با گچ بازیافتی و خرده‌های پلاستیک حاصل از ظروف پلاستیکی ضایعاتی انجام داده‌اند. تمامی این آزمایش‌ها روی نمونه‌های خاک از نوع SP، حاوی گچ بازیافتی به میزان ۱۰٪ وزنی از خاک، ۳٪ سیمان پرتلند و باریکه‌های پلاستیک با اندازه، مقدار و نسبت طول به عرض متفاوت و هم چنین در درصد‌های مختلف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی خرده‌پلاستیک به وزن خاک انجام شده‌اند. نتایج حاصله حاکی از افزایش مقاومت خاک در برابر گسیختگی کششی، با افزودن خرده‌پلاستیک بوده است.^[۳]

این تذکر لازم است که در پروژه‌های واقعی به منظور جلوگیری از پخش مصالحی نظیر خرده‌پلاستیک و خرده‌پلاستیک مخلوط با خاک در طبیعت و جلوگیری از آتش‌سوزی احتمالی ناشی از تابش نور خورشید، از یک لایه خاک تنها روی مخلوط موردنظر (لایه‌ی پوشش) استفاده می‌شود که این امر موجب افزایش باربری بستر نیز می‌شود.^[۱۹]

مرور کارهای پژوهشگران اخیر نشان می‌دهد که در زمینه‌ی استفاده‌ی مستقیم از خرده‌های حاصل از بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی در مخلوط با خاک و تأثیر آن در بهبود رفتار مصالح، فقط تعداد محدودی مطالعه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته است.^[۳۲] از این رو به منظور توسعه‌ی مطالعات پژوهشگرانی نظیر بابو و چاکسی،^[۲] یک سری آزمایش سه‌محوری با اندازه‌ی بزرگ‌تر نمونه، درصد بیشتر خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک، دو اندازه از خرده‌های پلاستیک و هم چنین تعدادی آزمایش ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) روی خاک تنها و مخلوط خاک - خرده‌پلاستیک انجام شده است. بدین لحاظ در این نوشتار برای توسعه و شناخت بیشتر رفتار مخلوط خاک - خرده‌پلاستیک، بررسی‌های آزمایشگاهی روی بهبود خواص ماسه‌ی ساحل شهرستان رودسر در ترکیب با خرده‌های پلاستیک حاصل از بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی با استفاده از آزمایش سه‌محوری و آزمایش ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) مدنظر است. در آزمایش‌های سه‌محوری بررسی اثر این عوامل:

- اندازه (طول و عرض) خرده‌های پلاستیک در بهبود رفتار تنش - کرنش خاک؛
 - درصد خرده‌های پلاستیک در بهبود رفتار تنش - کرنش خاک؛
 - تنش همه‌جانبه بر رفتار نمونه‌ی خاک تنها و نمونه‌ی مخلوط خاک - خرده‌پلاستیک.
- و هم چنین در آزمایش ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) بررسی اثر میزان خرده‌پلاستیک در بهبود CBR نمونه‌ی مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح مدنظر است.



شکل ۴. مخلوط خاک و خرده پلاستیک.



الف) بطری های مورد نظر؛



شکل ۵. تقسیم خاک و خرده پلاستیک به ۶ قسمت مساوی.



ب) خرده پلاستیک مورد استفاده در آزمایش ها در دو اندازه ی بزرگ و کوچک.

شکل ۳. تصویری از بطری ها و خرده پلاستیک های مورد استفاده.

است. به منظور ایجاد توزیع مناسب خرده های پلاستیک در خاک، عمل اختلاط با دقت مناسب انجام شده است. شکل های ۴ و ۵ به ترتیب تصویری از مخلوط خاک - خرده پلاستیک و نحوه ی تقسیم خاک و خرده پلاستیک را به ۶ قسمت مساوی نشان می دهند. در پروژه های عملی، با توجه به حجم زیاد مخلوط در صورت اختلاط کافی و مناسب خاک و خرده پلاستیک، دستیابی به مخلوط یکنواخت با عملکرد مناسب دور از انتظار نخواهد بود.

۴. برنامه ی آزمایش ها

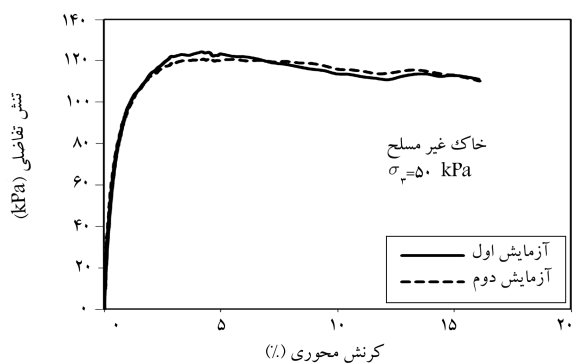
همان طور که قبلاً بیان شد، آزمایش های مورد نظر روی مخلوط خاک - خرده پلاستیک و خاک تنها شامل آزمایش های سه محوری و CBR هستند. آزمایش های سه محوری بر روی نمونه هایی از ماسه ی تنها و ماسه ی مسلح با خرده پلاستیک با دو اندازه ی کوچک و بزرگ در مقادیر ۱/۵ و ۱، ۰/۵ درصد وزنی خرده پلاستیک در مخلوط با خاک مطابق ASTM D 2850-03^[۲۱] انجام شدند. نمونه های سه محوری به قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر تحت سه فشار هم جانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و بار محوری با نرخ اعمال بار ۲ میلی متر بر دقیقه قرار گرفتند. این تذکر لازم است که به دلیل ابعاد کوچک نمونه و مشکل بودن آماده سازی نمونه و رسیدن به تراکم مورد نظر در درصد های خرده پلاستیک بالای ۱/۵٪، از انجام آزمایش روی نمونه با درصد خرده پلاستیک بیش از ۱/۵ صرف نظر شده است.

