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

Original Article

بررسی رفتار مخلوط خاک و خرده‌پلاستیک با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری و CBR

ام‌لیلا نجف‌زاده شوکی (کارشناس ارشد)
سید ناصر مقدس تفرشی * (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

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

واژگان کلیدی: خاک، خرده‌پلاستیک، آزمایش‌های سه‌محوری، آزمایش CBR، مقاومت، کرنش.

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

۱. مقدمه

طی چند سال اخیر، مسائل زیست‌محیطی 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 پایدارشده یا تسلیح‌شده، 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 [1] است.[1] این مصالح به طور فراوان و گسترده توسط بشر در طبیعت رها می‌شوند و یا غالباً در محل‌هایی ذخیره و دور ریخته می‌شوند.[2] به طورکلی ماده‌ی اولیه‌ی بیشتر ظرف‌های پلاستیکی از نوع پلی استر است. از آنجا که تهیه ماده‌ی خام جهت تولید ظروف و محصولات ساخته‌شده 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.[3] زباله‌های پلاستیکی وقتی با خاک مخلوط می‌شوند، در راه‌ها و خاکریزها، ضمن بهبود پاسخ و رفتار خاک موجب کاهش مصرف خاک مناسب قرضه‌ها به‌عنوان 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 زیست‌محیطی و دفن آن‌ها؛ ۳. کاهش هزینه‌های مربوط به تهیه‌ی مسلح‌کننده‌های دیگر نظیر: ژئوتکستایل، ژئوگرید و ژئوسل جهت تسلیح خاک؛ ۴. بالابردن 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.[4] 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 پودرشدن احتمالی یا به شکل الیاف درآمدن خرده‌های پلاستیک مخلوط با خاک همچنان خاصیت مقاومتی در مخلوط با خاک دارد.[5-7]

اگر چه در دهه‌های اخیر مطالعات و پژوهش‌های نسبتاً زیادی در رابطه با تسلیح خاک با پلاستیک ضایعاتی به‌صورت الیاف[2] توسط پژوهشگران مختلف

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۴/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۶.

Archive of SID
www.SID.ir

انجام شده‌است،[۱و۵-۱۸] 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.[۲و۳] استفاده از خرده‌های پلاستیک به جای الیاف، آن‌ها را بی‌نیاز از فرآیند تبدیل ضایعات بطری‌های پلاستیکی به الیاف در کارخانه می‌کند، به طوری‌که 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 مسلح‌شده 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 نیزکاهش مقادیر نشانه‌های تورم و فشردگی با افزایش میزان خرده‌پلاستیک نمونه‌ها را نشان داده‌اند. هم‌چنین 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 محدودنشده، 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 هم‌چنین 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 خرده‌لاستیک 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.[۲و۳] از این رو به منظور توسعه‌ی مطالعات پژوهشگرانی نظیر بابو و چاکسی،[۲] یک سری آزمایش سه محوری با اندازه‌ی بزرگ‌تر نمونه، درصد بیشتر خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک، دو اندازه از خرده‌های پلاستیک و هم‌چنین تعدادی آزمایش ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) روی خاک تنها و مخلوط خاک ـ خرده‌پلاستیک انجام شده است. بدین لحاظ در این نوشتار برای توسعه و شناخت بیشتر رفتار مخلوط خاک ـ 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 ـ کرنش خاک؛
- درصد خرده‌های پلاستیک در بهبود رفتار تنش ـ کرنش خاک؛
- تنش همه‌جانبه بر رفتار نمونه‌ی خاک تنها و نمونه‌ی مخلوط خاک ـ خرده‌پلاستیک.

و هم‌چنین در آزمایش ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) بررسی اثر میزان خرده‌پلاستیک در بهبود CBR نمونه‌ی مسلح در مقایسه با خاک غیرمسلح مدنظر است.

