

# بررسی رفتار پی واقع بر لایه‌های مخلوط خاک و خردلاستیک دانه‌یی: مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی مدل‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس

ناصر جزدارایی (دانشجو دکتری)

سید ناصر مقدس نفرشی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (ص. ۸۸-۷۹)  
دوری ۲ - شماره ۲/۲، ص. ۸۸-۷۹

در این نوشتار با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو مدل پی دایره‌یی به قطرهای ۱۱/۳ و ۳۰ سانتی‌متر واقع بر بستر غیرمسلح و مسلح با ۱، ۲ و ۳ لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک دانه‌یی، رفتار بار - نشست پی<sup>۱</sup> بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک صرف‌نظر از مقیاس آزمایش‌ها (اندازه‌ی مدل پی)، جهت دست‌یابی به بیشینه‌ی باربری و کمینه‌ی نشست در حدود ۰/۴ قطر مدل پی است. همچنین استفاده از دو لایه‌ی مخلوط با فاصله‌ی بهینه‌ی معادل ۰/۲ قطر مدل پی از یکدیگر به جای استفاده از یک لایه‌ی مخلوط با ضخامتی معادل مجموع ضخامت دو لایه می‌تواند موجب بهبود بیشتر رفتار بستر شود. با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خردلاستیک<sup>۲</sup>، نرخ افزایش در بهبود باربری بستر کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش لایه‌ها به بیش از ۳ لایه و خارج شدن آن‌ها از حوزه‌ی تأثیر تنش وارد بر پی، انتظار بهبود بیشتر در رفتار بستر وجود ندارد.

واژگان کلیدی: بستر مسلح، مخلوط خاک - خردلاستیک، ظرفیت باربری،

نشست، آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس.

naser\_darabi@yahoo.com  
nas\_moghaddas@kntu.ac.ir

## ۱. مقدمه

درصد‌های وزنی مختلف، مقدار بهینه‌ی خردلاستیک برای دست‌یابی به بیشینه‌ی باربری کالیفرنیاپی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط خاک - خردلاستیک حدود ۵ تا ۶ درصد به دست آمده است. برخی پژوهشگران (۲۰۱۲)،<sup>[۱]</sup> نیز مطالعاتی درخصوص اثر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک<sup>۳</sup> نواری (فقط یک لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک نواری)، ضخامت لایه‌ی خاک غیرمسلح واقع در لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک و درصد بهینه‌ی خردلاستیک نواری در میزان نشست و ظرفیت باربری پی مربعی به بعد ۱۰ سانتی‌متر انجام داده و ضخامت بهینه‌ی خاک غیرمسلح بر روی لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک نواری متناظر با بیشینه‌ی افزایش در باربری پی را برای نوارهای لاستیک به ابعاد ۱۰ × ۴۰ میلی‌متر، حدود ۲/۵ سانتی‌متر گزارش کرده‌اند. همچنین در مطالعه‌ی در سال (۲۰۱۳)،<sup>[۱۱]</sup> مطالعاتی درخصوص تأثیر خردلاستیک دانه‌یی در بهبود رفتار خاک با استفاده از آزمایش باربری کالیفرنیا انجام و گزارش شده است که استفاده از ذرات خردلاستیک با اندازه‌ی بهینه، موجب بهبود باربری بستر و در نتیجه کاهش ضخامت لایه‌ی روسازی راه تحت بارهای ترافیک می‌شود.

در این نوشتار با انجام آزمایش‌هایی روی دو مدل پی دایره‌یی به قطر ۱۱/۳ سانتی‌متر (با عنوان مدل فیزیکی کوچک مقیاس) و قطر ۳۰ سانتی‌متر (با عنوان مدل فیزیکی بزرگ مقیاس)، تأثیر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک،

گسترش صنعت حمل و نقل نظیر سایر صنایع، همواره با مشکلات و مسائل زیست‌محیطی فراوانی همراه است. از جمله‌ی این مسائل، می‌توان به مشکل انباشته‌شدن سالانه‌ی میلیون‌ها حلقه لاستیک ضایعاتی در مناطق مختلف جهان اشاره کرد. مطابق گزارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، در سال ۲۰۱۳ بیش از حدود ۲۳۳ میلیون تیر در ایالات متحده‌ی آمریکا تولید شده است. از این تعداد، فقط ۲۲۳ میلیون تیر بازیافت و به چرخه‌ی مصرف وارد و سایر تیرها در دیفنه‌ها دفن و یا در فضاهای خالی و به شکل غیرقانونی در طبیعت رها شده‌اند.<sup>[۱]</sup> در سال‌های اخیر، لاستیک‌ها به علت برخورداری از وزن مخصوص پایین، مقاومت کششی بالا، دوام زیاد و خاصیت میرایی مناسب، جهت اختلاط با خاک و کاربرد در پروژه‌های ژئوتکنیکی مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته‌اند.<sup>[۱-۲]</sup> در پژوهشی در سال ۱۹۹۳،<sup>[۱۲]</sup> با بررسی عملکرد تیرها، استفاده از لاستیک‌های فرسوده به دلیل داشتن مقاومت کششی زیاد در داخل توده‌ی خاک، به‌عنوان یک ایده‌ی مناسب برای بهبود رفتار خاک و استفاده‌ی مجدد از لاستیک‌های مستعمل مطرح شده است. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹،<sup>[۹]</sup> با انجام آزمایش‌های باربری کالیفرنیا و سه‌محوری روی نمونه‌های مخلوط خاک - خردلاستیک دانه‌یی با

\* نویسنده مستقر

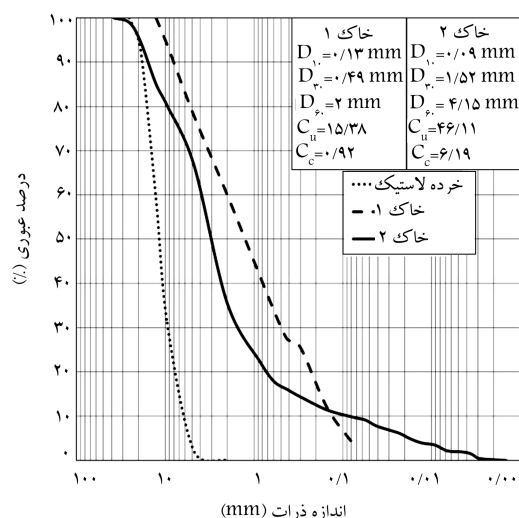
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۱، اصلاحیه ۱۳۹۳/۹/۹، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۱۵.

فاصله‌ی بهینه بین دو لایه‌ی مخلوط، و تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک تحت بارگذاری استاتیکی در بهبود رفتار بستر بررسی و تجزیه و تحلیل شده است. با توجه به نتایج به دست آمده،<sup>[۱۲]</sup> در تمامی آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس مقدار خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک، معادل ۸٪ وزنی کل لایه ( $R_c = 8\%$ ) و عمق مدفون اولین لایه‌ی مخلوط از زیر صفحه‌ی بارگذاری ( $u$ ) معادل ۰٫۲ قطر مدل پی ( $D$ ) انتخاب شده‌اند.