۲.۲. خرده پلاستیک (مسلح کننده)

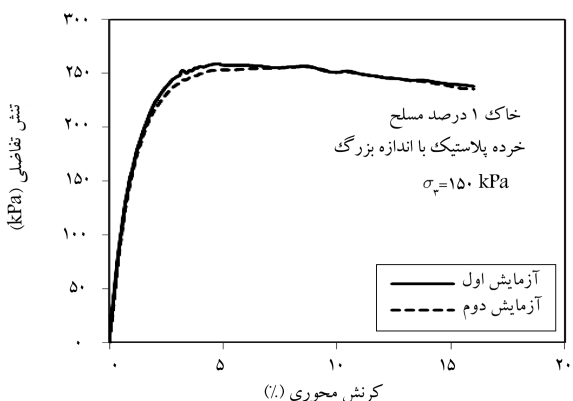
خرده پلاستیک ضایعاتی مورد استفاده در این آزمایش ها از بطری های پلاستیکی (آب معدنی و...) توسط یکی از کارگاه های تولید خرده های PET در دو اندازه ی بزرگ (عرض ۱۲-۱۰ و طول ۱۵-۱۳ میلی متر) و کوچک (عرض ۳-۲ و طول ۴-۵ میلی متر) تهیه شده اند. شکل ۳، تصویری از بطری های مورد نظر و دو نوع خرده پلاستیک مورد نظر را نشان می دهد. خرده پلاستیک ها، وزن مخصوص ۱۴ کیلو نیوتن بر متر مکعب و مقاومت کششی حدود ۴۶-۶۰ مگاپاسکال دارند. در این نوشتار جهت اختصار، خرده های پلاستیک، مسلح کننده نامیده می شوند.

۳. نحوه ی آماده سازی نمونه ها

کلیه ی آزمایش ها روی نمونه های غیر مسلح و مسلح (مخلوط خاک با خرده پلاستیک) با وزن مخصوص کل ۱۷/۴ کیلو نیوتن بر متر مکعب و درصد رطوبت ۱۰٪ انجام شده اند. در تمامی آزمایش ها اعم از آزمایش سه محوری یا CBR نمونه (مخلوط خاک و خرده پلاستیک یا خاک تنها) در چگالی مورد نظر و در ۶ لایه آماده شده است. به این منظور پس از اختلاط خاک و آب، مخلوط حاصل به ۶ قسمت با وزن مساوی تقسیم شده است. هم چنین در نمونه های مسلح، میزان خرده پلاستیک لازم نیز به ۶ قسمت هم وزن تقسیم و به هر بخش از مخلوط خاک و آب اضافه شده

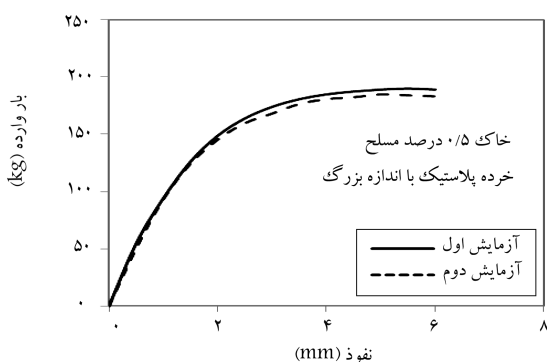


الف) نمونه ی غیر مسلح تحت فشار همه جانبه ی ۵۰ kPa؛

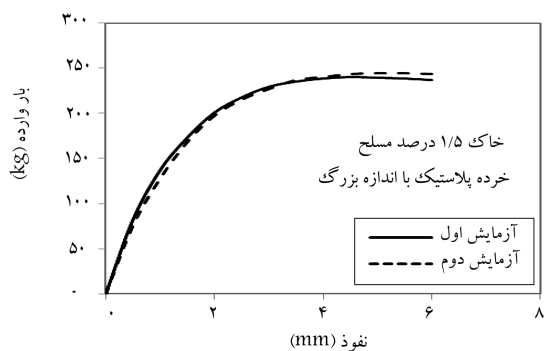


ب) نمونه ی مسلح با ۱٪ خرده پلاستیک با اندازه ی بزرگ، تحت فشار همه جانبه ی ۱۰۰ kPa.

شکل ۶. تکرار پذیری تغییرات تنش انحرافی - کرنش محوری.



الف) ۰/۵ درصد خرده پلاستیک؛



ب) با ۱/۵ درصد خرده پلاستیک.

شکل ۷. تکرار پذیری منحنی بار - نفوذ در آزمایش CBR برای نمونه ی مسلح.

آزمایش های CBR بر روی نمونه هایی از ماسه ی تنها و ماسه ی مسلح با خرده پلاستیک با اندازه ی بزرگ در مقادیر ۰/۵، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی خرده پلاستیک در مخلوط با خاک مطابق ASTM D ۱۸۸۳-۰۷^[۲۲] انجام شده اند. قطر داخلی قالب CBR برابر ۱۵/۲ سانتی متر، ارتفاع آن ۱۱/۶ سانتی متر و قطر سنبه ی نفوذ نیز برابر ۵ سانتی متر بوده است. دوعدد وزنه ی حلقوی ۲ کیلوگرمی جهت شبیه سازی وزن لایه ی سربار بر روی خاک (بر اساس استاندارد آزمایش CBR) روی نمونه قرار داده شده و نمونه ها پس از آماده سازی در داخل قالب ها با چگالی مورد نظر، در دستگاه CBR با نرخ اعمال بار ۱/۲۷ میلی متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۵. نتایج

