

بررسی رفتار بار - نشست مخلوط خاک و خرده لاستیک

رضا ذاکری (دانشجوی دکتری)

سیدناصر مقدس نفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۳۴، (پادداست نشی)

در نوشتار حاضر، به منظور بررسی اثر اندازه‌ی دانه‌های خرده‌لاستیک، نسبت خرده‌لاستیک، اثر سربار و ضخامت لایه‌ی خاک فوقانی در رفتار مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، تعدادی آزمایش نفوذ سنجه بر روی خاک بدون افزودنی و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با ۴ اندازه‌ی مختلف از خرده‌لاستیک به ابعاد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر در درصد‌های وزنی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ و سربارهای صفر، ۲ و ۴ کیلوگرم انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن حدود ۷/۵٪ وزنی خرده‌لاستیک با اندازه‌ی بزرگ (۴/۷۶ میلی‌متر) به خاک موجب افزایش ۷۵٪ در باربری نسبت به خاک بدون افزودنی می‌شود. همچنین با افزایش سربار، باربری مخلوط افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش باربری با افزایش آن کاهش می‌یابد. همچنین قرارگیری لایه‌ی خاک با ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر (حدود ۳/۳° بعد سطح بارگذاری) روی مخلوط خاک با خرده‌لاستیک با اندازه‌ی بزرگ می‌تواند موجب بهبود مقاومت، به خصوص برای مقادیر نفوذ کمتر از ۵ میلی‌متر شود. با افزایش ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک در نسبت اختلاط یکسان با خاک و در محدوده‌ی مورد بررسی در آزمایش‌های انجام شده، مقاومت نمونه افزایش یافت.

واژگان کلیدی: ماسه، خرده‌لاستیک، نسبت ابعادی، درصد بهینه‌ی خرده‌لاستیک،

باربری، نفوذ، سربار.

rzakeri@email.kntu.ac.ir
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت در جهان و افزایش نیاز به حمل و نقل، حجم زیادی از لاستیک‌های فرسوده در حال تولید است. در بیشتر کشورها، لاستیک‌های فرسوده در انبار نگهداری و یا در مدفن‌های زباله دفن شده‌اند.^[۱] به دلیل عدم تجزیه‌ی تیره‌ها در کوتاه‌مدت، انباشتگی آن‌ها باعث وقوع مشکلات و به خطر انداختن سلامت جامعه و مردم می‌شود. از این رو، لاستیک‌ها به صورت دانه‌ی، تراشه و پودر، به دلیل داشتن خواصی نظیر: وزن کم، تخلخل بالا، مقاومت کششی زیاد، دوام مناسب، اصطکاک بین ذره‌ی مناسب بین دانه‌ها و اندرکنش خوب آن‌ها با سایر مصالح نظیر خاک، کاربرد فراوانی در فعالیت‌های ژئوتکنیکی، نظیر: اجرای خاکریز سبک، زهکش برای جاده‌ها، اجرای لایه‌های مختلف راه و مخلوط‌های آسفالتی پیدا کرده است.^[۲]

در بسیاری از موارد، کاربرد خرده‌لاستیک‌ها در پروژه‌های عمرانی و قرارگیری آن‌ها در معرض عوامل محیطی، نظیر هوا، سبب بروز مشکلات فراوانی مانند اشتعال و فرسودگی آن‌ها می‌شود.^[۳] همچنین قابل اشتعال بودن، تغییر شکل پذیری زیاد و مشکلات تراکم، از اصلی‌ترین موانع استفاده از خرده‌لاستیک تنها است.^[۴] از این

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۱۰، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2018.2116.2093

برخی پژوهشگران (۲۰۱۲)، جنبه‌های مختلف اثر مخلوط نوارهای لاستیکی با خاک در ظرفیت باربری پی‌ها را با استفاده از یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی و با بررسی عوامل مختلف، نظیر: ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، ضخامت لایه‌ی پوشش خاک روی لایه‌ی مخلوط و نسبت خرده‌لاستیک در مخلوط

مطالعه کردند و رفتار تنش - نشست و نحوه ی گسیختگی خاک زیر پی در حالت عدم وجود خردلاستیک را تابعی از نوع خاک و تراکم آن و در حالت وجود یک لایه از مخلوط خاک - خردلاستیک در بستر، این رفتار را علاوه بر نوع خاک و تراکم آن به نسبت خردلاستیک و ضخامت لایه ی مخلوط وابسته دانستند.^[۸] آن‌ها همچنین گزارش کردند که بیشینه ی مقدار باربری پی در یک مقدار نشست معین، صرف نظر از نسبت خردلاستیک برای ضخامت لایه ی مخلوط حدود ۰/۵ برابر بعد پی رخ می‌دهد. همچنین آن‌ها مقدار بهینه ی نسبت خردلاستیک را در محدوده ی ۲/۵ تا ۵ درصد گزارش کردند.

در سال ۲۰۱۴، نیز در بررسی اثر تسلیح خاک با استفاده از تکه‌های لاستیک و تثبیت آن با سیمان، با انجام آزمایش‌های CBR و مقاومت تراکمی تک محوری مشاهده شد که با افزایش زمان عمل آوری، مقاومت فشاری محدود نمی‌شود و مقدار CBR نمونه افزایش می‌یابد. همچنین نسبت خردلاستیک ۵٪ به عنوان مقدار بهینه ی آن، برای دست‌یابی به بیشینه ی مقاومت فشاری محدود نشده و مقدار CBR گزارش شد.^[۹] همچنین در سال ۲۰۱۵، با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی مخلوط ماسه و خردلاستیک، افزایش مقاومت برشی مخلوط نسبت به فقط ماسه با افزایش خردلاستیک از صفر تا ۳۰ درصد وزنی گزارش شد. و علت آن به افزایش قفل و بست بین دانه‌های خاک و خردلاستیک نسبت داده شد.^[۱۰]

همچنین در سال ۲۰۱۵،^[۱۱] با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی مخلوط ماسه و خردلاستیک مشاهده شد که با افزایش مقدار خردلاستیک تا ۳۰٪ وزنی، مقاومت برشی بیشینه، افزایش و برای مقادیر بیشتر خردلاستیک، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. در ضمن مشاهده شد که با افزایش نسبت خردلاستیک، سختی اولیه ی مخلوط کمتر می‌شود. در سال ۲۰۰۶،^[۱۲] نیز با انجام آزمایش‌های سه محوری فشاری روی مخلوط خاک دانه‌ی و خردلاستیک با ابعاد و مقادیر مختلف از خردلاستیک مشاهده شد که افزودن ۲۰٪ خردلاستیک با نسبت ابعادی (نسبت ابعاد دانه‌های خردلاستیک به ماسه) ۲ به ماسه، موجب افزایش ۲ درجه در زاویه ی اصطکاک زهکشی نشده و افزایش چسبندگی مخلوط تا حدود ۱۸ کیلو پاسکال شده است.

همچنین در سال ۲۰۰۷،^[۱۳] با بررسی رفتار تنش - تغییر شکل و مشخصه ی موج برشی در مخلوط ماسه - خردلاستیک، دو پارامتر نسبت اندازه ی ذرات ماسه به خردلاستیک و همچنین درصد خردلاستیک از مهم ترین عوامل مؤثر در رفتار مخلوط معرفی شدند. در سال ۲۰۰۶،^[۱۴] نیز با انجام آزمایش سه محوری روی مخلوط ماسه و خردلاستیک به بررسی رابطه ی تنش - کرنش و پارامترهای مقاومتی مخلوط پرداخته و در مقادیر اصطکاک داخلی و چسبندگی ماسه به علت افزودن خردلاستیک، تا حدود ۱۵٪ افزایش گزارش شد.