## ۲. مشخصات مصالح

### ۲.۱. خاک

با توجه به انجام آزمایش‌ها توسط دو مدل فیزیکی کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس (جهت بررسی اثر بُعد پی و تأثیر در پارامترهای موردنظر)، دو نوع خاک استفاده شده است. شکل ۱، نمودار دانه‌بندی دو نوع خاک موردنظر را نشان می‌دهد. براساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت ASTM D۲۴۸۷-۱۱<sup>[۱۳]</sup> خاک‌های مورد استفاده در آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس به ترتیب از نوع ماسه با دانه‌بندی بد (SP) و ماسه با دانه‌بندی خوب (SW) طبقه‌بندی شده‌اند. در تمامی آزمایش‌های کوچک مقیاس، خاک موردنظر خشک و چگالی نسبی  $4.77\%$  ( $D_r = 77\%$ ) دارد. خاک موردنظر در آزمایش‌های بزرگ مقیاس با توجه به نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق استاندارد ASTM D۱۵۵۷-۱۲<sup>[۱۴]</sup> به ترتیب چگالی خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی ۲٫۰۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب و ۵٫۷٪ دارد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی دو نوع خاک مطابق جدول ۱ هستند. علت استفاده از دو نوع خاک، با اندازه‌ی ذرات مختلف در آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس، رعایت تناسب بین ابعاد دانه‌های خاک و قطر مدل پی در آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۸<sup>[۱۵]</sup>، براساس مطالعات انجام‌شده روی خاک‌ها با اندازه‌ی ذرات مختلف و صفحات بارگذاری با ابعاد مختلف، نسبت بُعد مدل پی به اندازه‌ی متوسط ذرات خاک ( $D_{50}$ ) دست‌کم برابر ۱۵ توصیه شده است. همچنین از آنجا که هدف از انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس، مقایسه‌ی کیفی نتایج و ارائه‌ی پارامترهای بدون بُعد است، لذا به منظور رعایت نسبت بُعد مدل پی به اندازه‌ی متوسط ذرات خاک از دو نوع خاک مختلف استفاده شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی دو نوع خاک و خرده‌لاستیک دانه‌ی.

جدول ۱. خصوصیات دو نوع خاک (کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس).

پارامترها	خاک ۱ (کوچک مقیاس)	خاک ۲ (بزرگ مقیاس)
ضریب یکنواختی ( $C_u$ )	۱۵٫۳۸	۴۶٫۱۱
ضریب انحناء ( $C_c$ )	۰٫۹۲	۶٫۱۹
$D_{30}$ (mm)	۰٫۴۹	۱٫۵۲
$D_{10}$ (mm)	۰٫۱۳	۰٫۰۹
$D_{50}$ (mm)	۱٫۴	۳٫۹۴
$D_{60}$ (mm)	۲٫۰۰	۴٫۱۵
نسبت منافذ بیشینه ( $e_{max}$ )	۰٫۶۵	۰٫۷۴
نسبت منافذ کمینه ( $e_{min}$ )	۰٫۳۵	۰٫۲۶
درصد رطوبت ( $w$ %)	۰	۵٫۷۰
توده‌ی ویژه ( $G_s$ )	۲٫۶۰	۲٫۶۵
زاویه‌ی اصطکاک داخلی $\Phi$ (درجه)	۳۸٫۵	۴۰٫۵



شکل ۲. تصویری از خرده‌لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌ها.

### ۲.۲. خرده‌لاستیک

در کلیه‌ی آزمایش‌ها اعم از کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس، از یک نوع خرده‌لاستیک حاصل از خردکردن تیرهای فرسوده با دانه‌بندی موردنظر در شکل ۱ استفاده شده است. این نوع خرده‌لاستیک، دانه‌هایی با قطر کمینه و بیشینه حدود ۲ و ۲۵ میلی‌متر، وزن مخصوص و ویژه ۱۱٫۳۷ کیلونیوتن بر مترمکعب، و ۱٫۱۷ داشته است. شکل ۲، تصویری از خرده‌لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

به منظور کنترل دقت آزمایش‌ها، خاک و خرده‌لاستیک به صورت وزنی و به‌طور کاملاً یکنواخت مخلوط شده‌اند. نتایج حاصل از ۲ یا ۳ آزمایش مشابه با اختلاف کمتر از ۶٪ در نتایج، مبین اختلاط مناسب و یکنواخت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در آزمایش‌هاست.

## ۳. آزمایش‌های کوچک مقیاس

### ۳.۱. دستگاه آزمایش

این دستگاه شامل ۳ قسمت اصلی تانک آزمایش، سیستم بارگذاری، و سیستم ثبت قرائت است. تانک آزمایش به ابعاد  $800 \times 800 \times 800$  میلی‌متر شامل یک اسکلت فولادی است، که سه وجه جانبی آن برای سبکی و سهولت در جابه‌جایی

خاک یا مخلوط و در نهایت رسیدن به تراز فوقانی بستر و محل قرارگیری مدل پی صورت گرفته است. تراکم لایه‌های خاک غیرمسلح و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک (با هر دو به صورت توأم) به ضخامت حدود ۲٫۲۵ سانتی‌متر و با اعمال انرژی یکسان بر آن‌ها دو مرتبه اعمال بار ۹۰۰ کیلوگرم بر یک صفحه‌ی ضخیم صلب به ابعاد ۷۹۰ × ۷۹۰ میلی‌متر روی سطح لایه‌ی موردنظر، از طریق جک بارگذاری انجام شده است. وزن مخصوص لایه‌های خاک و مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، پس از تراکم به ترتیب برابر ۱٫۸۳ و ۱٫۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمده‌اند. بدیهی است برای رسیدن به تراکم‌های بالاتر باید به جای استفاده از اعمال بار استاتیکی از سیستم‌های کوبشی استفاده شده است. پس از قراردادن مدل پی دایره‌ی به قطر ۱۱٫۳ سانتی‌متر بر مرکز بستر و نصب حس‌گرهای نیرو و تغییرمکان، سیستم آماده‌ی بارگذاری شده است. بار به صورت یکنواخت و با نرخ ۱٫۵ کیلوپاسکال بر ثانیه اعمال و مقادیر نشست خاک در میزان بار مشخص از طریق سیستم قرائت داده‌ها ثبت شده‌اند.

### ۳.۳. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها

جدول ۲، برنامه و مشخصات آزمایش‌های استاتیکی کوچک مقیاس را نشان می‌دهد. مطابق جدول مذکور، در مجموع تعداد ۱۵ آزمایش به منظور تعیین ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}$ )، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک غیرمسلح بین دو لایه‌ی مخلوط ( $h$ ) و بررسی اثر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $N$ ) انجام شده است.

از جمله مسائل مهم در مطالعات آزمایشگاهی، کنترل تکرارپذیری نتایج به منظور حصول اطمینان از عملکرد سیستم و دقت در اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای ورودی (تنش وارد بر مدل پی) و خروجی (نشست صفحه‌ی بارگذاری) است. بدین منظور تعداد ۷ آزمایش از ۱۵ آزمایش موردنظر، جهت کنترل صحت آزمایش‌ها و تکرارپذیری آن‌ها صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تکرار شده در مقایسه با یکدیگر اختلافی کمتر از ۰٫۶٪ را نشان می‌دهند، که این مقدار در محدوده‌ی مطالعات ژئوتکنیکی مورد قبول است.

### ۴.۳. نتایج و بحث

#### ۴.۳.۱. ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}/D$ )

به منظور تعیین ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}$ )، تعداد ۳ آزمایش مستقل (آزمایش‌های سری ۲ در جدول ۲) با یک لایه‌ی مخلوط با مقادیر ۰٫۸، ۰٫۴، ۰٫۲ و  $h_{rs}/D = ۰٫۲، ۰٫۴، ۰٫۸$  و با درصد خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک معادل ۸٪ وزنی کل لایه انجام شده است. این درصد خرده‌لاستیک با توجه به نتایج مقدس تفرشی و همکاران<sup>[۱۳]</sup> انتخاب شده‌اند. شکل ۴، تغییرات تنش وارد بر پی در مقابل میزان نشست آن ( $s/D$ ) را برای این ۳ آزمایش در مقایسه با آزمایش روی بستر غیرمسلح نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش  $h_{rs}/D$  تا میزان ۰٫۴ (ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مخلوط) ظرفیت باربری افزایش و پس از آن کاهش یافته است.