۵.۱. تکرار پذیری نتایج

از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرار پذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم آزمایش، اندازه گیری مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی و دقت در آماده سازی نمونه های آزمایش است. از این رو تعدادی آزمایش جهت کنترل صحت آزمایش ها و تکرار پذیری آنها صورت گرفته است. شکل ۶، نتایج آزمایش های سه محوری تکراری را به صورت تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری نمونه ها در حالت های غیرمسلح و مسلح با خرده پلاستیک و شکل ۷، تغییرات بار - نفوذ برای نمونه های مسلح با ۰/۵ و ۱/۵ درصد خرده پلاستیک حاصل از آزمایش های CBR تکراری را ارائه می کنند. این شکل ها نشان می دهند که اختلاف نتایج حاصل از دو آزمایش در شرایط کاملاً یکسان، بیشینه ی ۲/۵٪ است؛ که این اختلاف در محدوده ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است. این امر بیانگر دقت مناسب در آماده سازی نمونه ها، یکنواختی نمونه ها، پخش یکنواخت خرده های پلاستیک در مخلوط، اندازه ی مناسب خرده های پلاستیک (حذف اثر سایز آنها)، انجام صحیح روند آزمایش ها و دقت در اندازه گیری هاست.

۵.۲. نتایج آزمایش های سه محوری

منحنی های تغییرات تنش تقاضایی در مقابل کرنش محوری برای نمونه های غیرمسلح و مسلح با ۰/۵، ۱/۵ و ۲ درصد خرده پلاستیک (درصد وزنی خرده پلاستیک نسبت به کل نمونه) با اندازه ی بزرگ در سه فشار همه جانبه ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال در شکل ۸ ارائه شده است.

شکل مذکور نشان می دهد که افزودن خرده پلاستیک به خاک، صرف نظر از میزان فشار همه جانبه سبب افزایش مقاومت نمونه ی مسلح در مقایسه با نمونه ی غیرمسلح می شود. این افزایش در مقاومت، در یک میزان فشار همه جانبه مشخص، با افزایش درصد خرده پلاستیک در نمونه قابل ملاحظه تر است.

علت افزایش مقاومت نمونه با افزایش درصد خرده پلاستیک در یک میزان فشار همه جانبه ی مشخص را می توان به ایجاد یک نوع محدود شونده ی داخلی^۳ به علت وجود المان های خرده پلاستیک نسبت داد. به عبارت دیگر، خرده پلاستیک ضمن محدود کردن تغییر شکل جانبی نمونه، موجب افزایش مقاومت برشی نمونه و در نتیجه افزایش باربری آن در مقایسه با نمونه ی غیرمسلح می شود. هم چنین مشاهده می شود صرف نظر از مقدار فشار همه جانبه، منحنی تغییرات تنش - کرنش در نمونه ی غیرمسلح و هم چنین نمونه های مسلح با ۰/۵ و ۱ درصد خرده پلاستیک، دارای نقطه ی بیشینه ی^۴ تقریباً مشخص است، اما تسلیح خاک با ۱/۵٪ خرده پلاستیک، موجب حذف نقطه ی بیشینه ی تنش می شود و رفتار نمونه را به سمت رفتاری شکل پذیرتر سوق می دهد.

نکته‌ی دیگر آن است که اگر چه در کرنش‌های کوچک (حدود زیر ۱٪) افزایشی در مقاومت نمونه‌های مسلح با خرده‌پلاستیک در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح مشاهده نمی‌شود، اما با افزایش تراز کرنش، مقاومت نمونه‌ی مسلح صرف‌نظر از میزان خرده‌پلاستیک، بیشتر از نمونه‌ی غیرمسلح می‌شود. این امر بدان معنی است که برای فعال شدن ذرات خرده‌پلاستیک مخلوط با خاک، یک کمینه‌ی میزان کرنش اولیه نیاز است؛ به طوری‌که با ایجاد کشش و تغییر طول در المان‌های خرده‌پلاستیک، درگیری و اندرکنش خرده‌پلاستیک با خاک فراهم و موجب افزایش مقاومت مخلوط خاک - خرده‌پلاستیک می‌شود.

به منظور بررسی روشن‌تر تأثیر افزایش میزان خرده‌پلاستیک در مقاومت نمونه، تغییرات پارامتر I_f مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامتر به صورت نسبت تنش انحرافی نمونه‌ی مسلح به تنش انحرافی نمونه‌ی غیرمسلح در یک میزان کرنش مشخص، مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