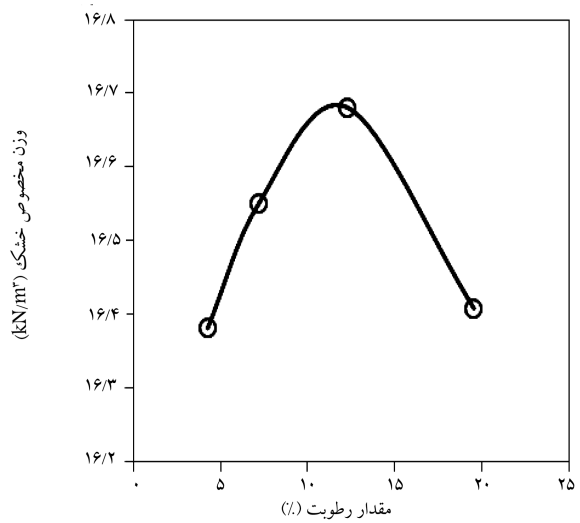
۲. مصالح مصرفی

۱.۲. خاک

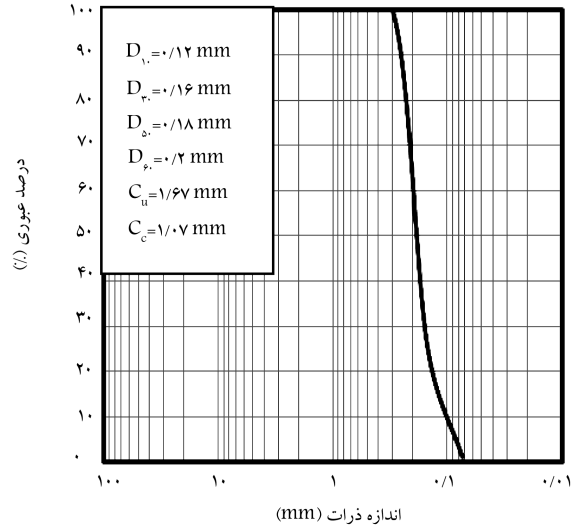
خاک مورد استفاده در کلیه‌ی آزمایش‌ها، ماسه‌ی ساحل شهرستان رودسر واقع در کرانه‌ی جنوبی دریای مازندران است. با توجه به آزمایش تراکم اصلاح‌شده روی نمونه ماسه‌ی موردنظر (شکل ۱) مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک برابر ۱۶٫۷ کیلونیوتن بر مترمکعب و میزان رطوبت بهینه‌ی آن حدود ۱۱٫۵٪ هستند. هم‌چنین کمینه‌ی وزن مخصوص خشک ۱۴٫۸ کیلونیوتن 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 به‌صورت 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.

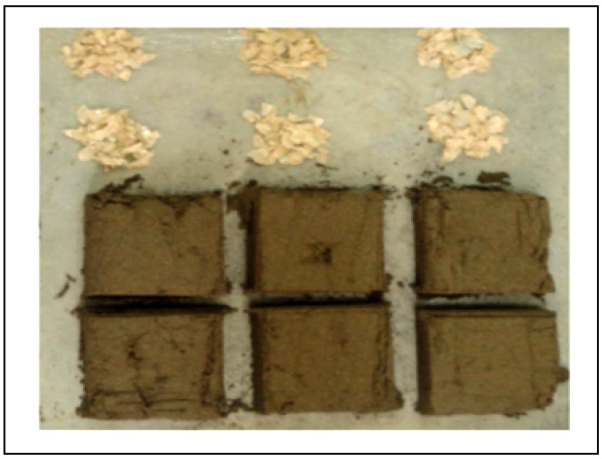
Archive of SID
www.SID.ir

الف) بطری های مورد نظر؛

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

شکل ۳. تصویری از بطری‌ها و خرده پلاستیک‌های مورد استفاده.

شکل ۴. مخلوط خاک و خرده‌پلاستیک.



شکل ۵. تقسیم خاک و خرده‌پلاستیک به ۶ قسمت مساوی.

۲.۲. خرده‌پلاستیک (مسلح‌کننده)

خرده‌پلاستیک ضایعاتی مورد استفاده در این آزمایش‌ها از بطری‌های پلاستیکی (آب معدنی و...) توسط یکی از کارگاه‌های تولید خرده‌های PET در دو اندازه‌ی بزرگ (عرض ۱۲-۱۰ و طول ۱۵-۱۳ میلی‌متر) و کوچک (عرض ۳-۲ و طول ۵-۴ میلی‌متر) تهیه شده‌اند. شکل ۳، تصویری از بطری‌های موردنظر و دو نوع خرده‌پلاستیک موردنظر را نشان می‌دهد. خرده‌پلاستیک‌ها، وزن مخصوص ۱۴ کیلونیوتن بر مترمکعب و مقاومت کششی حدود ۶۰-۴۶ مگاپاسکال دارند. در این نوشتار جهت اختصار، خرده‌های پلاستیک، مسلح‌کننده نامیده می‌شوند.

۳. نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها

کلیه‌ی آزمایش‌ها روی نمونه‌های غیرمسلح و مسلح (مخلوط خاک با خرده‌پلاستیک) با وزن مخصوص کل ۱۷٫۴ کیلونیوتن بر مترمکعب و درصد رطوبت ۱۰٪ انجام شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها اعم از آزمایش سه‌محوری یا CBR نمونه (مخلوط خاک و خرده‌پلاستیک یا خاک تنها) در چگالی موردنظر 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. هم‌چنین در نمونه‌های مسلح، میزان خرده‌پلاستیک لازم نیز به ۶ قسمت هم وزن تقسیم و به هر بخش از مخلوط خاک و آب اضافه شده است. به منظور ایجاد توزیع مناسب خرده‌های پلاستیک در خاک، عمل اختلاط با دقت مناسب انجام شده است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تصویری از مخلوط خاک ـ خرده‌پلاستیک و نحوه‌ی تقسیم خاک و خرده‌پلاستیک را به ۶ قسمت مساوی نشان می‌دهند. در پروژه‌های عملی، با توجه به حجم زیاد مخلوط در صورت اختلاط کافی و مناسب خاک و خرده‌پلاستیک، دستیابی به مخلوط یکنواخت با عملکرد مناسب دور از انتظار نخواهد بود.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

همان‌طورکه قبلاً بیان شد، آزمایش‌های موردنظر روی مخلوط خاک ـ خرده‌پلاستیک و خاک تنها شامل آزمایش‌های سه‌محوری و CBR هستند. آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌هایی از ماسه‌ی تنها و ماسه‌ی مسلح با خرده‌پلاستیک با دو اندازه‌ی کوچک و بزرگ در مقادیر ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد وزنی خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک مطابق ASTM D۲۸۵۰-۰۳،[۲۱] انجام شدند. نمونه‌های سه‌محوری به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت سه فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و بار محوری با نرخ اعمال بار ۲ میلی‌متر بر دقیقه قرارگرفتند. این تذکر لازم است که به دلیل ابعاد کوچک نمونه و مشکل‌بودن آماده‌سازی نمونه و رسیدن به تراکم موردنظر در درصدهای خرده‌پلاستیک بالای ۱٫۵٪، از انجام آزمایش روی نمونه با درصد خرده‌پلاستیک بیش از ۱٫۵ صرف‌نظر شده است.