همچنین در سال ۲۰۱۱، با انجام آزمایش برش مستقیم روی دو مخلوط ماسه و خردلاستیک با دو نوع ماسه (سطح زبر و نرم) و مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد وزنی خردلاستیک (بدون اشاره به ابعاد دانه‌های خردلاستیک) گزارش شد که مقاومت برشی و زاویه ی اصطکاک داخلی هر دو مخلوط به ازاء ۱۰٪ وزنی خردلاستیک کاهش یافته و با توجه به کاهش ۱۰۰٪ وزن مخلوط ماسه و خردلاستیک نسبت به فقط ماسه، استفاده از مخلوط مذکور به عنوان مصالح خاکریز سپک روی بستر ضعیف و همچنین به عنوان مصالح پشت دیوار حائل توصیه شده است.^[۱۵] برخی پژوهشگران،^[۱۶] نیز قابلیت جذب انرژی مخلوط ماسه و خردلاستیک را مطالعه و مشاهده کردند که استفاده از مخلوط خاک و خردلاستیک در پشت دیوار حائل، ضمن استهلاک انرژی ناشی از زلزله، با کاهش وزن نهایی مجموعه ی مصالح پشت دیوار نسبت به فقط خاک، موجب کاهش نیروهای وارد بر دیوار

حائل از طرف توده ی پشت آن می‌شود. در سال ۱۹۹۶،^[۱۷] نیز قابلیت استفاده از تراشه‌های لاستیک به منظور تسلیح ماسه با استفاده از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مطالعه و گزارش شد که وزن مخصوص توده ی ماسه، مقدار لاستیک خرد شده و تنش نرمال، تأثیر زیادی در مقاومت برشی دارند.

همچنین در سال ۲۰۰۹،^[۱۸] با انجام آزمایش CBR روی مخلوط خاک و خردلاستیک، مقدار بهینه ی خردلاستیک حدود ۷/۵٪ گزارش شد. در مطالعات دیگری در همان سال،^[۱۹] به بررسی امکان استفاده از خردلاستیک به عنوان مسلح کننده در لایه‌های روسازی انعطاف پذیر با استفاده از آزمایش برش مستقیم و CBR پرداخته شد. همچنین افزودن ۶٪ خردلاستیک به خاک جهت افزایش عدد CBR، زاویه ی اصطکاک داخلی، و چسبندگی مخلوط خاک توصیه شد.

در مطالعاتی روی رفتار مخلوط خاک و خردلاستیک (۲۰۰۸)،^[۲۰] نیز گزارش شد که رفتار مخلوط خاک بستگی قابل توجهی به نسبت اندازه ی دانه‌های خردلاستیک به اندازه ی دانه‌های خاک و همچنین نسبت سختی آن‌ها دارد. همچنین در سال ۲۰۱۵،^[۲۱] به بررسی اثر مقدار خردلاستیک در نسبت باربری CBR مخلوط خاک و خردلاستیک پرداخته شد و نتایج به دست آمده مبین کاهش نسبت باربری CBR با افزودن خردلاستیک از نسبت صفر تا ۱۵ درصد وزنی بود.

اگرچه در خصوص رفتار مخلوط خاک و خردلاستیک، مطالعات مختلفی توسط پژوهشگران پیشین انجام شده است،^[۲۲-۲۳] اما بررسی اثر اندازه ی دانه‌های خردلاستیک (نسبت اندازه ی دانه‌های خردلاستیک به اندازه ی متوسط ذرات خاک)، اثر ضخامت لایه ی خاک در مخلوط خاک و خردلاستیک، و همچنین اثر سربار در مقدار باربری مخلوط بر روی رفتار مخلوط، به عنوان خلأ کارهای پیشین (که کمتر به آن‌ها پرداخته شده است) نیازمند پژوهش بیشتر است. لذا در نوشتار حاضر، بررسی اثر پارامترهای مذکور با انجام آزمایش CBR مد نظر است. علت استفاده از آزمایش ذکر شده، هزینه ی کم، دسترسی و سهولت استفاده از آن است.

۲. مصالح مصرفی

خاک مورد نظر در کلیه ی آزمایش‌ها، از نوع ماسه و عاری از هرگونه الیاف گیاهی با توزیع اندازه ی ذرات مطابق شکل ۱ است. خاک مذکور با اندازه ی بیشینه ی دانه ی ۱۰ میلی‌متر و متوسط اندازه ی دانه ی ۲ میلی‌متر ($D_{50} = 2mm$) است و مطابق سیستم طبقه بندی ۱۱-۲۴۸۷-ASTM^[۲۴] به عنوان ماسه با دانه بندی خوب (SW) طبقه بندی می‌شود. توده ی ویژه ی خاک مورد نظر نیز مطابق روش ASTM D۸۵۴-۹۲،^[۲۵] برابر ۲٫۶۸ اندازه گیری شد. همچنین با انجام آزمایش تراکم استاندارد (شکل ۲) مطابق دستورالعمل ASTM D۶۹۸-۱۲ e۲،^[۲۶] مقدار بیشینه ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه ی آن به ترتیب حدود ۱٫۹۲ گرم بر سانتی متر مکعب و ۱۱٫۵٪ و مطابق ASTM D۴۲۵۴-۰۰،^[۲۷] کمینه ی وزن مخصوص خشک آن برابر ۱٫۵۷ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمدند.

جهت بررسی اثر اندازه ی دانه‌های خردلاستیک، از ۴ اندازه ی مختلف خردلاستیک، همگی از یک جنس استفاده شد. خردلاستیک‌ها، عاری از هر گونه نخ، سیم آهنی و آلودگی هستند و جذب آب محسوسی ندارند. توده ی ویژه ی خردلاستیک‌ها براساس دستورالعمل ASTM D۸۵۴-۹۲،^[۲۸] برابر ۱٫۲ تعیین شد. جدول ۱، مشخصات خردلاستیک‌ها (اندازه‌های ۱ تا ۴) و شکل ۳، تصاویری از شکل ظاهری آن‌ها را نشان می‌دهند. منظور از اندازه ی متوسط دانه‌های خردلاستیک (D_R)، آن است که بزرگ ترین بعد دانه ی خردلاستیک در نزدیکی D_R قرار دارد.

جدول ۱. مشخصات خرده‌های لاستیک.

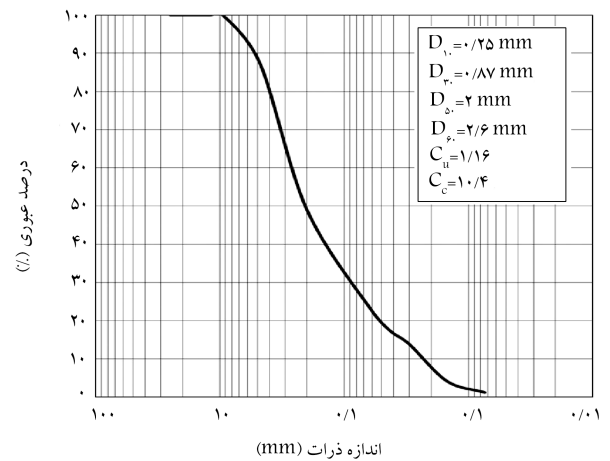
اندازه	اندازه (میلی متر)	$\frac{(D_p)^*}{(D_{50})_S}$
۱	۴٫۷۶	۲٫۳۸
۲	۲٫۸۳	۱٫۴۱
۳	۲	۱
۴	۱٫۲۶	۰٫۶۳

* $(D_{50})_S$ و D_R به ترتیب اندازه‌ی متوسط ذرات خاک و اندازه‌ی متوسط دانه‌های خرده‌لاستیک هستند.
 ** منظور از نسبت اختلاط خرده‌لاستیک و ماسه، نسبت وزنی آن‌ها است.