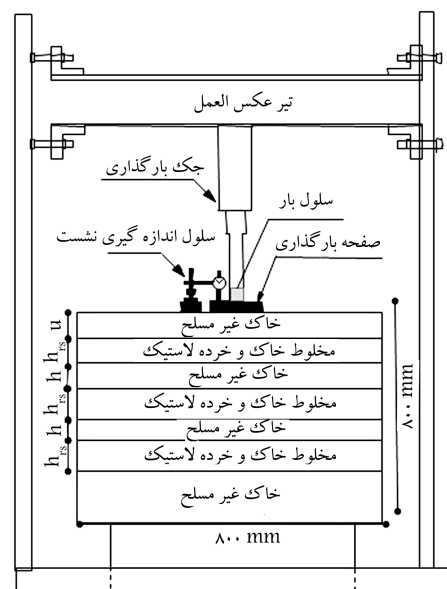
به منظور بررسی دقیق‌تر اثر ضخامت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}$ )، مقدار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف از نسبت نشست  $(s/D = ۰٫۱۲، ۰٫۱۸، ۰٫۲۴، ۰٫۳۰، ۰٫۳۶، ۰٫۴۲، ۰٫۴۸، ۰٫۵۴، ۰٫۶۰، ۰٫۶۶، ۰٫۷۲، ۰٫۷۸، ۰٫۸۴، ۰٫۹۰، ۰٫۹۶، ۱٫۰۲، ۱٫۰۸، ۱٫۱۴، ۱٫۲۰)$  در مقابل ضخامت مخلوط ( $h_{rs}/D$ ) در شکل ۵ ارائه شده است. این تذکر لازم است که اگرچه آزمایش‌ها و همچنین نمودارهای تنش - نشست تا مقادیر تنش حدود ۲۵۰ کیلوپاسکال

تانک از MDF متحرک با ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است. وجه دیگر تانک، از جنس (پلکسی‌گلاس)<sup>۵</sup> به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به منظور مشاهده و عکس‌برداری احتمالی از رفتار و تغییرشکل‌های بستر در خاک زیر پی است. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، تغییرشکل دیواره‌های تانک آزمایش تحت بارهای وارده بر صفحه‌ی بارگذاری (تا حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال) ناچیز است. همچنین سیستم بارگذاری شامل یک سیلندر هیدرولیک، مخزن روغن و بخش کنترل‌کننده با قابلیت اعمال ۱۵ کیلو نیوتن است.

سیستم قرائت و ثبت اطلاعات با استفاده از یک واحد قرائت و ثبت داده‌ها، قابل کنترل به وسیله‌ی یک پردازشگر داخلی، جریان‌های خروجی از مبدل‌های مختلف (حس‌گرهای اندازه‌گیری نشست و بار) را دریافت می‌کند. میزان نشست صفحه‌ی بارگذاری توسط یک حس‌گر اندازه‌گیری نشست و میزان بار قائم وارد بر صفحه‌ی بارگذاری توسط سیلندر هیدرولیکی، توسط یک سلول اندازه‌گیری بار مستقیماً اندازه‌گیری شده‌اند. ظرفیت حس‌گرهای اندازه‌گیری نشست معادل ۱۰۰ میلی‌متر با دقت ۰٫۱٪، بیشینه‌ی ظرفیت آن (۱۰۰ میلی‌متر) و ظرفیت سلول بار برابر ۲۰ کیلو نیوتن با دقت ۰٫۱٪، بیشینه‌ی ظرفیت آن (۲۰ کیلو نیوتن) هستند. مدل پی به قطر ۱۱٫۳ سانتی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به ابعاد تانک آزمایش (بیش از ۷ برابر قطر مدل پی)، وجود دیواره‌های تانک تأثیری در رفتار مدل نخواهد داشت.<sup>[۱۴]</sup> شکل ۳، تصویر شماتیک دستگاه آزمایش و پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌های کوچک مقیاس را نشان می‌دهد. پارامترهای  $h$  و  $h_{rs}$  به ترتیب ضخامت لایه‌ی خاک روی اولین لایه‌ی مخلوط، ضخامت لایه‌های مخلوط، و ضخامت خاک بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک هستند.

#### ۴.۳.۲. آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

آماده‌سازی بستر جهت آزمایش‌های موردنظر، با تراکم خاک در لایه‌های با ضخامت موردنظر و رسیدن به تراز زیرین اولین لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک (اولین لایه‌ی مخلوط از پایین) آغاز شده است. سپس با ریختن اولین لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک روی سطح خاک، عمل خاک‌ریزی و تراکم آن تا رسیدن به لایه‌ی بعدی



شکل ۳. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش کوچک مقیاس.

جدول ۲. برنامه و مشخصات آزمایش‌های استاتیکی کوچک مقیاس انجام شده ( $R_c = 8\%$ ,  $u/D = 0.2$ ).

سری آزمایش	نوع آزمایش	تعداد لایه‌های مخلوط خاک خردلاستیک (N)	$h/D$	$h_{rs}/D$	تعداد آزمایش	هدف از انجام آزمایش
۱	بستر غیرمسلح	—	—	—	۱ + ۱ *	مقایسه با آزمایش‌های سری ۲ تا ۴
۲	بستر حاوی مخلوط خاک - خردلاستیک	۱	۰/۲۰	۰/۴۰	۲ + ۳ *	تعیین مقدار بهینه‌ی $h_{rs}/D$
۳		۲	۰/۲۰	۰/۴۰	۳ + ۳ *	تعیین مقدار بهینه‌ی $h/D$
۴	—	۳	۰/۲۰	۰/۴۰	۱ + ۱ *	بررسی تأثیر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خردلاستیک

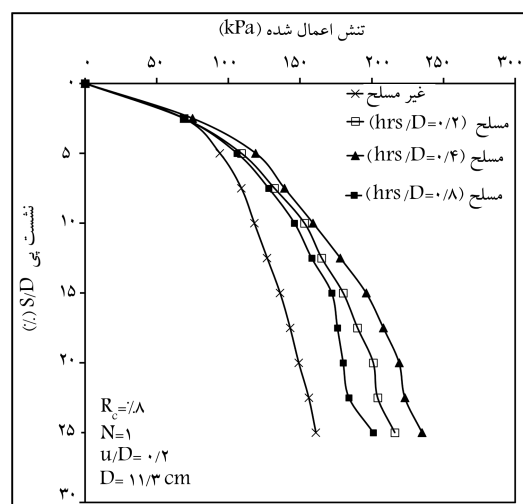
\* آزمایش‌های تکراری

(آزمایش‌های کوچک مقیاس) و تنش ۱۰۰۰ کیلو پاسکال (آزمایش‌های بزرگ مقیاس) یا مقادیر نشست حدود ۲۵-۳۰ درصد قطر پی ادامه داده شده‌اند، اما بحث در خصوص ظرفیت باربری پی با در نظر داشتن مقدار نشست آن ضروری است. این رو این محدوده از نشست‌ها (کمتر از ۱۲٪ و به خصوص کمتر از ۶٪)، به دلیل ضرورت لحاظ کردن محدودیت نشست در موارد عملی و ضوابط طراحی انتخاب شده‌اند.