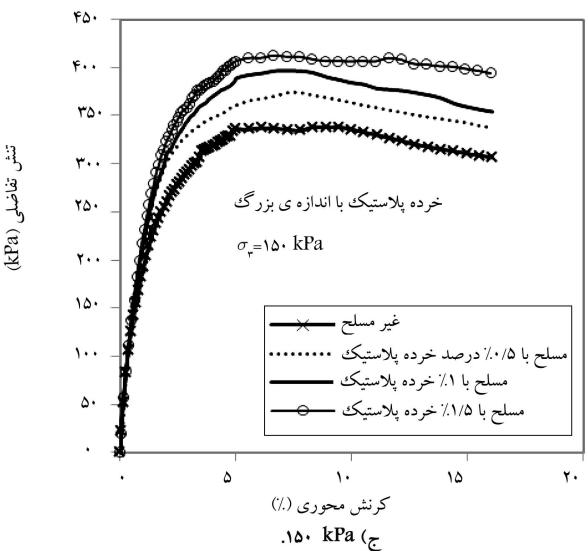
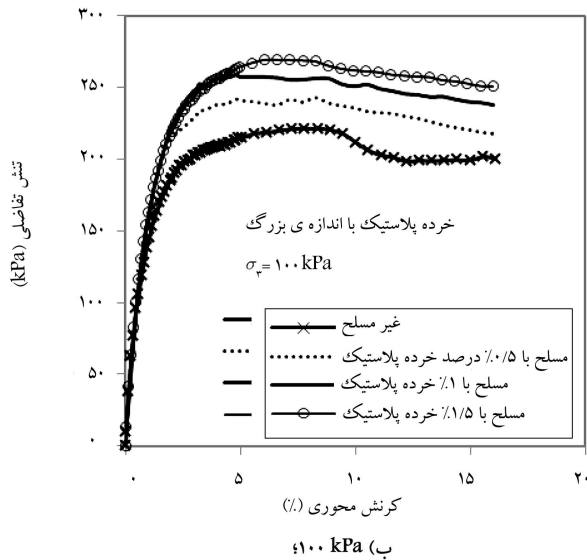
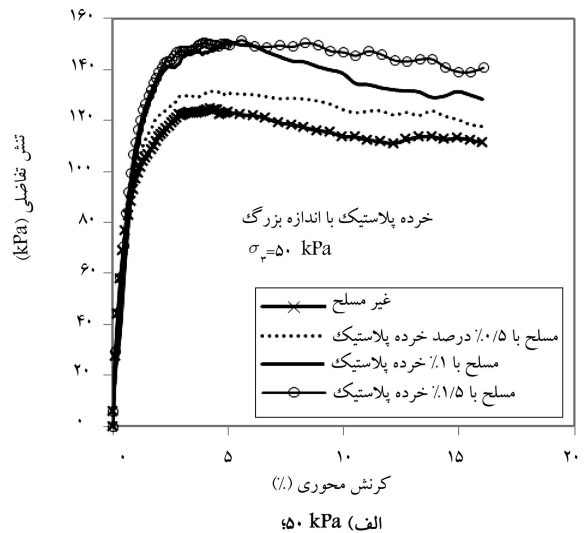
$$I_f = \frac{(\sigma_d)_{Re}}{(\sigma_d)_{Un}} = \varepsilon_i \quad (1)$$

در این رابطه، مقادیر $(\sigma_d)_{Re}$ و $(\sigma_d)_{Un}$ به ترتیب تنش انحرافی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در تراز کرنش ε_i و پارامتر I_f ، فاکتور بهبود^۵ در تراز کرنش مذکور هستند. منحنی تغییرات I_f در مقابل درصد خرده‌پلاستیک در ترازهای کرنش $\sigma = ۲, ۶, ۱۲$ درصد و برای سه فشار همه‌جانبه‌ی $۵۰, ۱۰۰$ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۹ ارائه شده است.

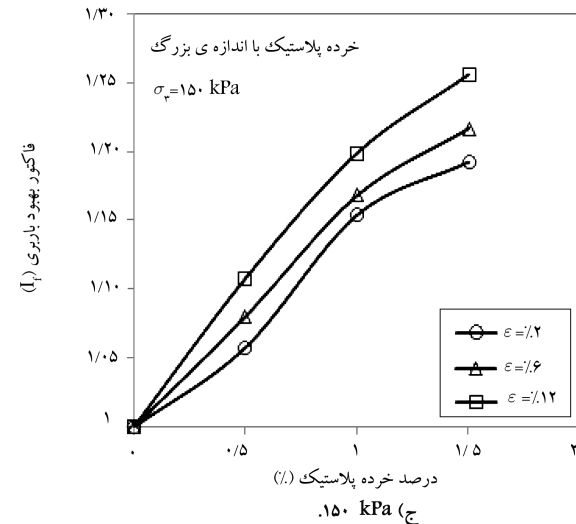
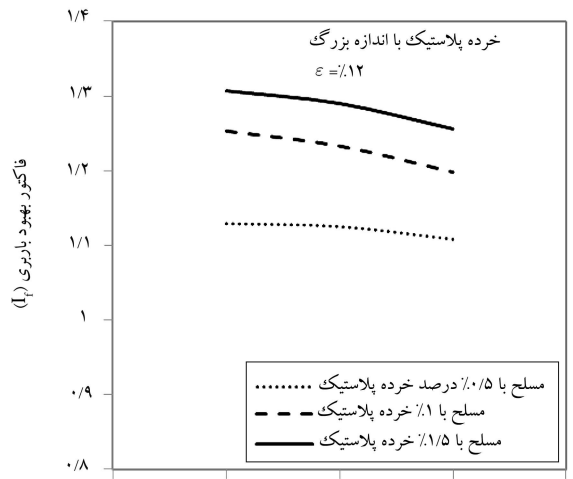
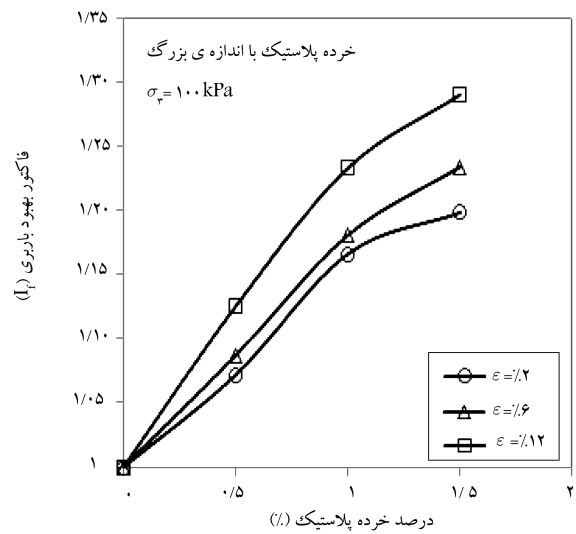
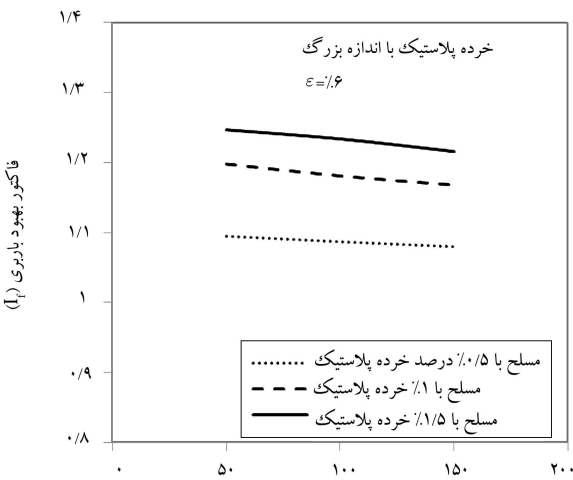
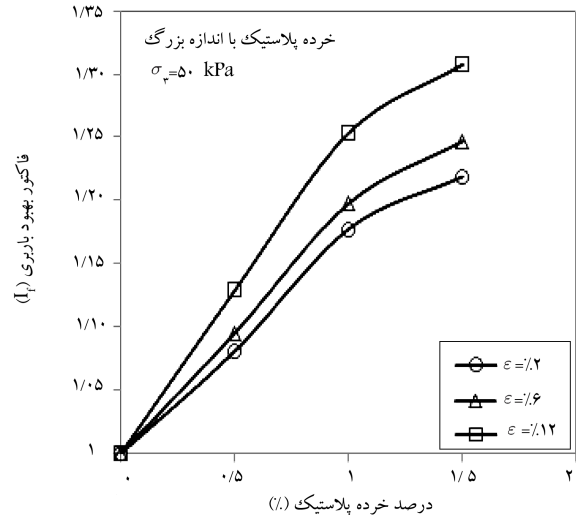
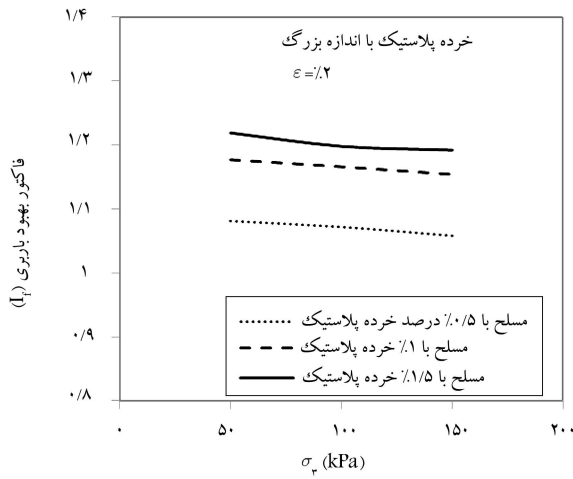
شکل مذکور نشان می‌دهد که صرف‌نظر از فشار همه‌جانبه، مقدار I_f با افزایش درصد خرده‌پلاستیک افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به افزایش مقاومت برشی نمونه به علت توزیع و حضور بیشتر خرده‌پلاستیک در کل نمونه و افزایش عملکرد کششی آن‌ها در نمونه نسبت داد. هم‌چنین ملاحظه می‌شود که با افزایش تراز کرنش وارد بر نمونه، میزان بهبود در باربری افزایش می‌یابد. این امر نیز مبین به کارافتادن بهتر مقاومت کششی باریکه‌های خرده‌پلاستیک به دلیل تغییر طول و افزایش کرنش آن‌ها و در نهایت، بالارفتن مقاومت برشی در نمونه است.