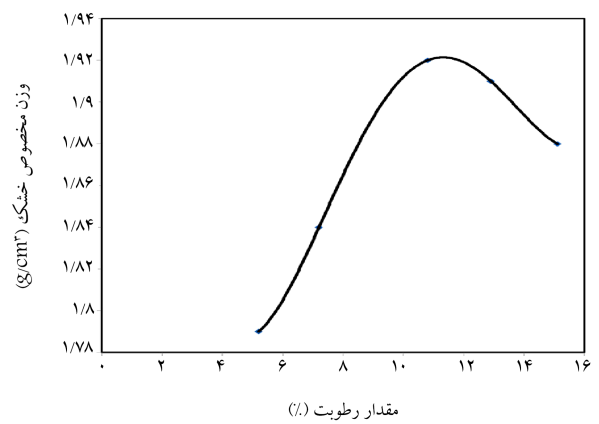
خرده‌لاستیک لازم نیز به ۲ قسمت هم‌وزن تقسیم شد. سپس هر دو سهم خاک (در نمونه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک: یک سهم خاک و یک سهم خرده‌لاستیک) با یکدیگر مخلوط شدند. این تذکر لازم است که با توجه به تراکم‌پذیری کم مخلوط خاک و خرده‌لاستیک و عدم وجود استاندارد خاص برای تراکم مخلوط مورد بحث، هدف اصلی حصول تراکم و داشتن وزن مخصوص یک‌نواخت در کل نمونه است. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور ایجاد شرایط مناسب جهت مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها، با ثابت نگه داشتن درصد تراکم $(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d_{max}}})$ برابر ۰٫۹۳ (در محدوده‌ی تراکم موردنظر در خاکریزهای راه) تغییر انرژی تراکم در نمونه‌های مختلف، نمونه‌ها براساس اطلاعات جدول ۲ آماده شدند. به عبارتی، کلیه‌ی نمونه‌ها صرف‌نظر از مقدار خرده‌لاستیک و ابعاد خرده‌لاستیک با ۱۱٫۵٪ رطوبت و در تراکم ۰٫۹۳ تهیه شدند. مقدار خاک موردنیاز (یا مخلوط خاک - خرده‌لاستیک موردنیاز) جهت رسیدن به تراکم مذکور در ۸ قسمت وزنی مساوی و با تعداد ضربات مشخص در قالب آزمایش CBR به قطر ۱۵٫۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱٫۶ سانتی‌متر ریخته و هر لایه با استفاده از کوبه‌یی به وزن ۵٫۳ کیلوگرم و با ارتفاع سقوطی مطابق جدول ۲ متراکم شد. لازم به ذکر است که اطلاعات مندرج در جدول ۲، شامل تعداد ضربات و ارتفاع سقوط وزنه برای هر لایه (در جهت رسیدن به تراکم موردنظر) با آزمون و خطا حاصل شده است. مطابق جدول مذکور، با کاهش ابعاد خرده‌لاستیک و یا افزایش درصد آن، انرژی بیشتری جهت تراکم مخلوط خاک و لاستیک جهت رسیدن به درصد تراکم موردنظر لازم است. این موضوع به علت حاکم شدن رفتار لاستیک با افزایش مقدار خرده‌لاستیک و افزایش سطح تماس بین ذرات خاک با لاستیک است، به طوری که برای خرده‌های لاستیک با اندازه‌ی ۴ (جدول ۱) و مقدار وزنی ۱۲٪ حتی با ۵۶ ضربه در هر لایه نیز امکان رسیدن به تراکم موردنیاز مقدور نشد. در پروژه‌های عملی، با توجه به حجم زیاد مخلوط در صورت اختلاط کافی و مناسب خاک و خرده‌لاستیک، دست‌یابی به مخلوط یک‌نواخت با عملکرد مناسب دور از انتظار نخواهد بود.

پس از آماده‌سازی و قرار دادن نمونه بر روی دستگاه و زیر محور اعمال بار، تنش روی سطح نمونه در سطحی دایره‌یی با قطر ۵ سانتی‌متر (سیستم بارگذاری) اعمال می‌شود. در کلیه‌ی آزمایش‌ها، بارگذاری تا رسیدن مقدار نفوذ سنجه به ۲۰ میلی‌متر (قرانت مقادیر بار برای نفوذ سنجه از صفر تا ۲۰ میلی‌متر به فواصل ۰٫۵ میلی‌متر) ادامه یافت. برای تراکم خاک، مقدار انرژی (E) در جدول ۲ از رابطه‌ی ۱ حاصل می‌شود که در آن n تعداد ضربه به ازاء هر لایه، m تعداد لایه، W وزن کوبه، h ارتفاع سقوط و V حجم قالب است.

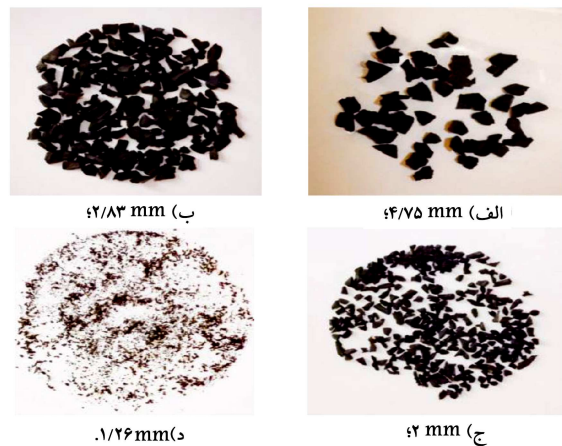
$$E = \frac{n \times m \times W \times h}{V} \quad (1)$$



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ی مورد آزمایش.



شکل ۲. تغییرات وزن مخصوص خشک خاک ماسه در مقابل درصد رطوبت آن.



شکل ۳. تصویر ۴ اندازه‌ی خرده‌لاستیک با ابعاد متوسط (D_R) برابر.

۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

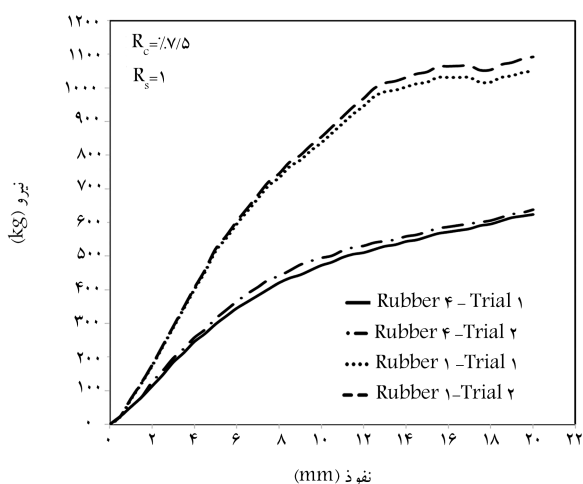
با در نظر گرفتن چگالی موردنظر برای نمونه‌ی خاک بدون افزودنی و نمونه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، پس از اختلاط خاک و ۱۱٫۵٪ آب، مخلوط حاصل به ۲ قسمت با وزن مساوی تقسیم شد. در نمونه‌های مخلوط خاک خرده‌لاستیک، مقدار

جدول ۲. مشخصات تراکم خاک و لایه‌ی خاک - خرده‌لاستیک.

E/E _{soil} **	انرژی E**	ارتفاع سقوط (cm)	تعداد ضربه	خرده‌لاستیک		نمونه
				نسبت *	اندازه	
۱	۴۸۹	۵	۵	۰	-	خاک بدون افزودنی
۱/۲	۵۸۷	۵	۶	۲/۵	۱	مخلوط
۳/۲	۱۵۶۷	۱۰	۸	۵	۱	مخلوط
۴/۸	۲۳۵۱	۱۰	۱۲	۷/۵	۱	مخلوط
۷/۶	۳۷۲۲	۱۰	۱۹	۱۰	۱	مخلوط
۵/۶	۲۷۴۲	۱۰	۱۴	۲/۵	۲	مخلوط
۷/۲	۳۵۲۶	۱۰	۱۸	۲/۵	۳	مخلوط
۹/۶	۴۷۰۲	۱۰	۲۴	۲/۵	۴	مخلوط

* درصد وزنی خرده‌لاستیک نسبت به وزن خاک ** انرژی تراکم لایه (kN - m^۳)

*** نسبت انرژی مورد نیاز برای تراکم مخلوط نسبت به انرژی مورد نیاز

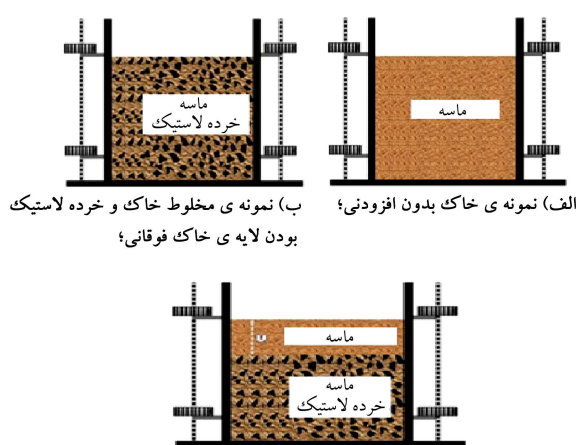


شکل ۵. تغییرات بار - نفوذ برای مخلوط با نسبت خرده‌لاستیک ۷/۵٪ برای دو اندازه‌ی ۱ و ۴ در فشار سر بار ۲ کیلوگرم.