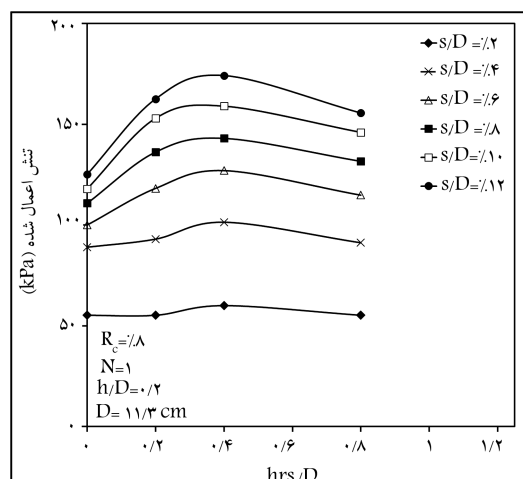
شکل ۵ نشان می‌دهد که برای همه‌ی ترازهای نشست، با افزایش  $h_{rs}$  به میزان ۰/۴ قطر مدل پی (ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مسلح)، ظرفیت باربری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. افزایش در ظرفیت باربری به علت وجود لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک در ترازهای نشست بالاتر محسوس‌تر است. علت این امر را می‌توان به عملکرد مثبت و اندرکنش بهتر دانه‌های خاک - خردلاستیک با افزایش تراز نشست بستر نسبت داد. علت کاهش باربری بستر با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک به حدود ۹ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.8$ ) را می‌توان به تغییر رفتار بستر به رفتار نرم، کاهش مدول برشی و شکل‌پذیری بیش از حد آن نسبت داد.<sup>[۹]</sup> این انتظار وجود دارد که افزایش بیش از حد ضخامت مخلوط، موجب کاهش بیشتر باربری بستر حتی به مقدار کمتر از باربری بستر غیرمسلح شود. از این رو ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک جهت بررسی تأثیر فاصله بین لایه‌های مخلوط (آزمایش‌های سری ۳ در جدول ۲) حدود ۴/۵ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) در نظر گرفته شده است. در مجموع می‌توان گفت وجود لایه‌ی مخلوط با ضخامت بهینه موجب افزایش مقاومت برشی بستر در سطوح گسیختگی زیر پی می‌شود. اگرچه ممکن است این مقدار از  $h_{rs}/D$  برای مقادیر بزرگ از قطر صفحه‌ی بارگذاری زیاد، کمی دور از ذهن باشد؛ اما این تذکر لازم است که برخی محققان،<sup>[۷،۲۱]</sup> در مطالعات خود جهت اجرای خاکریز در یک پروژه‌ی واقعی، لایه‌ی از مخلوط خاک خردلاستیک به ضخامت حدود ۱ تا ۲ متر استفاده کرده‌اند.

### ۲.۴.۳. ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک غیر مسلح بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک ( $h/D$ )

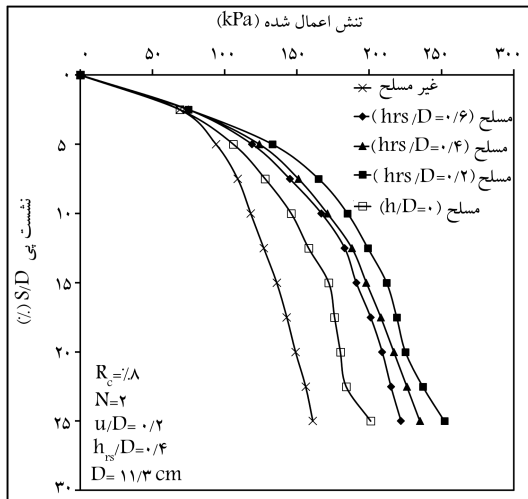
از آنجا که افزایش ضخامت یک لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک از مقدار حدود ۴/۵ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) موجب کاهش ظرفیت باربری بستر شده است، لذا استفاده از دو یا چند لایه مخلوط با ( $h_{rs}/D = 0.4$ )، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از این رو ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک بین لایه‌های مخلوط



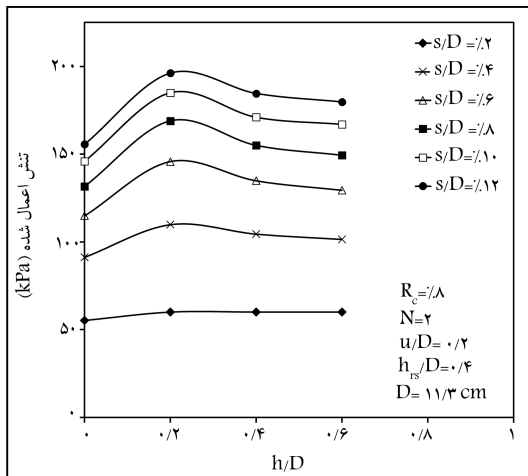
شکل ۴. تغییرات تنش - نشست پی در ضخامت‌های مختلف از مخلوط خاک - خردلاستیک.



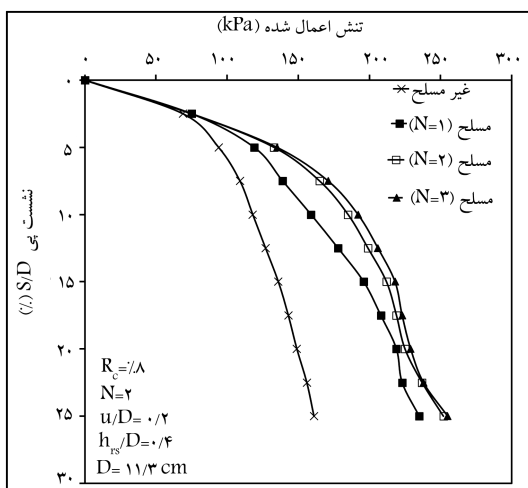
شکل ۵. تغییرات ظرفیت باربری با ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک - خردلاستیک ( $h_{rs}/D$ ) در ترازهای مختلف از نشست پی.



شکل ۶. تغییرات تنش - نشست پی در ضخامت‌های مختلف از لایه‌ی خاک غیرمسلح بین دو لایه‌ی تسلیح برای  $h_{rs}/D = 0.4$ .



شکل ۷. تغییرات ظرفیت باربری با ضخامت لایه‌ی خاک غیر مسلح بین دو لایه‌ی تسلیح در ترازهای مختلف از نشست پی.



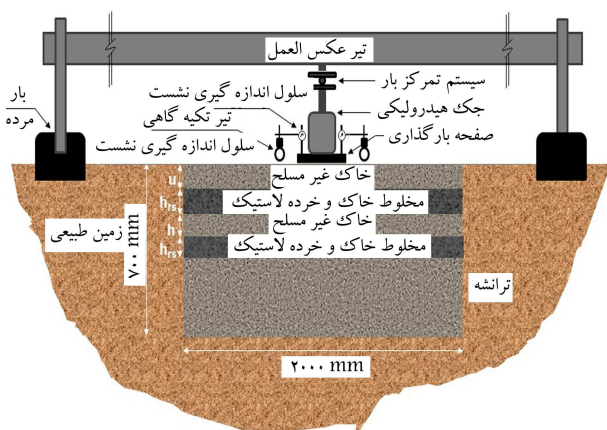
شکل ۸. تغییرات تنش - نشست پی برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ۱، ۲ و ۳ لایه‌ی تسلیح با مخلوط خاک - خرده‌لاستیک.