هم‌چنین ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد خرده‌پلاستیک، نرخ بهبود در باربری (افزایش در I_f) مخلوط خرده‌پلاستیک و خاک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ کیلوپاسکال و تراز کرنش ۶% ، با افزایش درصد خرده‌پلاستیک از $۰/۵$ به ۱ درصد، فقط حدود ۴% بهبود در باربری رخ می‌دهد. اگرچه تهیه‌ی نمونه‌ی سه‌محوری با میزان بیشتر خرده‌پلاستیک مقدور نشده است، اما با روند اخیر (کاهش نرخ بهبود در باربری با افزایش درصد خرده‌پلاستیک) انتظار می‌رود که از یک طرف افزایش خرده‌پلاستیک به بیش از $۱/۵\%$ موجب افزایش قابل توجه در مقدار I_f نشود و از طرف دیگر افزایش بیش از حد خرده‌پلاستیک به نمونه، به علت شکل‌پذیرتر شدن آن، موجب کاهش نرخ بهبود در باربری شود. هم‌چنین این تذکر لازم است که افزایش بیش از حد خرده‌پلاستیک می‌تواند رفتار نمونه را از حالت ایده‌آل مخلوط خرده‌پلاستیک - خاک به سمت رفتار غالب خرده‌پلاستیک (رفتار نرم و بسیار شکل‌پذیر) سوق دهد و در نهایت، موجب کاهش باربری نمونه در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح شود.

به منظور بررسی اثر فشار همه‌جانبه در مقاومت نمونه‌های سه‌محوری، تغییرات ضریب بهبود (I_f) در مقابل فشار همه‌جانبه برای نمونه‌های مسلح با $۰/۵, ۱$ و $۱/۵$ درصد خرده‌پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ در ترازهای کرنش $۲, ۶$ و ۱۲ درصد در شکل ۱۰ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش فشار همه‌جانبه، ضریب بهبود مقاومت (I_f) کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، صرف‌نظر از تراز کرنش،