جهت بررسی تکرارپذیری و صحت نتایج آزمایش‌ها تکرار شدند. شکل ۵، تغییرات بار - نفوذ برای مخلوط با نسبت خرده‌لاستیک ۷/۵٪ را با دو اندازه‌ی ۱ و ۴ در فشار سر بار ۲ کیلوگرم و شکل ۶، تغییرات ذکر شده را برای نمونه‌ی مخلوط با نسبت خرده‌لاستیک ۷/۵٪ را با دو اندازه‌ی ۱ و ۴ در حالت وجود ۱/۵ سانتی‌متر لایه‌ی ماسه روی مخلوط ارائه می‌دهند. مطابق شکل‌های مذکور، اختلاف نتایج حاصل از دو آزمایش در شرایط کاملاً یکسان کمتر از ۶٪ است که این اختلاف در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی قابل قبول است.^[۸]

۶. نتایج آزمایش‌ها

هدف از انجام آزمایش‌های CBR، بررسی اثر نسبت خرده‌لاستیک، فشار سر بار، اندازه‌ی دانه‌های لاستیک، و ضخامت لایه‌ی فوقانی خاک در رفتار مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با تراکم یکسان، با توجه به برنامه‌ی آزمایش‌های موردنظر (جدول ۳) است. نتایج آزمایش‌ها با ترسیم منحنی نفوذ بر حسب نیرو و جهت تشریح بیشتر نتایج، با رسم منحنی نیرو بر حسب نسبت خرده‌لاستیک، فشار سر بار، ابعاد خرده‌لاستیک، و ضخامت لایه‌ی رویه‌ی فوقانی در مقادیر نفوذ مختلف بررسی شده است.



(الف) نمونه‌ی خاک بدون افزودنی؛ (ب) نمونه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک بودن لایه‌ی خاک فوقانی؛ (ج) نمونه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک و لایه‌ی خاک به ضخامت ۱۱ در بالای آن.

شکل ۴. شرایط آزمایش در حالت‌های مختلف.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

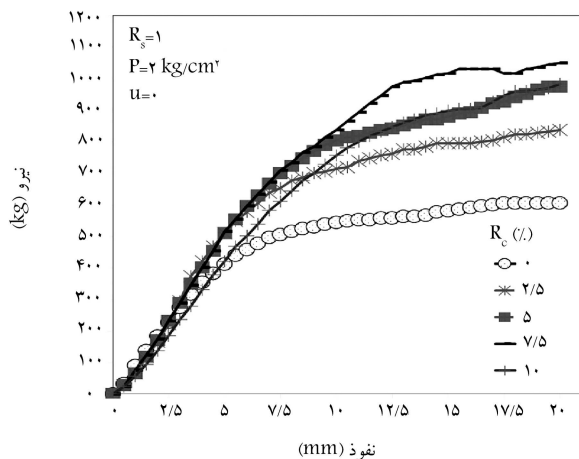
تعداد ۱۴ آزمایش CBR مستقل روی نمونه‌های خاک بدون افزودنی و نمونه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک مطابق جدول ۳، جهت بررسی اثر نسبت خرده‌لاستیک (درصد وزنی خرده‌لاستیک نسبت به وزن خاک)، اندازه‌ی ذرات خرده‌لاستیک (۴ اندازه‌ی خرده‌لاستیک در جدول ۱)، ضخامت لایه‌ی خاک روی مخلوط و اثر سر بار (سه سر بار صفر، ۲ و ۴ کیلوگرم) انجام شد. لازم به ذکر است که به منظور حصول اطمینان از نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها، اختلاط خاک و خرده‌لاستیک و اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر و همچنین تکرارپذیری نتایج، تعدادی از آزمایش‌ها ۲ یا ۳ بار انجام شده‌اند. شکل ۴، شرایط آزمایش در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

۵. تکرارپذیری نتایج

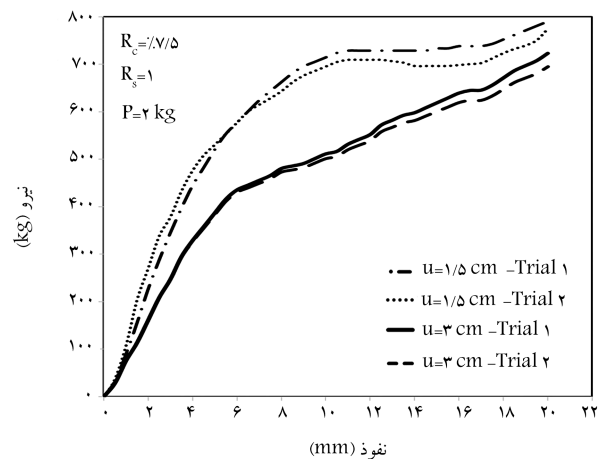
از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم آزمایش، اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی، خروجی، و دقت در آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش است. لذا تعداد ۱۱ آزمایش

جدول ۳. برنامه‌ی آزمایش‌ها.

سری آزمایش	اندازه‌ی خرده‌لاستیک (R_s)	سربار P (kg)	نسبت * خرده‌لاستیک (R_c)	ضخامت لایه‌ی خاک فوقانی u (cm)	تعداد آزمایش	هدف
۱	-	۲	-	صفر	۱	آزمایش مرجع روی خاک بدون افزودنی
۲	۱	۲	۲٫۵	صفر	۳	بررسی اثر نسبت خرده‌لاستیک
			۵			
			۷٫۵			
۳	۱	۲	۷٫۵	۱	۳	بررسی اثر ضخامت لایه‌ی فوقانی
				۱٫۵		
				۲		
۴	۳	۲	۷٫۵	صفر	۲	بررسی اثر اندازه‌ی خرده‌لاستیک
۵	۱	صفر، ۴	۷٫۵	صفر	۲	بررسی اثر سربار



شکل ۷. تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای درصد‌های مختلف خرده‌لاستیک.



شکل ۶. تغییرات بار - نفوذ مخلوط با نسبت خرده‌لاستیک ۷٫۵٪ با اندازه‌ی ۱ و فشار سربار ۲ کیلوگرم برای دو ضخامت لایه‌ی خاک فوقانی ۱٫۵ و ۳ سانتی‌متر.

کار افتادن اصطکاک در سطح تماس دانه‌ها، آثار افزودن خرده‌لاستیک به مخلوط بیشتر نمایان می‌شود. همچنین با افزودن خرده‌لاستیک به ماسه بیش از ۷٫۵٪، شیب اولیه‌ی نمودار نیرو - نفوذ (معرف مدول کشسان مجموعه) کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش نسبت خرده‌لاستیک به خاک و با توجه به کمتر بودن مقدار مدول برشی لاستیک نسبت به ماسه و تمایل رفتار مخلوط به رفتار لاستیک، شیب اولیه‌ی نمودار نیرو - نفوذ با افزایش نفوذ کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۷ و در نظر گرفتن این موضوع که در آزمایش CBR نوعی گسیختگی برشی رخ می‌دهد، می‌توان گفت که با افزایش نسبت خرده‌لاستیک به ماسه تا مقدار درصد بهینه، حفره‌های خالی بین ذرات ماسه با خرده‌لاستیک پر می‌شوند. لذا با نفوذ سنه‌ی بارگذاری و فرو رفتن دانه‌های خرده‌لاستیک در بین دانه‌های ماسه، سطح تماس و درگیری بین دانه‌ها و به عبارتی اصطکاک بین دانه‌های مخلوط افزایش می‌یابد. افزایش بیش از حد خرده‌لاستیک به خاک (بیش از مقدار بهینه‌ی

۱.۶. تأثیر نسبت خرده‌لاستیک

در شکل ۷، تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای مقادیر مختلف خرده‌لاستیک مشاهده می‌شود. آزمایش‌های مذکور روی نمونه‌هایی با نسبت خرده‌لاستیک صفر، ۲٫۵، ۵، ۷٫۵ و ۱۰ درصد با ابعاد متوسط ۴٫۷۵ میلی‌متر (خرده‌لاستیک اندازه‌ی ۱ در جدول ۱)، ۱٫۱۵٪ رطوبت و تراکم ۹۳٪ انجام شده‌اند. با ثابت نگه داشتن درصد رطوبت و تراکم نمونه‌ها، امکان مقایسه‌ی منطقی بین نتایج آزمایش‌ها فراهم شده است. مطابق شکل ۷، با افزودن خرده‌لاستیک به مخلوط تا ۷٫۵٪ وزنی، باربری و سختی نمونه افزایش و سپس با افزودن ۱۰٪ وزنی خرده‌لاستیک به آن، باربری کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر افزودن خرده‌لاستیک به ماسه در نفوذهای کمتر از ۲٫۵ میلی‌متر ناچیز بوده و رفتار مخلوط ماسه - خرده‌لاستیک، تقریباً مشابه رفتار فقط ماسه است. با افزایش نفوذ، ایجاد درگیری بین دانه‌های خاک و خرده‌لاستیک و به

مخلوط افزایش می‌یابد. این رفتار به علت کاهش حفره‌های خالی بین دانه‌ها و پرشدن آن با خرده‌لاستیک‌های تغییرشکل یافته، تحت فشار ناشی از نفوذ سنبه است. با ادامه‌ی نفوذ، به دلیل عدم امکان وقوع تغییرشکل بیشتر در دانه‌های لاستیک، نرخ افزایش در مقاومت مخلوط کاهش می‌یابد.