خاک - خرده‌لاستیک ( $h/D$ ) در سری سوم آزمایش‌ها (جدول ۲) تعیین شده است. شکل ۶، تغییرات باربری پی در مقابل میزان نشست آن ( $s/D$ ) را برای مقادیر مختلف از  $h/D$  ( $0.2, 0.4, 0.6$ ) نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، ظرفیت باربری ابتدا با افزایش  $h/D$  تا یک میزان مشخص (ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک غیرمسلح بین دو لایه‌ی مخلوط معادل  $0.2$  قطر پی) افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این افزایش در باربری را می‌توان به وجود لایه‌ی خاک مناسب بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک و عملکرد آن در کاهش تنش روی لایه‌ی دوم نسبت داد. به‌طور کلی کاهش باربری بستر (یا افزایش نشست بستر) برای مقادیر  $h/D$  بزرگ‌تر از  $0.2$  را می‌توان از یک طرف به حرکت جانبی بیش از حد لایه‌ی غیرمسلح و تمایل به تشکیل شبکه‌ی گسیختگی در این لایه (لایه‌ی خاک در فاصله‌ی بین دو لایه‌ی مخلوط) و از طرف دیگر کاهش اندرکنش لایه‌ی دوم مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با لایه‌ی اول و دورشدن لایه‌ی دوم از ناحیه‌ی تحت تأثیر تنش نسبت داد. به‌عبارت دیگر، قرارگیری دو لایه‌ی مخلوط در یک فاصله‌ی مناسب (فاصله‌ی بهینه) از یکدیگر می‌تواند به‌عنوان یک سیستم مرکب جهت ایجاد بهترین کارایی در افزایش باربری بستر (با در نظر گرفتن معیار نشست) عمل کند.

به‌منظور بررسی بهتر اثر ضخامت لایه‌ی خاک بین دو لایه‌ی مخلوط ( $h/D$ ) در رفتار بستر، تغییرات ظرفیت باربری در مقابل  $h/D$  برای مقادیر مختلف از نسبت نشست ( $s/D = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ) در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق شکل مذکور، با افزایش فاصله‌ی قائم بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، در تمامی مقادیر  $s/D$  ظرفیت باربری تا مقدار  $h/D$  حدود  $0.2$ ، افزایش و سپس با افزایش فاصله‌ی دو لایه‌ی مخلوط ( $h/D$ ) به مقادیر  $0.4$  و  $0.6$ ، مقدار ظرفیت باربری کاهش یافته است. مثلاً، در تراز نشست  $0.4$  ( $s/D = 0.4$ )، برای مقادیر  $h/D$  برابر صفر (دو لایه‌ی مخلوط  $4/5$  سانتی‌متری بدون فاصله یا به عبارتی یک لایه‌ی مخلوط  $9$  سانتی‌متری)،  $0.2$ ،  $0.4$  و  $0.6$  ظرفیت باربری به ترتیب برابر  $91$ ،  $110$ ،  $105$  و  $101$  کیلوپاسکال است. با توجه به مقادیر ظرفیت باربری در تراز نشست مذکور می‌توان گفت افزایش فاصله‌ی دو لایه‌ی مخلوط از میزان صفر (یک لایه‌ی مخلوط با  $h_{rs}/D = 0.8$ ) به میزان  $0.2$  ( $h/D = 0.2$ )، در حالی‌که مجموع ضخامت لایه‌های مخلوط در هر دو حالت یکسان است، موجب افزایش حدود  $21\%$  در میزان ظرفیت باربری بستر می‌شود. براساس نتایج ارائه‌شده جهت انجام بررسی تعداد لایه‌های تسلیح، فاصله‌ی قائم بهینه بین لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک حدود  $2/25$  سانتی‌متر ( $h/D = 0.2$ ) انتخاب شده است.

### ۳.۴.۳. اثر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $N$ )

شکل ۸، تغییرات تنش - نشست پی را برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با تعداد ۱، ۲ و ۳ ( $N = 1, 2, 3$ ) لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با  $h_{rs}/D = 0.4$  و  $h/D = 0.2$  نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح تا ۲ لایه، ظرفیت باربری و سختی سیستم برای یک میزان معین از نشست پی در مقایسه با حالت غیرمسلح افزایش قابل ملاحظه‌ی یافته است. افزایش در باربری بستر با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به میزان لازم، به علت افزایش سختی بستر (کاهش نشست در یک میزان بار مشخص) است. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ۳ لایه، از نرخ افزایش در ظرفیت باربری پی در مقایسه با ۲ لایه کاسته شده است. عدم افزایش قابل توجه باربری پی از ۲ لایه‌ی مخلوط به ۳ لایه‌ی مخلوط، به‌علت قرارگیری لایه‌ی سوم مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در خارج از حوزه‌ی تأثیر پی و تنش اعمال‌شده توسط آن است، به طوری‌که به‌دلیل عدم بروز تغییرشکل‌های لازم و قابل توجه در



شکل ۱۰. تصویر شماتیک از ترانشه و تجهیزات آزمایش.

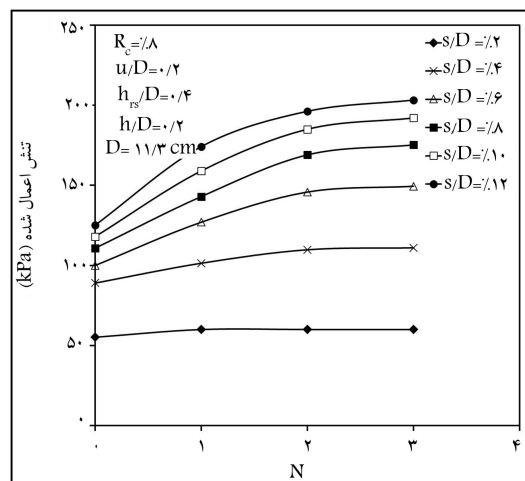
به گونه‌ی انتخاب شود که علاوه بر شبیه‌سازی شرایط واقعی و رعایت شرایط مرزی دیواره‌های آن، امکان تخلیه و پرکردن ترانشه در زمان مناسب توسط نیروی انسانی وجود داشته باشد. ابعاد سطح بارگذاری (صفحه‌ی بارگذاری)، میزان تنش انتقال یافته در نزدیکی دیواره‌های قائم و کف ترانشه (تأثیر مرزها) تحت اثر بار وارد به صفحه‌ی بارگذاری از پارامترهای اصلی برای کنترل ابعاد ترانشه هستند. از این رو با توجه به مطالعات انجام شده،<sup>[۸]</sup> ترانشه‌ی موردنظر با عمق ۷۰۰ میلی‌متر، طول و عرض ۲۰۰۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱۰ مناسب است.

جهت اعمال بار بر سطح خاکریز، از یک سیستم بارگذاری هیدرولیک شامل یک جک هیدرولیک و یک پمپ هیدرولیک دستی با قابلیت اعمال بار تا میزان موردنظر (بیشینه‌ی ۱۰ کیلو نیوتن) استفاده شده است. سر بار موردنیاز در آزمایش‌ها توسط ۲ دستگاه کفی تریلر، هر یک به وزن حدود ۸۰ کیلو نیوتن با اتصال توسط تیر انتقال به یکدیگر تأمین شده است. طراحی تیر مذکور به گونه‌ی بوده است که امکان جابه‌جایی آن و سیستم بارگذاری در انتهای هر آزمایش توسط جرثقیل میسر شود. به منظور اندازه‌گیری بار وارد بر صفحه‌ی بارگذاری، از یک نشانگر بار عقربه‌ی با ظرفیت ۵۵ کیلو نیوتن و دقت ۰٫۵ کیلو نیوتن استفاده شده است. جهت کنترل صحت و دقت اندازه‌گیری بار، این ابزار پس از هر ۲ یا ۳ آزمایش کالیبره شده‌اند. اندازه‌گیری نشست صفحه‌ی بارگذاری با نصب ۳ نشانگر جابه‌جایی با بیشینه‌ی ظرفیت ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰٫۱ میلی‌متر با آرایش مثلثی بر روی صفحه‌ی بارگذاری انجام شده است.