Archive
www.SID.ir

آزمایش‌های CBR بر روی نمونه‌هایی از ماسه‌ی تنها و ماسه‌ی مسلح با خرده‌پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ در مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک مطابق ASTM D۱۸۸۳-۰۷،[۲۲] انجام شده‌اند. قطر داخلی قالب CBR برابر ۱۵/۲ سانتی‌متر، ارتفاع آن ۱۱/۶ سانتی‌متر و قطر سنبه‌ی نفوذ نیز برابر ۵ سانتی‌متر بوده است. دوعدد وزنه‌ی حلقوی ۲ کیلوگرمی جهت شبیه‌سازی وزن لایه‌ی سربار بر روی خاک (بر اساس استاندارد آزمایش CBR) روی نمونه قرار داده شده و نمونه‌ها پس از آماده‌سازی در داخل قالب‌ها با چگالی موردنظر، در دستگاه CBR با نرخ اعمال بار ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۵. نتایج

۱.۵. تکرارپذیری نتایج

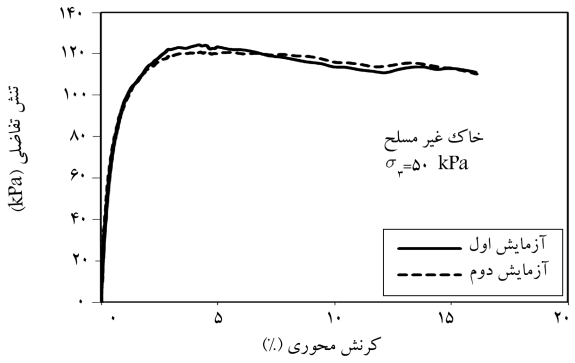
از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم آزمایش، اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی و دقت در آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش است. از این‌رو تعدادی آزمایش جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها صورت گرفته است. شکل ۶، نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تکراری را به‌صورت تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری نمونه‌ها در حالت‌های غیرمسلح و مسلح با خرده‌پلاستیک و شکل ۷، تغییرات بار ـ نفوذ برای نمونه‌های مسلح با ۰/۵ و ۱/۵ درصد خرده‌پلاستیک حاصل از آزمایش‌های CBR تکراری را ارائه می‌کنند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که اختلاف نتایج حاصل از دو آزمایش در شرایط کاملاً یکسان، بیشینه‌ی ۲/۵٪ است؛ که این اختلاف در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است. این امر بیانگر دقت مناسب در آماده‌سازی نمونه‌ها، یکنواختی نمونه‌ها، پخش یکنواخت خرده‌های پلاستیک در مخلوط، اندازه‌ی مناسب خرده‌های پلاستیک (حذف اثر سایز آن‌ها)، انجام صحیح روند آزمایش‌ها و دقت در اندازه‌گیری‌هاست.

۲.۵. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری

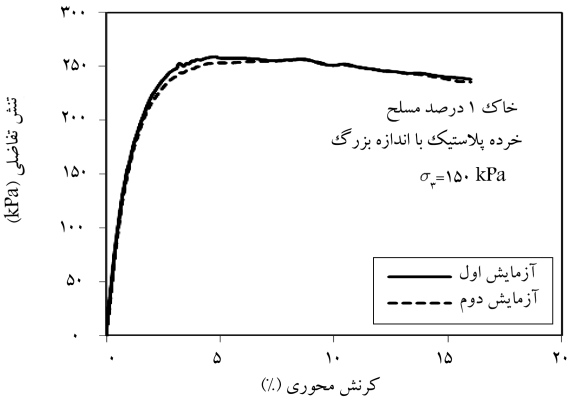
منحنی‌های تغییرات تنش تفاضلی در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد خرده‌پلاستیک (درصد وزنی خرده‌پلاستیک نسبت به کل نمونه) با اندازه‌ی بزرگ در سه فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۸ ارائه شده است.

شکل مذکور نشان می‌دهد که افزودن خرده‌پلاستیک به خاک، صرف‌نظر از میزان فشار همه‌جانبه سبب افزایش مقاومت نمونه‌ی مسلح در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح می‌شود. این افزایش در مقاومت، در یک میزان فشار همه‌جانبه‌ی مشخص، با افزایش درصد خرده‌پلاستیک در نمونه قابل ملاحظه‌تر است.