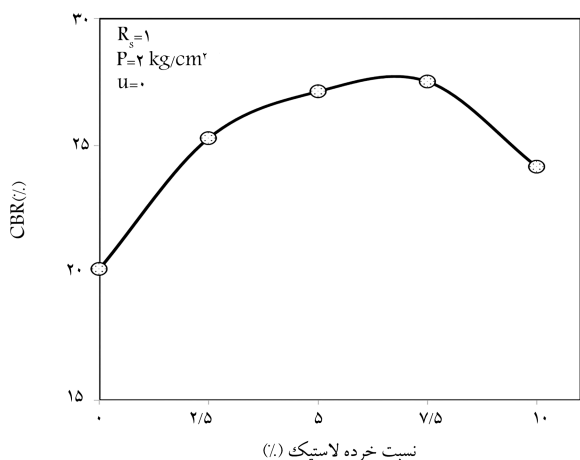
شکل ۹، تغییرات ضریب باربری کالیفرنایی (CBR) نمونه‌ها را در مقابل نسبت خرده‌لاستیک نشان می‌دهد. به‌منظور به دست آوردن مقدار CBR در یک درصد مشخص خرده‌لاستیک، از بیشترین مقدار CBR در نفوذهای ۲٫۵، ۵، ۷٫۵، ۱۰ و ۱۲٫۵ استفاده شد (ASTM D1883-16).^[۲۴] شکل مذکور نشان می‌دهد که با افزایش نسبت خرده‌لاستیک تا ۷٫۵٪، مقدار CBR افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. بیشینه‌ی مقدار افزایش CBR در مقایسه با حالت فقط ماسه، حدود ۳۸٪ است. این موضوع بیانگر مقدار بهینه‌ی خرده‌لاستیک ۷٫۵٪ برای دست‌یابی به بیشینه‌ی مقدار CBR مخلوط خاک - خرده‌لاستیک است. این تذکر لازم است که مقدار بهینه‌ی ۷٫۵٪ خرده‌لاستیک، فقط براساس آزمایش روی خرده‌لاستیک اندازه‌ی ۱ به دست آمده است. لذا با توجه به اینکه نسبت اندازه‌ی دانه‌های خرده‌لاستیک به اندازه‌ی دانه‌های خاک، اثر قابل توجهی در تخلخل و در نتیجه رفتار مخلوط دارد، لذا جهت تعیین مقدار بهینه‌ی خرده‌لاستیک با اندازه‌های ۲، ۳ و ۴ انجام آزمایش‌های بیشتر در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

برخی دیگر از پژوهشگران (۲۰۰۹)^[۱۸] با انجام آزمایش روی مخلوط شن و خرده‌لاستیک با ابعاد ۲ تا ۲٫۵ میلی‌متر در حالت رطوبت بهینه مشاهده کردند که مقدار بهینه‌ی ۷٫۵٪ وزنی خرده‌لاستیک موجب افزایش ۳۰ درصدی مقدار CBR می‌شود. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۱۹] در خصوص روسازی انعطاف‌پذیر قرارگرفته بر بستر متورم‌شونده با اساس مخلوط شن - خرده‌لاستیک، افزایش ۶۶٪ در مقدار CBR به ازاى نسبت خرده‌لاستیک بهینه معادل ۵٪ گزارش شده است. به هر حال نسبت خرده‌لاستیک ۷٫۵٪ به عنوان مقدار بهینه با مقادیر حاصل از برخی مطالعات،^[۱۸، ۱۹، ۲۹] سازگاری مناسبی دارد. این تذکر لازم است که برخی پژوهشگران،^[۲۱] برخلاف نتایج حاصل در مطالعه‌ی حاضر و مطالعات برخی دیگر از پژوهشگران،^[۱۸، ۲۲، ۲۳، ۲۴] کاهش نسبت باربری CBR را با افزودن خرده‌لاستیک در محدوده‌ی نسبت صفر تا ۱۵ درصد وزنی گزارش کردند. علت این امر را می‌توان به تفاوت در اندازه‌ی دانه‌های خرده‌لاستیک و نسبت اندازه‌ی آن به اندازه‌ی دانه‌های خاک نسبت داد.

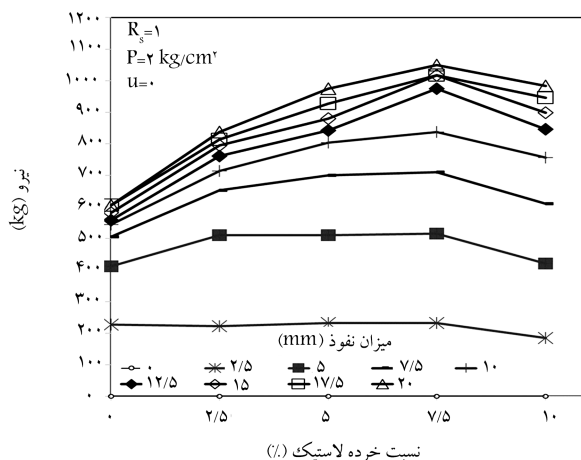
۷٫۵٪) موجب افزایش فضای خالی و حفره در داخل مخلوط و در نتیجه افت سطح تماس بین دانه‌ها و مقاومت مخلوط می‌شود. این موضوع مبین وابستگی رفتار مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک به حجم فضای خالی بین دانه‌های آن است. از طرف دیگر، مقدار مقاومت برشی مخلوط نسبت به فقط خاک، وابسته به میزان سطح تماس دانه‌های خاک و خرده‌لاستیک است. لذا می‌توان گفت، افزودن مقدار بهینه‌ی خرده‌لاستیک به مخلوط، موجب پرشدن حفره‌های خالی بین دانه‌ها و افزایش سطح تماس بین دانه‌ها می‌شود. در مقابل، افزایش بیش از حد خرده‌لاستیک به خاک موجب جدایی دانه‌ها از یکدیگر و افزایش فضای خالی بین دانه‌ها، و در نتیجه کاهش سطح تماس دانه‌ها، اصطکاک داخلی مخلوط، و مقاومت برشی آن می‌شود.

برخی پژوهشگران (۱۹۹۶)^[۲۸] در مطالعات خود بیان کرده‌اند که مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک با افزودن خرده‌لاستیک به خاک بیش از مقدار بهینه‌ی آن، کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این امر را به تشابه بیشتر مخلوط به توده‌ی از خرده‌لاستیک با دانه‌هایی از ماسه در داخل خود با رفتار مکانیکی غالب خرده‌لاستیک نسبت داده‌اند. برخی دیگر (۲۰۱۴)^[۲۹] نیز با انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی بستر حاوی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک به نسبت‌های وزنی ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ درصد مشاهده کردند که با افزایش نسبت خرده‌لاستیک تا ۸٪، ظرفیت باربری صرف‌نظر از تراز نشست پی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. آن‌ها دلیل افزایش ذکرشده را بیشترشدن مدول برشی بستر زیر سطح بارگذاری و اثر تسلیخ خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک بیان کردند. همچنین کاهش مقاومت به ازاى مقدار خرده‌لاستیک بیش از ۸٪ وزنی را به علت افزایش تخلخل خاک و بیشتر شدن شکل‌پذیری بستر حاوی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک و در نتیجه، کاهش مدول برشی بستر زیر سطح پی نسبت دادند.