#### ۲.۴. آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

به منظور آماده‌سازی و تراکم لایه‌های خاک غیرمسلح در چگالی موردنیاز، تراکم آن در رطوبت حدود ۵/۷٪ و در لایه‌های با ضخامت حدود ۶۰ میلی‌متر با یک بار عبور متراکم‌کننده‌ی ارتعاشی برای دستیابی به وزن مخصوص خشک ۱۶/۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب انجام شده است. برای بستر مسلح، تراکم لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ضخامت ۶۰ میلی‌متر با دو بار عبور متراکم‌کننده‌ی ارتعاشی (با وزن مخصوص ۱۴/۵ کیلو نیوتن بر مترمکعب) و تراکم لایه‌های خاک غیرمسلح بین لایه‌های مخلوط نیز به ضخامت ۶۰ میلی‌متر با عبور یک بار متراکم‌کننده‌ی ارتعاشی انجام شده است.

پس از آماده‌سازی و تراکم لایه‌های موردنظر در یک آزمایش، تیر انتقال



شکل ۹. تغییرات ظرفیت باربری با تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در ترازهای مختلف از نشست پی.

لایه‌ی سوم و فعال نشدن اندرکنش بین دانه‌های خاک و لاستیک، وجود آن تأثیر قابل توجهی در رفتار سیستم نخواهد داشت. این امر بر اساس تئوری ساده‌ی توزیع تنش بوسینسک،<sup>[۱۷]</sup> مبنی بر قرارگیری حباب تنش در محدوده‌ی ۱ تا ۲ برابر قطر/عرض پی نیز قابل توجیه است. به هر حال عدم تأثیر محسوس لایه‌ی سوم مخلوط، مبین حوزه‌ی تأثیر پی در عمقی حدود ۱/۸ برابر قطر پی (تراز تحتانی لایه‌ی سوم) و بی‌نیازی به تسلیح بستر با ۴ لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک است.

جهت بررسی بهتر تأثیر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در بهبود ظرفیت باربری پی، تغییرات ظرفیت باربری پی در مقابل تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در ترازهای مختلف نشست ( $s/D = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ) در شکل ۹ ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت باربری از نشست پی، ظرفیت باربری آن با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح افزایش یافته است، اما نرخ افزایش باربری از ۲ لایه تسلیح به ۳ لایه در مقایسه با نرخ افزایش آن از ۱ لایه به ۲ لایه کاهش چشمگیری داشته است. به عنوان نمونه برای نسبت نشست  $s/D = 0.4$ ، ظرفیت باربری به ترتیب حدود ۸۹، ۱۰۲، ۱۱۰ و ۱۱۲ کیلو پاسکال برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ۱ تا ۳ لایه مخلوط خاک - خرده‌لاستیک است. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ۱، ۲ و ۳ لایه، ظرفیت باربری پی نسبت به حالت غیرمسلح به ترتیب حدود ۱۵٪، ۲۴٪ و ۲۶٪ افزایش یافته است. این افزایش در میزان باربری را می‌توان به علت افزایش مقاومت برشی سیستم به علت وجود لایه‌های مخلوط و در نتیجه جلوگیری از حرکت جانبی مصالح در حوزه‌ی تأثیر پی دانست.

#### ۴. آزمایش‌های بزرگ مقیاس

##### ۱.۴. تجهیزات آزمایش

این آزمایش‌ها بر اساس استاندارد (ASTM D ۱۱۹۶-۱۲)،<sup>[۱۸]</sup> بر روی صفحه‌ی بارگذاری از جنس فولاد به قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵/۴ میلی‌متر انجام شده‌اند. مطابق این استاندارد، صفحه‌ی بارگذاری باید ضخامت کمینه‌ی ۲۵/۴ میلی‌متر و قطر بین ۱۵ تا ۷۵ میلی‌متر داشته باشد.

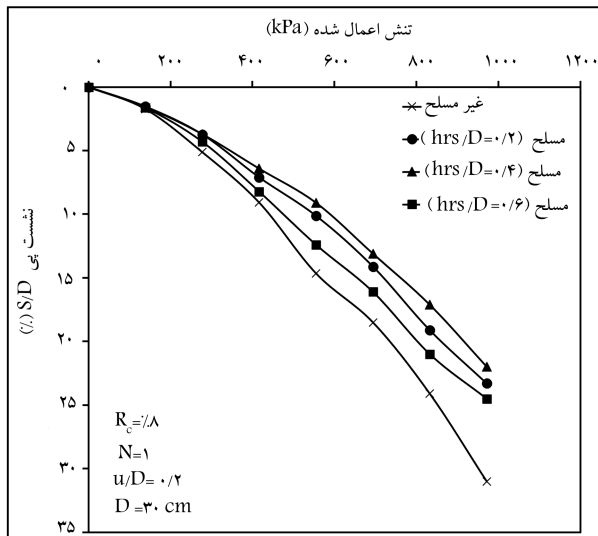
از این رو با توجه به قطر صفحه‌ی بارگذاری ۶، ابعاد ترانشه (چاله‌ی آزمایش) باید

#### ۴.۴. نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، با توجه به نتایج به دست آمده، [۱۲] در تمامی آزمایش‌ها، مقدار خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک معادل ۸٪ وزنی کل لایه، ضخامت بین لایه‌های مخلوط ( $h/D$ ) و عمق مدفون اولین لایه‌ی مخلوط از زیر صفحه‌ی بارگذاری ( $u/D$ ) معادل ۰٫۲ انتخاب شده است.

#### ۱.۴.۴. ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}/D$ )

به منظور بررسی اثر ضخامت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}$ ) در رفتار تنش - نشست بستر و تعیین مقدار بهینه‌ی آن، تغییرات ظرفیت باربری پی در مقابل میزان نشست پی ( $s/D$ ) برای مقادیر مختلف  $h_{rs}/D$  در شکل ۱۲ ارائه شده است. مطابق شکل مذکور ملاحظه می‌شود که با افزایش  $h_{rs}/D$  تا یک میزان مشخص ( $h_{rs}/D = ۰٫۴$ ) ظرفیت باربری افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از این رو ضخامت بهینه‌ی  $h_{rs}$  برای بستر مسلح با یک لایه‌ی مخلوط، حدود ۰٫۴ قطر صفحه‌ی بارگذاری ( $h_{rs}/D = ۰٫۴$ ) است. این تذکر لازم است که این مقدار از  $h_{rs}/D$  مشابه نتایج حاصل از آزمایش کوچک مقیاس است. به منظور بررسی دقیق‌تر اثر ضخامت مخلوط در ظرفیت باربری و نشست پی،



شکل ۱۲. تغییرات تنش - نشست پی در ضخامت‌های مختلف از مخلوط خاک - خرده‌لاستیک.

بار توسط جرثقیل در محل خود نصب و سپس با نصب صفحه‌ی بارگذاری، سیستم اعمال نیرو و ابزارهای اندازه‌گیری نیرو و نشست در محل خود، مجموعه آماده‌ی آزمایش و بارگذاری شده است. ضمن اعمال بار استاتیکی با نرخ ۱٫۵ کیلوپاسکال بر ثانیه، مقادیر نشست صفحه‌ی بارگذاری (قزانت‌های ۳ نشان‌گر اندازه‌گیری جابه‌جایی) در ترازهای مشخص از بار قزانت و ثبت شده‌اند. شکل ۱۱، تصویری از ترانشه‌ی موردنظر به همراه ابزارهای اندازه‌گیری و سیستم بارگذاری را نشان می‌دهد.