علت افزایش مقاومت نمونه با افزایش درصد خرده‌پلاستیک در یک میزان فشار همه‌جانبه‌ی مشخص را می‌توان به ایجاد یک نوع محدود شوندگی داخلی[۳] به علت وجود المان‌های خرده‌پلاستیک نسبت داد. به عبارت دیگر، خرده‌پلاستیک ضمن محدودکردن تغییرشکل جانبی نمونه، موجب افزایش مقاومت برشی نمونه و در نتیجه افزایش باربری آن در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود صرف‌نظر از مقدار فشار همه‌جانبه، منحنی تغییرات تنش ـ کرنش در نمونه‌ی غیرمسلح و هم‌چنین نمونه‌های مسلح با ۰/۵ و ۱ درصد خرده‌پلاستیک، دارای نقطه‌ی بیشینه‌ی[۴] تقریباً مشخص است، اما تسلیح خاک با ۱/۵٪ خرده‌پلاستیک، موجب حذف نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش می‌شود و رفتار نمونه را به سمت رفتاری شکل‌پذیرتر سوق می‌دهد.

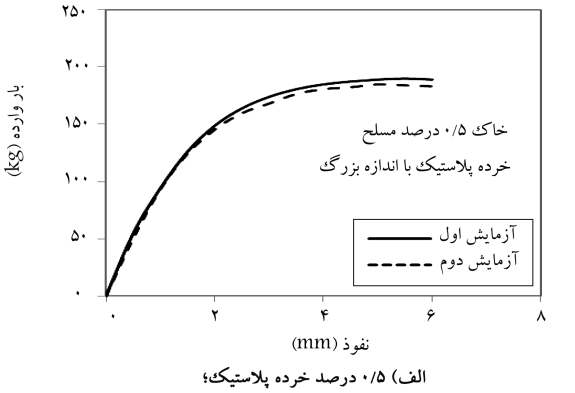


الف) نمونه ی غیر مسلح تحت فشار همه جانبه ی ۵۰ kPa ؛

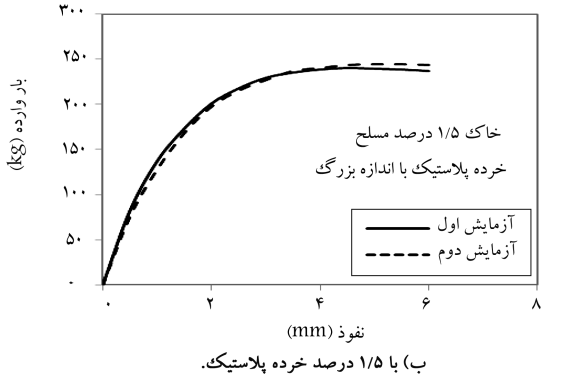


ب) نمونه ی مسلح با ۱٪ خرده پلاستیک با اندازه ی بزرگ، تحت فشار همه جانبه ی ۱۰۰ kPa.

شکل ۶. تکرارپذیری تغییرات تنش انحرافی ـ کرنش محوری.



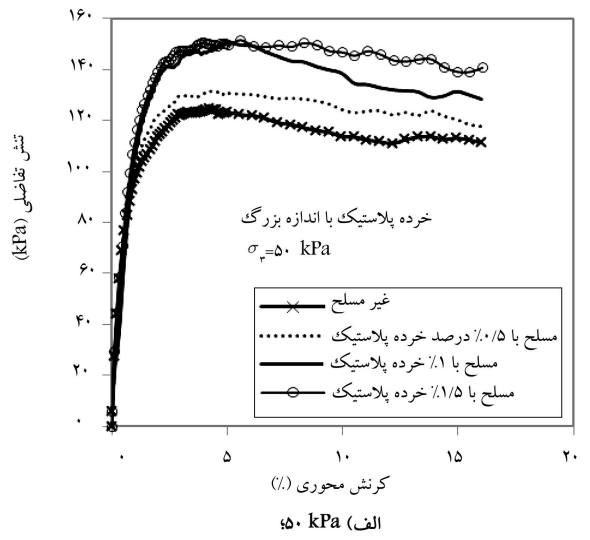
الف) ۰/۵ درصد خرده پلاستیک؛



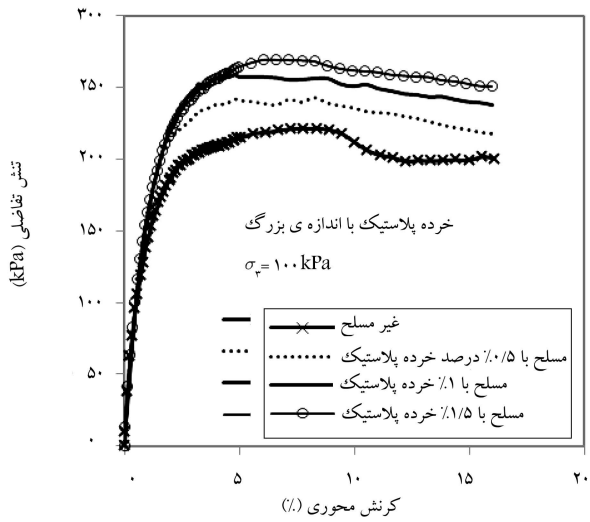
ب) با ۱/۵ درصد خرده پلاستیک.

شکل ۷. تکرارپذیری منحنی بار ـ نفوذ در آزمایش CBR برای نمونه‌ی مسلح.