به منظور روشن شدن بهتر اثر نسبت خرده‌لاستیک و مقدار نفوذ سنبه در مقاومت مخلوط، در شکل ۸، تغییرات نیرو بر حسب نسبت خرده‌لاستیک را در مقادیر نفوذ مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن عملکرد خرده‌لاستیک در مخلوط در مقدار نفوذ ۲٫۵ میلی‌متر ناچیز است، اما با افزایش مقدار نفوذ سنبه در خاک، تفاوت بین بیشینه‌ی نیرو در خاک بدون افزودنی و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک بیشتر می‌شود. این امر مبین افزایش سطح تماس بین ذرات خرده‌لاستیک با ذرات خاک و ذرات خرده‌لاستیک با خرده‌لاستیک، با نفوذ سنبه (تراکم توده‌ی زیر سطح بارگذاری) و در نتیجه افزایش باربری آن است. همچنین با افزایش مقدار نفوذ در بستر، باربری



شکل ۹. مقدار CBR نمونه‌ها در مقابل نسبت خرده‌لاستیک.



شکل ۸. تغییرات نیرو بر حسب درصد لاستیک در مقادیر نفوذ مختلف.

۲.۶. تأثیر ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک

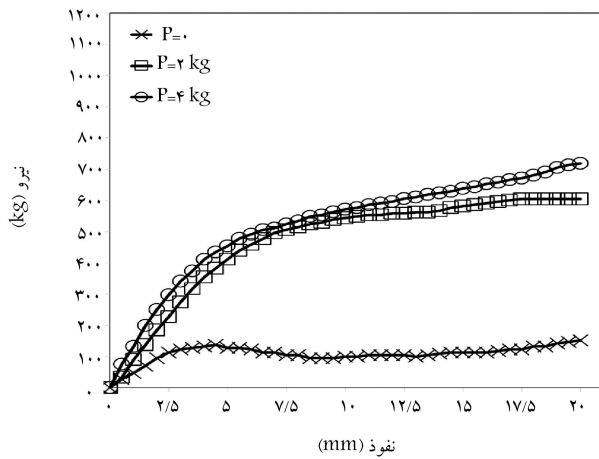
در شکل ۱۰، تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای مخلوط با ابعاد مختلف خرده‌لاستیک ($R_c = 1, 2, 3, 4$) و $W_7.5$ وزنی خرده‌لاستیک مشاهده می‌شود که مطابق آن با کاهش ابعاد متوسط دانه‌های خرده‌لاستیک، باربری مخلوط کاهش می‌یابد، به طوری که برای مخلوط خاک با خرده‌لاستیک‌های با اندازه‌های ۳ و ۴، مقدار مقاومت مخلوط از مقاومت خاک بدون افزودنی نیز کمتر می‌شود.

جهت بررسی دقیق‌تر اثر ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک، در شکل ۱۱، تغییرات نیرو در مقابل نسبت ابعاد متوسط دانه‌های خرده‌لاستیک به خاک در مقادیر مختلف نفوذ سنبه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن در مقادیر کم نفوذ، تفاوت بین مقاومت مخلوط با ابعاد بزرگ و کوچک خرده‌لاستیک کم است، اما با افزایش نفوذ سنبه به داخل مخلوط، اختلاف ذکر شده بیشتر می‌شود. علت مقاومت بیشتر مخلوط با اندازه‌ی بزرگ‌تر خرده‌لاستیک را می‌توان از یک طرف به نسبت تخلخل مجموعه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک و نسبت سختی دانه‌های اجزاء مخلوط، 10^2 و از طرف دیگر، به افزایش اصطکاک تماسی و اندرکنش بهتر بین دانه‌های خاک - خرده‌لاستیک نسبت داد. به عبارت دیگر، با توجه به سختی کمتر و قابل توجه دانه‌های خرده‌لاستیک با کوچک‌ترین بعد در مقایسه با دانه‌های خرده‌لاستیک با بزرگ‌ترین

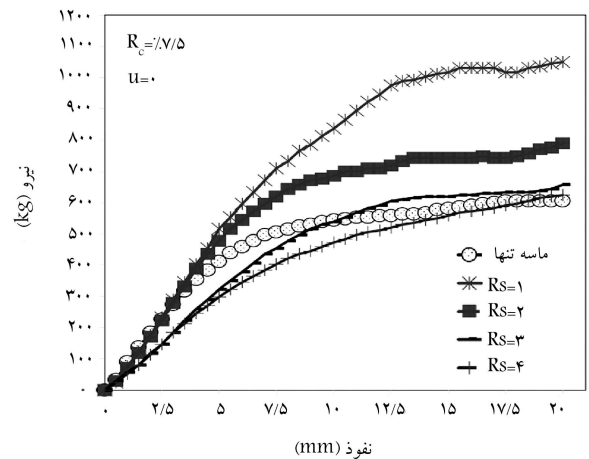
بعد، می‌توان انتظار داشت که نه فقط مدول اولیه‌ی مخلوط حاوی خرده‌لاستیک با ابعاد کوچک کمتر باشد، بلکه افزایش مقاومت مخلوط نسبت به خاک بدون افزودنی (در شکل ۱۰) رخ ندهد. این تذکر لازم است که مطالعه‌ی حاضر محدود به ابعاد خرده‌لاستیک موردنظر در جدول ۱ است، به طوری که در محدوده‌ی ذکر شده، مقدار بهینه‌ی برای ابعاد خرده‌لاستیک مشاهده نشده است. لذا در صورتی که آزمایش با ابعاد بزرگ‌تر خرده‌لاستیک انجام گیرد، دست‌یابی به مقدار بهینه از ابعاد خرده‌لاستیک محتمل است.

۳.۶. تأثیر فشار سر بار

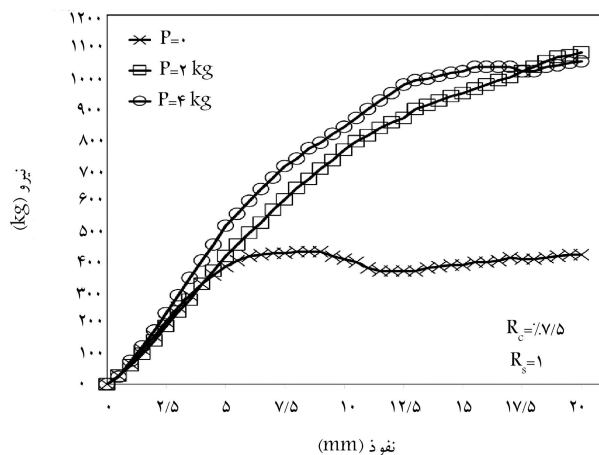
شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای نمونه‌ی خاک بدون افزودنی و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با نسبت خرده‌لاستیک $W_7.5$ با اندازه‌ی ۱ (جدول ۱) را برای مقادیر فشار سر بار صفر، ۲ و ۴ کیلوگرم نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار سر بار (یا به تعبیری فشار همه‌جانبه) تأثیر محسوسی در نتایج دارد به طوری که با افزایش آن، باربری نمونه صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر افزودن خرده‌لاستیک در مقاومت مخلوط در فشارهای همه‌جانبه‌ی کم، بیشتر است و نیز نتایج نشان



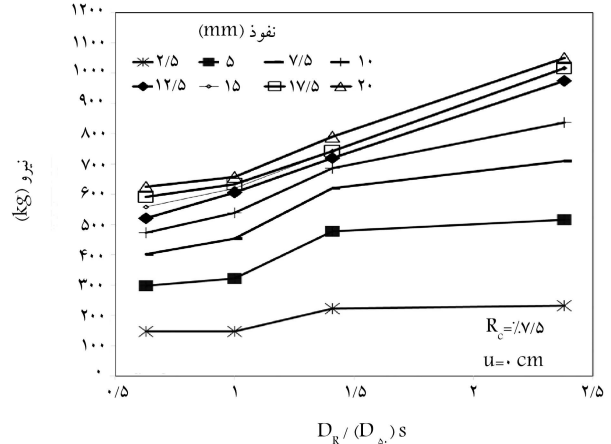
شکل ۱۲. تغییرات تنش بر حسب مقدار نفوذ برای فقط ماسه در مقادیر مختلف سر بار.



شکل ۱۰. تغییرات تنش بر حسب مقدار نفوذ برای ابعاد مختلف خرده‌لاستیک.



شکل ۱۳. تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک در مقادیر مختلف سر بار.