#### ۳.۴. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها

جدول ۳، برنامه و مشخصات آزمایش‌های موردنظر جهت بررسی اثر تسلیح با لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست بستر را نشان می‌دهد. مطابق جدول مذکور در مجموع تعداد ۹ آزمایش (۵ آزمایش مستقل و ۴ آزمایش تکراری) جهت بررسی اثر ضخامت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}$ ) و اثر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $N$ ) در ظرفیت باربری و نشست مدل پی انجام شده است. نتایج آزمایش‌های تکراری در مقایسه با یکدیگر، اختلاف بیشینه‌ی ۶٪ دارند. بروز چنین خطایی به علت تغییرات هر چند کوچک در تراکم لایه‌های بستر در حین آماده‌سازی و یا خطای اندازه‌گیری است.

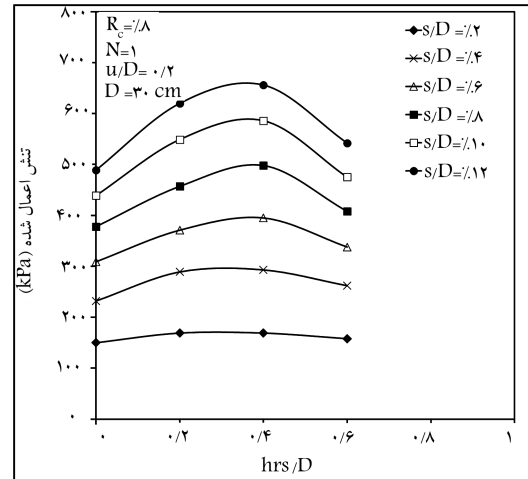
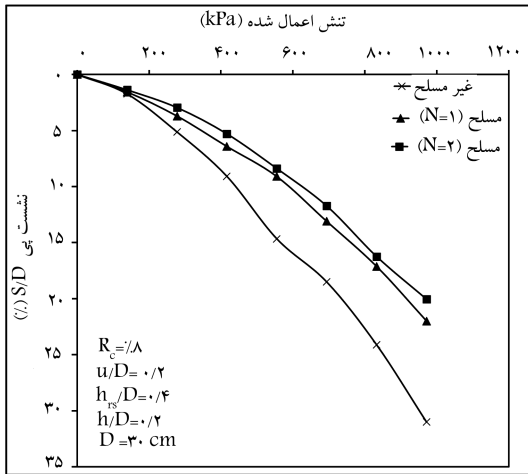


شکل ۱۱. ترانشه و تجهیزات برای انجام آزمایش.

جدول ۳. برنامه و مشخصات آزمایش‌های استاتیکی بزرگ مقیاس.

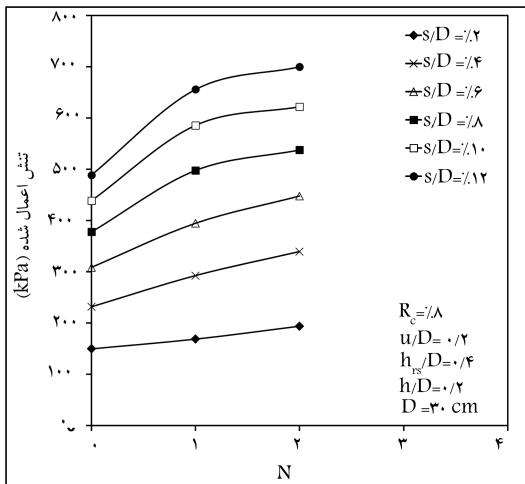
سری آزمایش	نوع آزمایش	تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک (N)	$h/D$	$h_{rs}/D$	تعداد آزمایش	هدف از انجام آزمایش
۱	غیرمسلح	-	--	--	۱ + ۱ *	مقایسه با شرایط مسلح
۲	مسلح با مخلوط خاک - خرده‌لاستیک	۱	--	۰٫۲۰ ۰٫۴۰ ۰٫۶۰	۲ + ۳ *	تعیین مقدار بهینه‌ی $h_{rs}/D$
۳		۲	۰٫۲۰	۰٫۴۰	۱ + ۱ *	بررسی تأثیر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک

\* آزمایش‌های تکراری



شکل ۱۴. تغییرات تنش - نشست پی برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ۱ و ۲ لایه‌ی تسلیح با مخلوط خاک - خرده‌لاستیک.

شکل ۱۳. تغییرات ظرفیت باربری با ضخامت لایه‌ی مسلح ( $h_{rs}/D$ ) در ترازهای مختلف از نشست پی.



شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت باربری با تعداد لایه‌های مختلف مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در ترازهای مختلف از نشست پی.

تغییرات ظرفیت باربری در مقابل ضخامت مخلوط ( $h_{rs}/D$ ) برای مقادیر مختلف از نسبت نشست پی ( $s/D = 2\%, 4\%, 6\%, 8\%, 10\%, 12\%$ ) در شکل ۱۳ ارائه شده است. در تمامی ترازهای نشست، با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک تا مقدار حدود  $0.4D$  ( $h_{rs}/D = 0.4$ )، ظرفیت باربری پی افزایش و پس از آن کاهش یافته است. به عنوان مثال، در تراز نشست  $6\%$  ( $s/D = 6\%$ )، ظرفیت باربری بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ضخامت‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ۶ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.2$ )، ۱۲ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) و ۱۸ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.6$ ) به ترتیب برابر ۳۰۹، ۳۷۱، ۳۹۵ و ۳۳۸ کیلواسکال هستند. در این حالت ظرفیت باربری بستر حاوی یک لایه مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ضخامت بهینه‌ی ۱۲ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) در مقایسه با ظرفیت باربری بستر غیرمسلح در حدود  $30\%$  افزایش یافته است. علت کاهش باربری بستر با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به حدود ۱۸ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.6$ )، تغییر رفتار بستر به رفتار نرم، کاهش مدول برشی، و شکل پذیرش بیش از حد آن است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت اگرچه تخلخل لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک صرف نظر از مقدار ضخامت آن ثابت است، اما قابلیت فشردگی آن افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش بیش از حد ضخامت لایه‌ی مخلوط، به جای بهبود در عملکرد آن در اندرکنش با لایه‌ی خاک بالا و پایین خود، موجب افزایش تراکم بستر زیر پی، افزایش نشست و کاهش باربری بستر می‌شود.

بنابراین ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک جهت بررسی تأثیر دو لایه‌ی مخلوط (آزمایش‌های سری ۳ در جدول ۳) برابر ۱۲ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) لحاظ شده است.

#### ۲.۴.۴. اثر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $N$ )

از آنجا که استفاده از یک لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با ضخامت بیشتر از ضخامت بهینه‌ی آن (بخش ۲.۴.۴) موجب کاهش باربری بستر می‌شود، لذا استفاده از مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در چندلایه را می‌توان با توجه به نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس مورد بررسی قرار داد. شکل ۱۴، تغییرات تنش - نشست پی برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با تعداد ۱ و ۲ ( $N = 1, 2$ ) لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با ضخامت ۱۲ سانتی‌متر ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) را با در نظر گرفتن مقادیر  $u/D = h/D = 0.2$  نشان می‌دهد. از آنجا که نتایج مربوط

به اثر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در آزمایش‌های کوچک‌مقیاس مبین تأثیر ناچیز استفاده از ۳ لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در مقایسه با استفاده از ۲ لایه است، لذا به منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه در آزمایش‌های مورد نظر با صفحه‌یی به قطر ۳۰ سانتی‌متر، فقط اثر ۲ لایه‌ی مخلوط در افزایش باربری بررسی شده است. مطابق شکل مذکور، اگرچه با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح (لایه‌ی مخلوط)، سختی و ظرفیت باربری سیستم برای یک میزان معین از نشست پی در مقایسه با حالت غیرمسلح افزایش قابل ملاحظه‌یی یافته است، اما با افزایش تعداد لایه‌ها از ۱ به ۲ لایه، نرخ بهبود در رفتار بستر در حال کاهش است. این امر تأییدی بر عدم ضرورت انجام آزمایش با ۳ لایه مخلوط خاک - خرده‌لاستیک است. جهت بررسی بهتر تأثیر تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در بهبود ظرفیت باربری پی در آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس، منحنی تغییرات باربری پی در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح برای ترازهای مختلف نشست شکل مذکور مشاهده می‌شود که صرف نظر از میزان نشست پی، ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌های تسلیح افزایش یافته است. به عنوان نمونه برای نسبت نشست



۲. ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در هر دو سری آزمایش‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس در حدود  $0.4$  قطر صفحه‌ی بارگذاری ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) به‌دست آمده است. این امر مبین عدم تأثیر نوع خاک، تراکم بستر، و ابعاد صفحه‌ی بارگذاری در مقدار بهینه‌ی ضخامت مخلوط است.