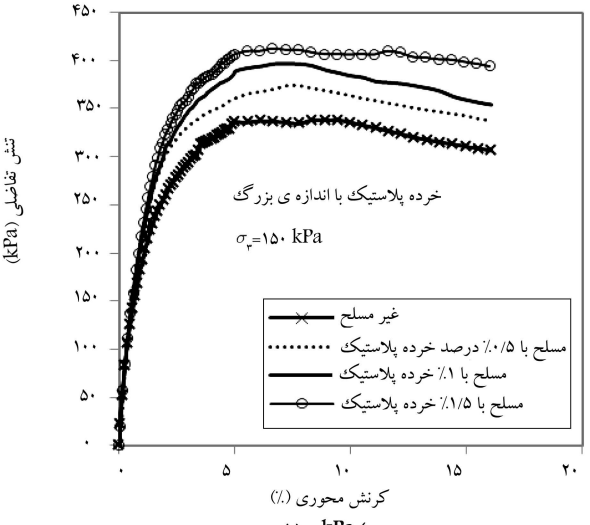
www.SID.ir



الف) ۵۰ kPa؛



ب) ۱۰۰ kPa؛



ج) ۱۵۰ kPa.

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

نکته‌ی دیگر آن است که اگر چه درکرنش‌های 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 فعال‌شدن 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 ـ خرده‌پلاستیک می‌شود.

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

$$I_f = \frac{(\sigma_d)_{Re}}{(\sigma_d)_{Un}} = \varepsilon_i \qquad (۱)$$

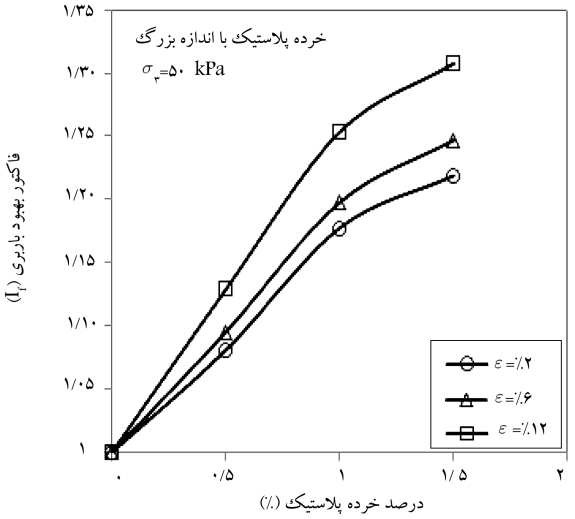
در این رابطه، مقادیر $(\sigma_d)_{Re}$ و $(\sigma_d)_{Un}$ به ترتیب تنش انحرافی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در تراز کرنش $\varepsilon = \varepsilon_i$ و پارامتر I_f، فاکتور بهبود[5] در تراز کرنش مذکور هستند. منحنی تغییرات I_f در مقابل درصد خرده‌پلاستیک در ترازهای کرنش $\sigma = ۲, ۶, ۱۲$ درصد و برای سه 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.

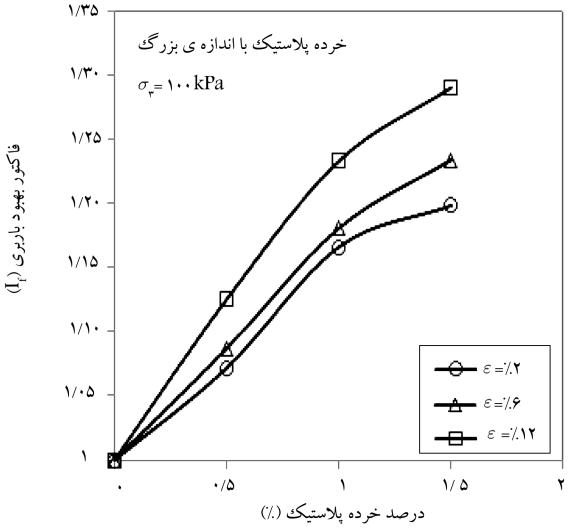
هم‌چنین ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد خرده‌پلاستیک، نرخ بهبود در باربری (افزایش در I_f) مخلوط خرده‌پلاستیک و خاک کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ کیلوپاسکال و تراز کرنش ۶٪ $= \varepsilon$، با افزایش درصد خرده‌پلاستیک از ۰/۵ به ۱ درصد، حدود ۱۰٪ بهبود باربری و با افزایش خرده‌پلاستیک از ۱ به ۱/۵ 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 ـ 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،