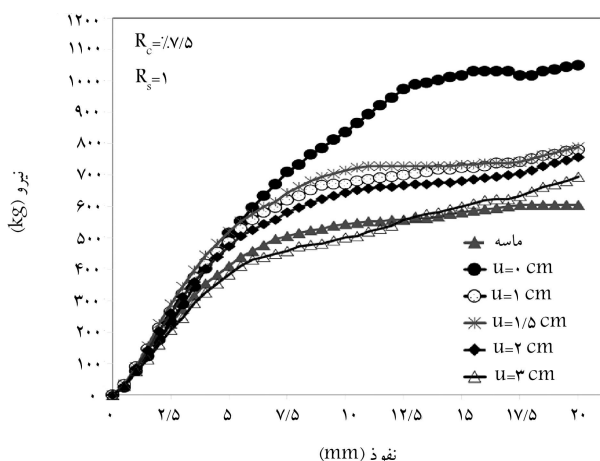


شکل ۱۱. تغییرات نیرو در مقابل نسبت ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک به ابعاد متوسط دانه‌های ماسه $D_R / (D_{50})_s$ در مقادیر مختلف نفوذ.

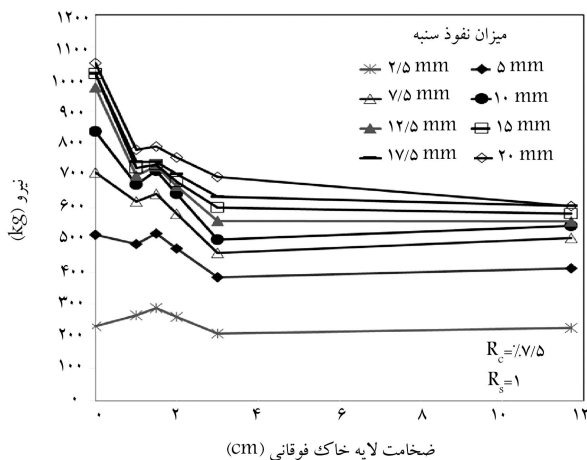
مشاهده شد که باربری پی با قرار دادن لایه‌پی از ماسه به ضخامت مناسب روی مخلوط خاک، نسبت به حالت عدم وجود لایه‌پی مذکور روی مخلوط خاک بهبود می‌یابد.

لذا با توجه به نتایج شکل‌های ۱۴ و ۱۵، افزایش باربری بستر با قرارگیری لایه‌پی خاک فوقانی به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر تا نشست‌های حدود ۵ میلی‌متر (۱۰٪) بعد سنبه‌ی بارگذاری به قطر ۵ سانتی‌متر و در محدوده‌ی نشست‌های قابل قبول پی‌ها و بستر راه‌ها) با نتایج پژوهش‌های اخیر^[۸] تطبیق دارد.

از آنجا که استفاده از مخلوط خاک و خرده‌لاستیک بدون وجود لایه‌پی خاک فوقانی و یا روسازی مشکلاتی از قبیل: ۱. خارج شدن دانه‌های لاستیک از لایه‌پی سطحی مخلوط و ۲. امکان اشتعال و آتش‌سوزی دانه‌های لاستیک به علت قرارگیری آن‌ها در معرض هوای آزاد را در بر دارد؛ لذا، استفاده از یک لایه خاک روی آن با ضخامت بهینه (در مطالعه‌ی حاضر به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر معادل ۰/۳۳ بعد سنبه‌ی بارگذاری)، منطقی است. همچنین وجود لایه‌پی خاک روی مخلوط ضمن جلوگیری از پانچ شدن سطح تماس اعمال بار در مخلوط خاک، مقدار تنش انتقال یافته روی لایه‌پی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک و مقدار نشست آن را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۴. تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای نمونه‌ی خاک بدون افزودنی و مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک با درصد وزنی ۷/۵، در حالت قرارگیری لایه‌پی ماسه به ضخامت ۰، ۱، ۱/۵، ۲، و ۳ سانتی‌متر بر روی مخلوط.



شکل ۱۵. تغییرات نیرو بر حسب ضخامت لایه‌پی فوقانی به ازاء مقادیر مختلف نفوذ.

می‌دهند که افزایش سر بار از ۲ به ۴ کیلوگرم، افزایش محسوسی در باربری نمونه‌ها ندارد.

در واقع تأثیر فشار سر بار در مقاومت مخلوط، مبین وابستگی رفتار مخلوط به فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر آن است، به طوری که با افزایش فشار سر بار و به تعبیری افزایش فشار همه‌جانبه بر نمونه، حجم حفره‌های خالی بین دانه‌ها کاهش و در نتیجه سطح تماس، اندرکنش بین دانه‌ها، و مقاومت برشی مخلوط (متناظر با مقدار نیروی مورد نیاز برای نفوذ سنبه‌ی بارگذاری به مقدار مشخص) افزایش می‌یابد.

۴.۶. بررسی تأثیر ضخامت لایه‌پی خاک روی مخلوط خاک -

خرده‌لاستیک

شکل ۱۴، تغییرات نیرو بر حسب نفوذ برای نمونه‌ی خاک بدون افزودنی و نمونه‌هایی از مخلوط با ۷/۵٪ وزنی خرده‌لاستیک نوع ۱ در شرایط وجود لایه‌پی از خاک به ضخامت ۰، ۱، ۱/۵، ۲، و ۳ سانتی‌متر (۰، ۱/۵، ۲، ۳) $(u = 0)$ بر روی مخلوط را نشان می‌دهد که مطابق آن، نمونه‌های حاوی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، صرف نظر از مقدار ضخامت لایه‌پی خاک فوقانی در بیشتر موارد، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌ی خاک بدون افزودنی دارند. همچنین اگرچه وجود لایه‌پی خاک فوقانی روی مخلوط، موجب کاهش مقاومت نمونه نسبت به حالت عدم وجود آن در مقادیر نفوذ بالا شده است، اما شیب اولیه‌ی نمودار نیرو-نفوذ با افزایش ضخامت لایه‌پی خاک فوقانی افزایش می‌یابد، به طوری که برای ضخامت لایه‌پی خاک فوقانی در حدود ۱/۵ سانتی‌متر (۰/۳۳ بعد سنبه‌ی بارگذاری) و تا نشست‌های حدود ۵ میلی‌متر (۱۰٪ بعد سنبه‌ی بارگذاری) شیب نمودار در شکل ۱۴ و باربری نمونه (شکل ۱۵) بیشتر از بقیه‌ی حالت‌ها شده است. این امر را می‌توان به سختی بیشتر دانه‌های خاک و بسیج شدن نیروها زیر سنبه در بین ذرات خاک و همچنین ایجاد فشار همه‌جانبه‌ی مناسب روی لایه‌پی مخلوط نسبت داد.

همچنین شکل ۱۵، تغییرات نیرو بر حسب ضخامت لایه‌پی خاک فوقانی را به ازاء مقادیر مختلف نفوذ سنبه نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که در مقادیر نفوذ کم سنبه (حدود ۵ میلی‌متر یا به عبارتی کمتر از ۱۰٪ بعد سنبه‌ی بارگذاری) به داخل نمونه، قرارگیری ۱/۵ سانتی‌متر لایه‌پی ماسه در بالای مخلوط خاک و خرده‌لاستیک موجب افزایش مقاومت نمونه نسبت به نمونه‌ی خاک بدون افزودنی و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک بدون لایه‌پی خاک فوقانی می‌شود. اما با افزایش نفوذ سنبه به بیش از ۵ میلی‌متر، مقاومت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک (بدون پوشش خاک $(u = 0)$) بیشتر از مقاومت نمونه‌ی با ۱/۵ سانتی‌متر پوشش لایه‌پی خاک در بالای مخلوط خاک و خرده‌لاستیک می‌شود. با افزایش ضخامت لایه‌پی ماسه به بیش از ۱/۵ سانتی‌متر و در نتیجه دور شدن لایه‌پی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک از ناحیه‌ی تحت تأثیر تنش ناشی از بار وارد بر سنبه، تأثیر آن در افزایش مقاومت نمونه کاهش می‌یابد.

در گذشته نیز مطالعاتی در خصوص اثر لایه‌پی خاک روی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک انجام شده است. برخی پژوهشگران (۱۹۹۳)^[۲] نشان دادند که برای یک خاکریز شامل درصد مناسب خرده‌لاستیک، قرارگیری یک لایه خاک روی آن، ضمن کاهش تراکم پذیری و نشست بستر به واسطه‌ی وجود دانه‌های خرده‌لاستیک، موجب افزایش مقاومت کششی، مدول برشی بستر، و افزایش باربری آن می‌شود. از طرفی دیگر، قرارگیری لایه‌پی خاک روی بستر مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، سهولت اجرا و تراکم‌پذیری را فراهم می‌سازد. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۲^[۸] با انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی بستر حاوی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک نواری

۷. نتیجه‌گیری

است. به عبارت دیگر، استفاده از مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در لایه‌های سطحی با فشار سربار (فشار همه‌جانبه) کمتر، مناسب‌تر است.