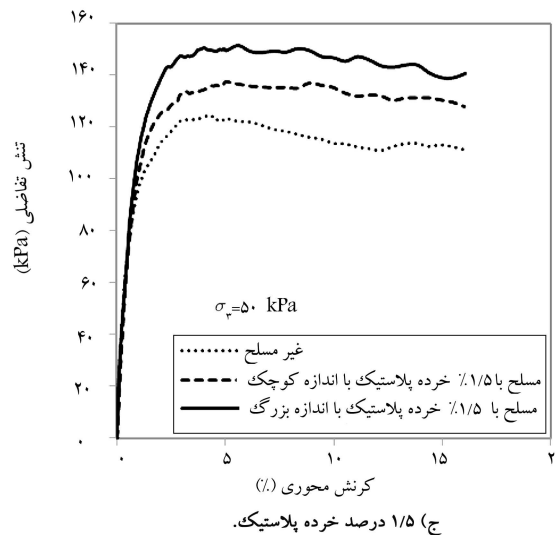
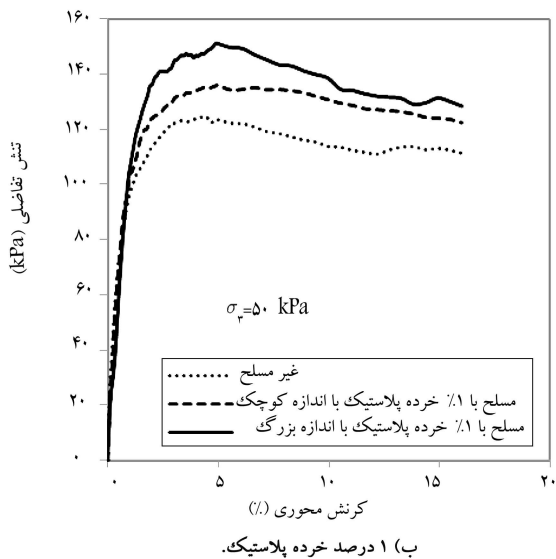
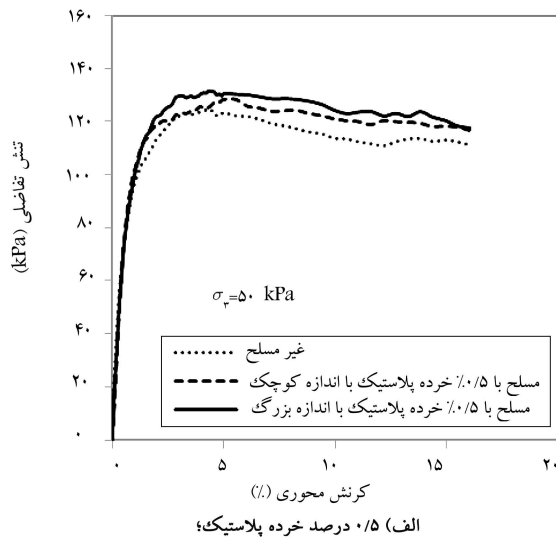


شکل ۸. منحنی تغییرات تنش انحرافی - کرنش محوری برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با درصد‌های مختلف خرده‌پلاستیک تحت فشار همه‌جانبه‌ی.



شکل ۱۰. منحنی تغییرات تنش انحرافی - کرنش نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با دو اندازه‌ی کوچک و بزرگ خرده پلاستیک، تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ کیلو پاسکال - نمونه‌ی مسلح.

شکل ۹. تغییرات I_f در مقابل درصد خرده پلاستیک در ترازهای کرنش ۲، ۶ و ۱۲ درصد تحت فشار همه‌جانبه‌ی.



شکل ۱۱. منحنی تغییرات تنش انحرافی - کرنش نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با دو اندازه‌ی کوچک و بزرگ خرد پلاستیک، تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ کیلوپاسکال - نمونه‌ی مسلح.

تسلیح با خرد پلاستیک در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین‌تر، موجب بهبود بیشتری در مقاومت نمونه می‌شود. این امر را می‌توان به این موضوع نسبت داد که مقاومت نمونه‌ی غیرمسلح، فقط ناشی از وجود فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه است؛ درحالی‌که در نمونه‌ی مسلح، عامل افزایش در مقاومت علاوه بر وجود فشار همه‌جانبه‌ی خارجی (σ_3)، محدودکنندگی داخلی ناشی از حضور باریکه‌های خرد پلاستیک نیز است. از آنجا که با افزایش فشار همه‌جانبه، اندرکنش بین ذرات خرد پلاستیک و خاک کاهش می‌یابد، لذا اثر فشار همه‌جانبه (محدودکنندگی خارجی) موجب کاهش تأثیر خرد پلاستیک می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد تسلیح لایه‌های فوقانی بستر، که تحت اثر فشار همه‌جانبه‌ی کمتری قرار دارند، اهمیت بالاتری نسبت به تسلیح لایه‌های تحتانی بستر داشته باشند.

جهت بررسی اثر اندازه‌ی خرد پلاستیک، شکل ۱۱ ارائه شده است. این شکل منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی مسلح با دو اندازه‌ی خرد پلاستیک کوچک (عرض ۲-۳ میلی‌متر و طول ۴-۵ میلی‌متر) و بزرگ (عرض ۱۲-۱۰ میلی‌متر و طول ۱۳-۱۵ میلی‌متر) را در سه فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند کلی منحنی تنش - کرنش برای خاک مسلح با هر دو اندازه‌ی خرد پلاستیک یکسان است، اما مقایسه‌ی کلی این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در تمامی درصدهای خرد پلاستیک و فشارهای همه‌جانبه، تسلیح نمونه با خرد پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ پاسخ مقاومتی بهتری نسبت به تسلیح نمونه با خردهای کوچک می‌دهد. به عبارت دیگر، افزایش مقاومت در ماسه‌ی مسلح با خردهای پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ بیشتر است. این امر مبین امکان افزایش احتمالی مقاومت نمونه با افزایش اندازه‌ی خرد پلاستیک (با اندازه‌ی بزرگ‌تر خرد پلاستیک مورد استفاده در آزمایش‌ها) است، که متأسفانه این امر به علت کوچک بودن اندازه‌ی نمونه‌ی سه‌محوری و هم‌چنین اندازه‌ی ذرات خاک مورد بررسی مقدر نشده است. به هر حال دلیل افزایش مقاومت نمونه با افزایش اندازه‌ی تراشه‌ی خرد پلاستیک را می‌توان به افزایش گیرداری تراشه‌ها با خاک و اندرکنش مناسب‌تر خاک و خرد پلاستیک و افزایش امکان ایجاد نیروی کششی در خرد پلاستیک (عملکرد تسلیح) نسبت داد. در هر صورت این امر مؤید نیاز به پژوهش‌ها و مطالعات گسترده‌تر در زمینه‌ی تسلیح خاک با خرد پلاستیک در اندازه‌های مختلف در مطالعات آبی است.