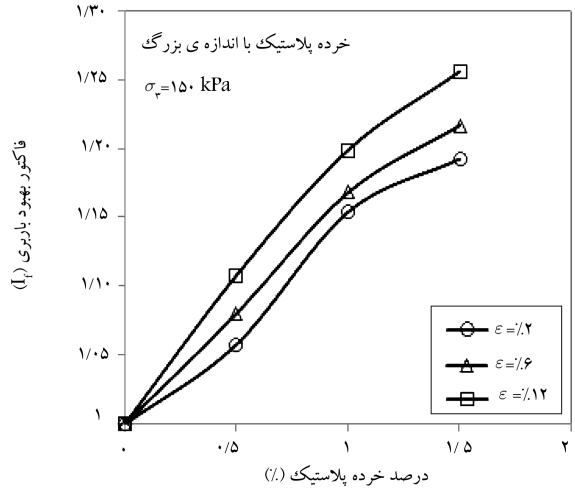
Archive of SID
www.SID.ir



الف) ۵۰ kPa؛

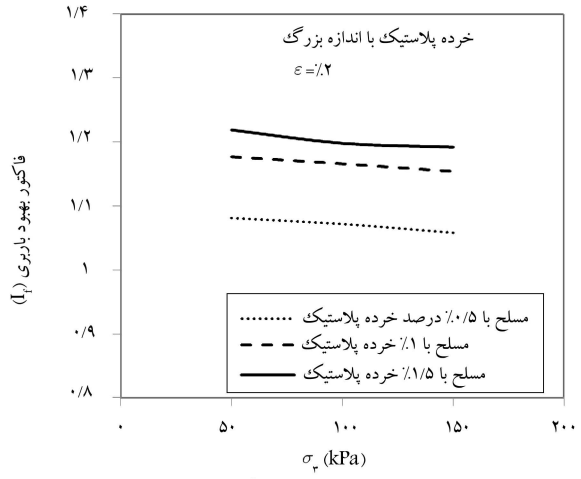


ب) ۱۰۰ kPa؛

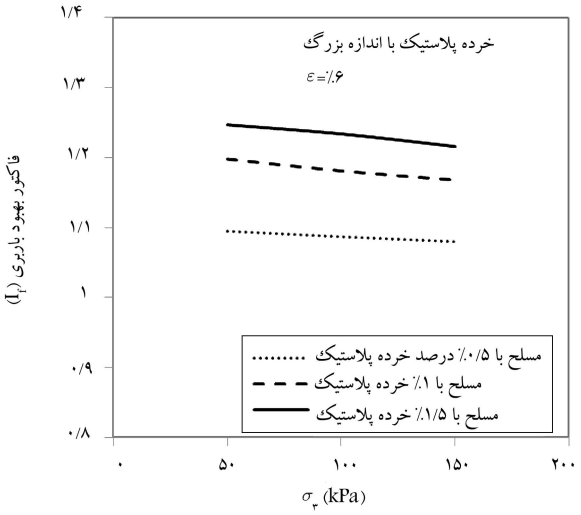


ج) ۱۵۰ kPa.

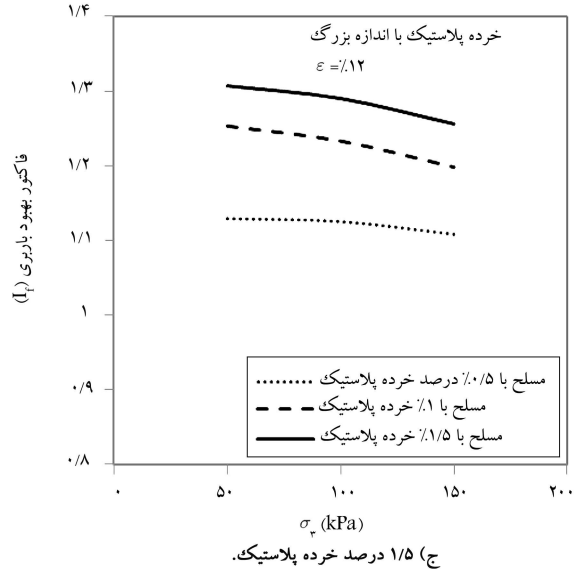
شکل ۹. تغییرات I_f در مقابل درصد خرده‌پلاستیک در تراز‌های کرنش ۲، ۶ و ۱۲ درصد تحت فشار همه‌جانبه‌ی.



الف) ۰/۵ درصد خرده پلاستیک؛



ب) ۱ درصد خرده پلاستیک.



ج) ۱/۵ درصد خرده پلاستیک.

شکل ۱۰. منحنی تغییرات تنش انحرافی ـ کرنش نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با دو اندازه‌ی کوچک و بزرگ خرده‌پلاستیک، تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ کیلوپاسکال ـ نمونه‌ی مسلح.