- قرار دادن لایه‌یی از ماسه روی مخلوط ماسه با خرده‌لاستیک، موجب افزایش مقاومت تا مقادیر نفوذ حدود ۵ میلی‌متر (10° بعد سنبه‌ی بارگذاری) در مقایسه با حالت عدم وجود لایه‌ی خاک فوقانی می‌شود. اگرچه در مقادیر نفوذ بیشتر از 10° بعد سنبه‌ی بارگذاری، قرارگیری لایه‌ی خاک فوقانی موجب کاهش مقاومت در مقایسه با حالت عدم وجود لایه‌ی خاک فوقانی می‌شود. به هر حال با توجه به محدود بودن مقادیر نفوذ در یک پروژه‌ی عملی (در محدوده‌ی نشست‌های قابل قبول پی‌ها و بستر راه‌ها) و به منظور جلوگیری از آتش‌سوزی و جدا شدن دانه‌های لاستیک، اجرای یک لایه خاک روی مخلوط با ضخامت مناسب (حدود $3/30^\circ$ سطح بارگذاری) توصیه می‌شود.
- با افزایش ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک در مقدار وزنی یکسان خرده‌لاستیک در مخلوط و در محدوده‌ی مورد بررسی در آزمایش‌های مذکور، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر نسبت مناسب بین اندازه‌ی دانه‌های خرده‌لاستیک و خاک، آزمایش روی نسبت بزرگ‌تر ابعاد خرده‌لاستیک به خاک ضروری است.

با توجه به برنامه‌ی آزمایش‌ها در خصوص تأثیر خرده‌لاستیک با ابعاد ۱ در رفتار خاک ماسه‌یی، این نتایج به‌دست آمده است:

- افزودن خرده‌لاستیک به ماسه، باعث افزایش مقاومت نمونه و عدد CBR می‌شود. این افزایش مقاومت در $7/5\%$ وزنی خرده‌لاستیک به بیشترین مقدار خود می‌رسد.
- اگرچه در بعضی حالات از مخلوط، افزودن خرده‌لاستیک به نمونه موجب کاهش مدول اولیه‌ی مخلوط می‌شود، ولی با افزایش نفوذ سنبه به داخل نمونه، به دلیل افزایش سطح تماس، اصطکاک و اندرکنش مناسب بین دانه‌ها، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. این امر مبین ضرورت ایجاد نشست در نمونه، برای عملکرد مناسب خرده‌لاستیک در مخلوط است.
- افزایش سربار موجب کاهش عملکرد مثبت تسلیح خرده‌لاستیک در افزایش مقاومت نمونه می‌شود. این امر به دلیل ایجاد فشار همه‌جانبه‌ی ناشی از سربار

منابع (References)

1. Stutz, J., Donahue, S., Mintzer, E. and et al. "Recycled rubber products in landscaping application", Tell us Institute, pp. 1-19 (2003).
2. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Edil, N. "Construction and performance of shredded waste tire test embankment", Transport Research Board, Washington, D.C., pp. 44-52 (1993).
3. Prasad, D.S.V. and Raju, G.V.R. "Performance of waste tyre rubber on model flexible pavement", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **4**(6), pp. 44-52 (2009).
4. Collins, K.J., Jensen, A.C., Mallinson, J.J. and et al. "Environmental impact assessment of a scrap tyre artificial reef", *J. Mar. Sci. Technol.*, **59**, pp. S243-S249 (2002).
5. Edinçiler, A., Cabalar, A.F., Cagatay, A. and et al. "Tri-axial compression behavior of sand and tire wastes using neural networks", *Neural Computing and Applications* (2010).
6. Youwai, S. and Bergado, D.T. "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(2), pp. 254-264 (2003).
7. Hataf, N. and Rahimi, M.M. "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", *Construction and Building Materials*, **20**(10), pp. 910-916 (2005).
8. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Norouzi, A.H. "Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire- An experimental investigation", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 547-556 (2012).
9. Hambirao, Gh.S. and Rakaraddi, P.G. "Soil stabilization using waste shredded rubber tyre chips", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **11**, pp. 20-27 (2014).
10. Vinod, J.S., Sheikh, N., Mastello, D. and et al. "The direct shear strength of sand-tyre shred mixtures", In K. K. Kulathilaka, K. Senanayake, J.S.M. Fowze, N. Priyankara, P.Rathnaweera, U. Nawagamuwa N. De Silva (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering (ICGEColombo2015)*, pp. 193-196 (2015).
11. Bali Reddy, S., Pradeep Kumar, D. and et al. "Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoeengineering applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**(2), pp. (2015).
12. Rao, G.V. and Dutta, R.K. "Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, **24**(3), pp. 711-724 (2006).
13. Lee, C.J. and Sheu, S.F. "The stiffness degradation and damping ratio evolution of taipei silty clay under cyclic straining", *J. of Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, **22**(4), pp. 323-331 (2007).
14. Rao, G.V. and Dutta, R.K. "Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, **3**(24), pp. 711-724 RK (2006).
15. Cabalar, A.F. "Direct shear tests on waste tires-sand mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**(4), pp. 411-418 (2011).

16. Nakhaee, A. and Marandi, S.M. "Reducing the forces caused by earthquake on retaining walls using granulated rubber-soil mixture", *I.J.E. Transactions Applications*, **24**(4), pp. 337-350.
17. Foose, G.J., Benson, C.H. and Bosscher, P.J. "Sand reinforced with shredded waste tires", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, **122**(9), pp. 760-767 (1996).
18. Subramanian, R.M. and Jeyapriya, S.P. "Study of effect of waste tyres in flexible pavement system", *Indian Geotechnical Society Chennai Chapter*, pp. 19-22 (2009).
19. Prasad, D.S.V. and Raju, G.V.R. "Performance of waste tyre rubber on model flexible pavement", *Journal of Engineering & Applied Sciences*, **4**(6), pp. 44-52 (2009).
20. Kim, H.K. and Santamarina, J.C. "Sand-rubber mixtures (large rubber chips)", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(10), pp. 1457-1466 (2008).
21. Cabalar A. and Karabash Z. "California bearing ratio of a sub-base material modified with tire buffings and cement addition", *Journal of Testing and Evaluation (JTE)*, **43**(6), pp. 1279-1287 (2014).
22. Anbazhagan, P., Manohar, D. and Rohit, D. "Influence of size of granulated rubber and tyre chips on the shear strength characteristics of sand-rubber mix", *Geomechanics and Geoengineering*, **12**(4), pp.266-278 (2017).
23. Brara, A., Brara, A., Daouadji, A. and et al. "Dynamic properties of dense sand-rubber mixtures with small particles size ratio", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-15 (2016).
24. Brunet, S., De la Llera, J.C. and Kausel, E. "Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **85**, pp. 134-145 (2016).
25. Wang, Z., Zhang, N., Li, Q. and Chen, X. "Dynamic response of bridge abutment to sand-rubber mixtures backfill under seismic loading conditions", *Journal of Vibroengineering*, **19**(1), pp.434-446 (2017).
26. Yadav, J. and Tiwari, S. "A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay", *Journal of Building Engineering*, **9**(1), pp.177-191 (2017).
27. Zhang, T., Cai, G., Liu, S. and Duan, W. "Laboratory observation of engineering properties and deformation mechanisms of cemented rubber-sand mixtures", *Construction and Building Materials*, **120**, pp. 514-523 (2016).
28. Foose, G.J., Benson, C.H. and Bosscher, P.J. "Sand reinforced with shredded waste tires", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, **122**(9), pp. 760-767 (1996).
29. Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. and Dawson, A.R. "Repeated loading of soil containing granulated rubber and multiple geocell layers", *Geotextiles and Geomembranes*, pp. (2014).
30. ASTM D 2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", American Society for Testing and Materials.
31. ASTM D 854-92, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", American Society for Testing and Materials.
32. ASTM D698-12e2, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", American Society for Testing and Materials.
33. ASTM D 4254-00, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", American Society for Testing and Materials.
34. ASTM D 1883-16, "Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils", American Society for Testing and Materials.