۳.۵. نتایج آزمایش‌های CBR

با توجه به اینکه نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مبین تأثیر بیشتر خرد پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ در بهبود رفتار خاک است، لذا آزمایش‌های CBR فقط بر روی مخلوط خاک - خرد پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ انجام شده است. شکل ۱۲، منحنی بار - نفوذ نمونه‌ی غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد خرد پلاستیک را در آزمایش CBR نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که: اولاً، با افزایش میزان نفوذ سنبه به داخل نمونه، میزان مقاومت آن افزایش می‌یابد؛ و ثانیاً، با افزایش درصد خرد پلاستیک در نمونه، میزان مقاومت نمونه در یک میزان نفوذ مشخص افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی بهتر تأثیر خرد پلاستیک در مخلوط با خاک در نتایج آزمایش CBR، مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنبه به میزان ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در جدول ۱ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که عدد CBR با افزایش درصد خرد پلاستیک نمونه در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح افزایش می‌یابد، به طوری که برای مخلوط با ۰/۵٪ و ۲٪ خرد پلاستیک، مقادیر

مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح می‌شود. این افزایش در مقاومت، با افزایش درصد خرده پلاستیک و هم‌چنین میزان کرنش اعمال شده بر نمونه، قابل ملاحظه‌تر است.

- منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی غیرمسلح و هم‌چنین نمونه‌های مسلح با ۰/۵ و ۱ درصد خرده پلاستیک، دارای نقطه‌ی بیشینه تقریباً مشخص است. تسلیح خاک با ۱/۵٪ خرده پلاستیک، رفتار نمونه را به سمت رفتاری انعطاف پذیرتر سوق می‌دهد، به طوری که نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش ملاحظه نمی‌شود.
- صرف نظر از فشار همه‌جانبه، با افزایش درصد خرده پلاستیک موجود در مخلوط، مقدار ضریب بهبود مقاومت (I_f) افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش تراز کرنش وارده بر نمونه، میزان بهبود در باربری افزایش می‌یابد. این امر مبین به کارافتادن بهتر باریکه‌های خرده پلاستیک به دلیل بروز کرنش و بالارفتن نیروی کششی در آن‌هاست.

- با افزایش درصد خرده پلاستیک، نرخ بهبود در باربری (افزایش در I_f) کاهش می‌یابد، لذا این انتظار وجود دارد که افزایش درصد خرده پلاستیک از یک میزان بیشتر، تأثیری در بهبود رفتار نمونه نداشته باشد یا حتی موجب کاهش مقاومت نمونه شود.

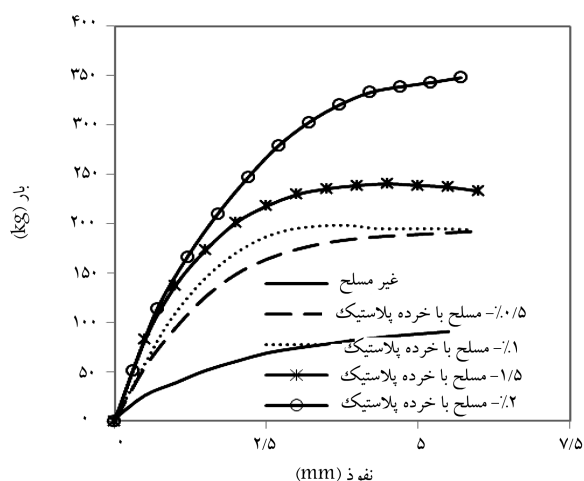
- علی‌رغم افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با افزایش فشار همه‌جانبه، ضریب بهبود مقاومت (I_f) با افزایش فشار همه‌جانبه کاهش می‌یابد. این امر بیان می‌کند صرف نظر از تراز کرنش، تسلیح با خرده پلاستیک در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین‌تر، موجب بهبود بیشتری در مقاومت نمونه می‌شود.

- تسلیح ماسه با خرده پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ پاسخ مقاومتی بهتری نسبت به تسلیح این خاک با خرده‌های کوچک ارائه می‌دهد.

۲. آزمایش‌های CBR:

- افزودن خرده پلاستیک به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه و عدد CBR می‌شود.
- با افزایش درصد خرده پلاستیک در نمونه، میزان مقاومت صرف نظر از میزان نفوذ در حال افزایش است.
- با افزایش میزان نفوذ سنبه به داخل نمونه، میزان مقاومت آن افزایش می‌یابد. این امر مبین نیاز به ایجاد نشست در نمونه برای به کارافتادن مقاومت کششی خرده پلاستیک در مخلوط با خاک است.
- عدد CBR با افزایش درصد خرده پلاستیک در نمونه در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح افزایش می‌یابد، به طوری که برای مخلوط با ۰/۵٪ و ۲٪ خرده پلاستیک، مقادیر CBR به ترتیب حدود ۲ و ۴ برابر مقادیر متناظر آن برای نمونه‌ی خاک تنها شده است.
- مقدار CBR برای میزان نفوذ ۲/۵ میلی‌متر، بیشتر از مقدار متناظر آن در میزان ۵ میلی‌متر نفوذ است.