www.SID.ir

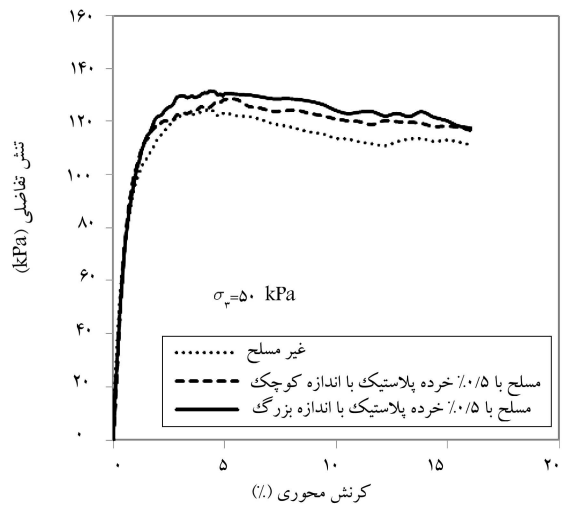
تسلیح با خرده‌پلاستیک در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین‌تر، موجب بهبود بیشتری در مقاومت نمونه می‌شود. این امر را می‌توان به این موضوع نسبت داد که مقاومت نمونه‌ی غیرمسلح، فقط ناشی از وجود فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه است؛ درحالی‌که در نمونه‌ی مسلح، عامل افزایش در مقاومت علاوه بر وجود فشار همه‌جانبه‌ی خارجی (σ_3)، محدودکنندگی داخلی ناشی از حضور باریکه‌های خرده‌پلاستیک نیز است. از آنجا که با افزایش فشار همه‌جانبه، اندرکنش بین ذرات خرده‌پلاستیک و خاک کاهش می‌یابد، لذا اثر فشار همه‌جانبه (محدودکنندگی خارجی) موجب کاهش تأثیر خرده‌پلاستیک 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 خرده‌پلاستیک، شکل ۱۱ ارائه شده است. این شکل منحنی تنش ـ کرنش نمونه‌ی مسلح با دو اندازه‌ی خرده‌پلاستیک کوچک (عرض ۳-۲ میلی‌متر و طول ۵-۴ میلی‌متر) و بزرگ (عرض ۱۲-۱۰ میلی‌متر و طول ۱۵-۱۳ میلی‌متر) را در سه فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، روند کلی منحنی تنش ـ کرنش برای خاک مسلح با هر دو اندازه‌ی خرده‌پلاستیک یکسان است، اما مقایسه‌ی کلی این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در تمامی درصدهای خرده‌پلاستیک و فشارهای همه‌جانبه، تسلیح نمونه با خرده‌پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ پاسخ مقاومتی بهتری نسبت به تسلیح نمونه با خرده‌های کوچک می‌دهد. به عبارت دیگر، افزایش مقاومت در ماسه‌ی مسلح با خرده‌های پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ بیشتر است. این امر مبین امکان افزایش احتمالی مقاومت نمونه با افزایش اندازه‌ی خرده‌پلاستیک (با اندازه‌ی بزرگ‌تر خرده‌پلاستیک مورد استفاده در آزمایش‌ها) است، که متأسفانه این امر به علت کوچک‌بودن اندازه‌ی نمونه‌ی سه‌محوری و هم‌چنین اندازه‌ی ذرات خاک مورد بررسی مقدور نشده است. به هر حال دلیل افزایش مقاومت نمونه با افزایش اندازه‌ی تراشه‌ی خرده‌پلاستیک را می‌توان به افزایش گیرداری تراشه‌ها با خاک و اندرکنش مناسب‌تر خاک و خرده‌پلاستیک و افزایش امکان ایجاد نیروی کششی در خرده‌پلاستیک (عملکرد تسلیح) نسبت داد. در هر صورت این امر مؤید نیاز به پژوهش‌ها و مطالعات گسترده‌تر در زمینه‌ی تسلیح خاک با خرده‌پلاستیک در اندازه‌های مختلف در مطالعات آتی است.

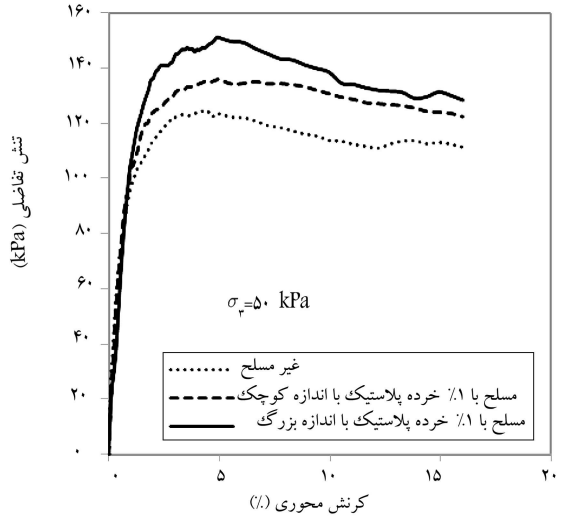
۳.۵. نتایج آزمایش‌های CBR

با توجه به اینکه نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مبین تأثیر بیشتر خرده‌پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ در بهبود رفتار خاک است، لذا آزمایش‌های CBR فقط بر روی مخلوط خاک ـ خرده‌پلاستیک با اندازه‌ی بزرگ انجام شده است. شکل ۱۲، منحنی بار ـ نفوذ نمونه‌ی غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد خرده‌پلاستیک 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 خرده‌پلاستیک در نمونه، میزان مقاومت نمونه در یک میزان نفوذ مشخص افزایش می‌یابد.

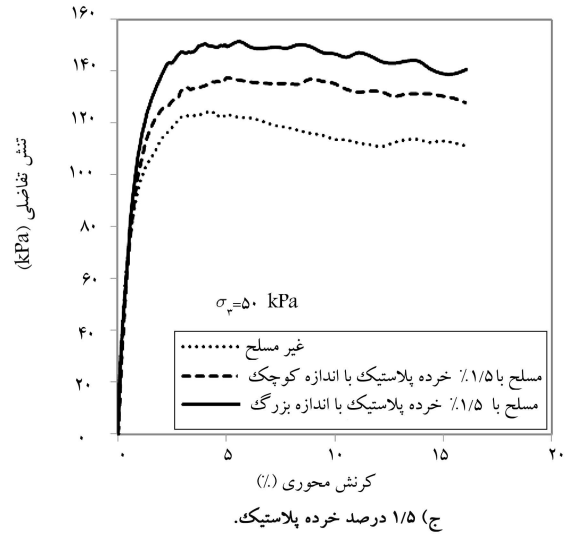
به منظور بررسی بهتر تأثیر خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک در نتایج آزمایش CBR، مقادیر CBR متناظر با نفوذ سنبه به میزان ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در جدول ۱ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که عدد CBR با افزایش درصد خرده‌پلاستیک نمونه در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح افزایش می‌یابد،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



الف) ۰/۵ درصد خرده پلاستیک؛



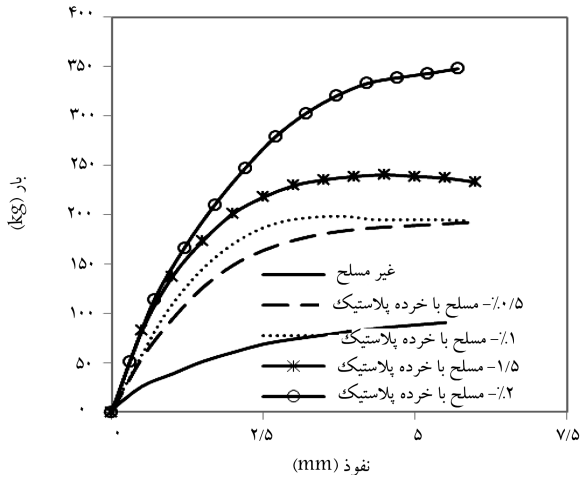
ب) ۱ درصد خرده پلاستیک.



ج) ۱/۵ درصد خرده پلاستیک.

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

www.SID.ir



شکل ۱۲. منحنی بار ـ 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.

خرده‌پلاستیک (٪)	$CBR_{(2/5mm)}$ (٪)	$CBR_{(5mm)}$ (٪)
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٪ خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک کمتر از حدود ۱۵٪ است، اما برای ۲٪ خرده‌پلاستیک مقدار CBR به حدود ۲۰٪ 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 خرده‌پلاستیک را می‌توان به افزایش مقاومت برشی مخلوط نسبت داد. به عبارتی، وجود خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک ضمن محدودکردن 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 خرده‌پلاستیک 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 خرده‌پلاستیک بیشتر از ۲٪، امکان آزمایش با درصدهای بالاتر خرده‌ها مقدور نشده است.

۶. نتیجه‌گیری

درخصوص تأثیر خرده‌پلاستیک در رفتار خاک ماسه‌یی با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. آزمایش‌های سه‌محوری:

- افزودن خرده‌پلاستیک به خاک، سبب افزایش مقاومت نمونه‌ی مسلح در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح می‌شود. این افزایش در مقاومت، با افزایش درصد خرده‌پلاستیک و هم‌چنین میزان کرنش اعمال‌شده بر نمونه، قابل ملاحظه‌تر است.
- منحنی تنش ـ کرنش نمونه‌ی غیرمسلح و هم‌چنین نمونه‌های مسلح با ۰/۵ و ۱ درصد خرده‌پلاستیک، دارای نقطه‌ی بیشینه تقریباً مشخص است. تسلیح خاک با ۱/۵٪ خرده‌پلاستیک، رفتار نمونه را به سمت رفتاری انعطاف‌پذیرتر سوق می‌دهد، به طوری‌که نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش ملاحظه نمی‌شود.
- صرف‌نظر از فشار همه‌جانبه، با افزایش درصد خرده‌پلاستیک 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 خرده‌پلاستیک به دلیل بروز کرنش و بالارفتن نیروی کششی در آن‌هاست.
- با افزایش درصد خرده‌پلاستیک، نرخ بهبود در باربری (افزایش در I_f) کاهش می‌یابد، لذا این انتظار وجود دارد که افزایش درصد خرده‌پلاستیک 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 صرف‌نظر از تراز کرنش، تسلیح با خرده‌پلاستیک در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین‌تر، موجب بهبود بیشتری در مقاومت نمونه می‌شود.
- تسلیح ماسه با خرده‌پلاستیک در اندازه‌ی بزرگ پاسخ مقاومتی بهتری نسبت به تسلیح این خاک با خرده‌های کوچک ارائه می‌دهد.

۲. آزمایش‌های CBR:

- افزودن خرده‌پلاستیک به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه و عدد CBR می‌شود.
- با افزایش درصد خرده‌پلاستیک در نمونه، میزان مقاومت صرف‌نظر 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 خرده‌پلاستیک در مخلوط با خاک است.
- عدد CBR با افزایش درصد خرده‌پلاستیک در نمونه در مقایسه با نمونه‌ی غیرمسلح افزایش می‌یابد، به طوری که برای مخلوط با ۰/۵٪ و ۲٪ خرده‌پلاستیک، 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 خرده‌پلاستیک در مقایسه با خاک، بهبود رفتار خاک مورد انتظار است، اما به هرحال نتایج حاصل منجر به شناخت جنبه‌های بیشتری از رفتار مخلوط خاک خرده‌پلاستیک 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 کمّی، با دقت و احتیاط استفاده شود.

Archive of SID
www.SID.ir

پانوشت‌ها

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., Bassanh, 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.

Archive of SID

www.SID.ir