اگر چه با توجه به مقاومت کششی مناسب خرده پلاستیک در مقایسه با خاک، بهبود رفتار خاک مورد انتظار است، اما به هر حال نتایج حاصل منجر به شناخت جنبه‌های بیشتری از رفتار مخلوط خاک خرده پلاستیک شده است. هم‌چنین مانند هر مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگر، به علت ناهمگنی احتمالی مخلوط در یک پروژه‌ی واقعی، باید از نتایج آزمایش در عمل، به خصوص از نظر کمی، با دقت و احتیاط استفاده شود.



شکل ۱۲. منحنی بار - نفوذ ماسه‌ی غیرمسلح و مسلح با خرده‌های پلاستیک.

جدول ۱. مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنبه به میزان ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح.

خرده پلاستیک (%)	CBR(۲,۵mm) (%)	CBR(۵mm) (%)
۰	۵	۴,۲۶
۰/۵	۱۱,۸	۹,۱
۱	۱۳,۲	۹,۴
۱/۵	۱۵,۸	۱۱,۵
۲	۱۹,۳	۱۶,۵

CBR به ترتیب حدود ۲ و ۴ برابر مقادیر متناظر آن برای نمونه‌ی خاک تنها شده است. این تذکر لازم است که اگرچه مقادیر CBR حتی برای ۱/۵٪ خرده پلاستیک در مخلوط با خاک کمتر از حدود ۱۵٪ است، اما برای ۲٪ خرده پلاستیک مقدار CBR به حدود ۲۵٪ رسیده است. هم‌چنین ملاحظه می‌شود که مقدار CBR برای میزان نفوذ ۲/۵ میلی‌متر، بیشتر از مقدار متناظر آن در میزان ۵ میلی‌متر نفوذ است. علت افزایش CBR با افزایش خرده پلاستیک را می‌توان به افزایش مقاومت برشی مخلوط نسبت داد. به عبارتی، وجود خرده پلاستیک در مخلوط با خاک ضمن محدود کردن حرکت جانبی (کرنش جانبی) توده‌ی مخلوط در زیر فشار سنبه‌ی آزمایش، موجب افزایش مقاومت در مقابل نفوذ سنبه می‌شود. این موضوع مبین آن است که استفاده از درصد مناسب خرده پلاستیک مخلوط با خاک می‌تواند در احداث پی یا بستر راه مفید باشد. این تذکر لازم است که با توجه به مشکلات تهیه‌ی نمونه‌های CBR با میزان خرده پلاستیک بیشتر از ۲٪، امکان آزمایش با درصد‌های بالاتر خرده‌ها مقدور نشده است.

۶. نتیجه‌گیری

در خصوص تأثیر خرده پلاستیک در رفتار خاک ماسه‌ی با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. آزمایش‌های سه‌محوری:

- افزودن خرده پلاستیک به خاک، سبب افزایش مقاومت نمونه‌ی مسلح در

پانوشته‌ها

1. Polyethylene terephthalate
2. fiber
3. internal confinement
4. peak
5. improvement factor

منابع (References)

1. Consoli, N., Montardo, J., Prietto, P. and Pasa, G. "Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **128**(6), pp. 462-472 (2002).
2. Babu, G.L.S. and Chouksey, S.k. "Stress-strain response of plastic waste mixed soil", *Waste Management*, **31**(3), pp. 481-488 (2011).
3. Ahmed, A., Ugai, K. and Kamei, T. "Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement", *Construction and Building Materials*, **25**(1), pp. 208-217 (2011).
4. Jamejam Newspaper Quoted, Number 3672, p. 12, by Darwish, M. (22 April 2013). www.magiran.com/n2713928
5. Consoli, N.C., Heineck, K.S., Toe casagrande, M.D., "Large strain behavior of Polypropylene fiber- reinforced sandy soil", in: Soil and Rock America- 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2003).
6. Yetimoglu, T. and Salbas, O. "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(2), pp. 103-110 (2003).
7. Park, T. and Tan, S.A. "Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber", *Geotextiles and Geomembranes*, **23**(4), pp. 348-361 (2005).
8. Kumar, A., Walia, B.S. and Mohan, J. "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay", *Construction and Building Materials*, **20**(10), pp. 1063-1068 (2006).
9. Dutta, R.K. and Sarda, V.K. "CBR behaviour of waste plastic strip-reinforced stone dust/ fly ash overlying saturated clay", *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, **31**, pp. 171-182 (2007).
10. Tang et al. "Strength and mechanical behavior of short Polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**(3), pp. 194-202 (2007).
11. Jadhao, D. and Nagarnaik, B. "Performance evaluation of fiber reinforced soil-fly ash mixtures", In: 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India (1-6 October 2008)
12. Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Rosa, F.D. "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(3), pp. 196-203 (2009).
13. De Mello, D., Pezzin, S.H. and Amico, S.C. "The effect of post-consumer PET particles on the performance of flexible polyurethane foams", *Polym. Test*, **28**(7), pp. 702-708 (2009).
14. Park, S.S. "Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 162-166 (2009).
15. Consoli, N.C., Bassan, M.A.A. and Festugato, L. "Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(4), pp. 344-351 (2010).
16. Liu, J., Wang, G., Kamai, T., Zhang, F., Yang, J. and Shi, B. "Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests", *Geotextiles and Geomembranes*, **29**, pp. 462-471 (2011).
17. Maheshwari, K.V., Desai, A.K. and Solanki, C.H. "Performance of fiber reinforced clayey soil", *EJGE*, **16**, pp. 1067-1087 (2011).
18. Park, S.S. "Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 1134-1138 (2011).
19. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S. "Design of highway embankments using tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE*, **123**(4), pp. 295-304 (1997).
20. ASTM D 2487-11, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing and Materials.
21. ASTM D2850- 03, *Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test*, American Society for Testing and Materials.
22. ASTM D1883- 07, *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*, American Society for Testing and Materials.