۳. ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در آزمایش کوچک‌مقیاس در حدود  $0.2$  قطر صفحه‌ی بارگذاری ( $h/D = 0.2$ ) به‌دست آمده است.

۴. با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، نرخ افزایش در بهبود باربری بستر کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که با افزایش تعداد لایه‌ها به بیش از ۳ لایه و خارج شدن آن‌ها از حوزه‌ی تأثیر تنش وارد بر پی، انتظار بهبود بیشتر در رفتار بستر وجود ندارد.

اگرچه نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند جنبه‌هایی از کاربرد خرده‌لاستیک در مخلوط با خاک را روشن کند، اما به هر منظور برای درک بیشتر رفتار مخلوط خاک - خرده‌لاستیک، توجه به این موارد در مطالعات آتی مناسب خواهد بود:

-- از آنجا که در آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس، مقدار  $h/D = 0.2$  براساس نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس و همچنین نتایج به‌دست آمده<sup>[۱۲]</sup> روی آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس انتخاب شده است، لذا بررسی بیشتر درخصوص مقدار بهینه‌ی آن در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

-- به منظور تعیین حوزه و عمق نفوذ تنش ناشی از بار وارده بر سطح بارگذاری، اندازه‌گیری تنش در عمق بستر و زیر سطح بارگذاری مفید است. این امر به دلیل محدودیت در تأمین فشارسنج در این پژوهش مقدور نشده است. در مجموع می‌توان گفت استفاده از لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک می‌تواند موجب پخش بار در سطح بیشتری شود و تنش انتقال‌یافته در عمق و به عبارتی حوزه‌ی نفوذ بار را کاهش دهد.

-- به‌منظور بررسی اثر اندازه‌ی ذرات خاک و نقش آن در رفتار پی می‌توان از انواع خاک با اندازه‌ی متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) مختلف در مطالعات آتی استفاده کرد.

-- از آنجا که فرسودگی دانه‌های لاستیک در مخلوط با خاک می‌تواند عملکرد مخلوط را تحت تأثیر قرار دهد، لذا در مطالعات آتی بررسی اثر این عامل در میزان باربری و نشست بستر مناسب توصیه می‌شود.

-- از آنجا که امکان تغییر در ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک با تغییر درصد خرده‌لاستیک وجود دارد، لذا انجام مطالعات بیشتر جهت بررسی این موضوع مفید خواهد بود.

## علائم اختصاری

$D$ : قطر صفحه بارگذاری؛

$u$ : پوشش خاک روی اولین لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک؛

$h$ : فاصله‌ی بین دو لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک؛

$N$ : تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک؛

$h_{rs}$ : ضخامت لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک؛

$D_r$ : چگالی نسبی خاک؛

$s$ : نشست پی.

$s/D = 0.6$ ، ظرفیت باربری برای بستر غیرمسلح و بستر مسلح با ۱ و ۲ لایه مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ترتیب حدود ۳۰۹، ۳۹۵ و ۴۴۸ کیلوپاسکال است. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک از ۰ به ۱ لایه، میزان افزایش حدود ۲۸٪ و از ۱ به ۲ لایه حدود ۱۳/۵٪ است. در مجموع افزایش در باربری بستر به علت تسلیح با لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک را می‌توان به افزایش فشار همه‌جانبه، جلوگیری از حرکت جانبی لایه‌های بستر و در نتیجه افزایش مقاومت برشی بستر در لایه‌های مختلف آن در مقایسه با بستر غیرمسلح نسبت داد.

## ۵. مقایسه‌ی آزمایش‌های کوچک‌مقیاس با آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس

درخصوص مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس (مدل پی با قطر ۱۱/۳۱ سانتی‌متر) و بزرگ‌مقیاس (مدل پی با قطر ۳۰ سانتی‌متر)، این موارد بیان شده است:

۱. اگرچه نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس از نظر کمی تفاوت قابل توجهی دارند، اما رفتار تنش - نشست مدل پی و تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار بستر در هر دو آزمایش از نظر کیفی یکسان است.

۲. اختلاف در میزان باربری پی در دو آزمایش کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس در شرایط یکسان از نسبت ضخامت مخلوط خاک - خرده‌لاستیک ( $h_{rs}/D$ ) و نسبت ضخامت خاک بین دو لایه‌ی مخلوط ( $h/D$ ) را می‌توان به تفاوت قطر مدل پی و تفاوت نوع خاک (با به‌عبارتی مدول برشی دو نوع خاک) در دو حالت آزمایش کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس نسبت داد.

۳. نسبت ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به قطر مدل پی در هر دو حالت یکسان و برابر  $0.4$  ( $h_{rs}/D = 0.4$ ) است. این امر نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ی  $h_{rs}/D$  مستقل از ابعاد مدل پی و توزیع اندازه‌ی ذرات خاک است.

۴. روند تأثیر افزایش تعداد لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در افزایش باربری و نشست بستر در هر دو حالت یکسان است.

به هر حال بررسی بیشتر جهت دستیابی به ارتباط نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس، با انجام آزمایش روی قطرهای مختلف از پی در مطالعات آتی مفید خواهد بود.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از انجام آزمایش‌های موردنظر، از یک طرف بررسی تأثیر استفاده از لایه‌های مخلوط خاک - خرده‌لاستیک در باربری و نشست بستر و از طرف دیگر مقایسه‌ی کیفی رفتار بستر در دو حالت کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس (مقایسه‌ی نسبت ضخامت بهینه به قطر صفحه‌ی بارگذاری) تحت بارگذاری استاتیکی است. در این خصوص، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. با قرارگیری یک لایه مخلوط خاک - خرده‌لاستیک به ضخامت بهینه ( $h_{rs}$ ) در عمق بهینه ( $u/D$ )، ظرفیت باربری پی در یک میزان نشست مشخص در مقایسه با بستر غیرمسلح افزایش و نشست آن در یک میزان باربری مشخص در مقایسه با بستر غیرمسلح کاهش می‌یابد.

## پانوشتها

1. footing settlement
2. number of rubber-soil mixture layers
3. height of rubber-soil mixture layer
4. relative density
5. Plexiglass
6. loading plate diameter

## منابع (References)

1. Rubber Manufacturers Association, RMA, (2013). (<http://www.rma.org>)
2. Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Eldin, N.N. "Construction and performance of a shredded waste tire test embankment", *Transportation Research Record*, Washington, D.C., **1345**, pp. 44-52 (1993).
3. 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 (2006).
4. Feng, Z.Y. and Sutter, K.G. "Dynamic properties of granulated rubber sand mixtures", *Geotech. Test. J.*, **23**(3), pp. 338-344 (2000).
5. Munnoli, P.M., Sheikh, S., Mir, T., Kesavan, V. and Jha, R. "Utilization of rubber tyre waste in subgrade soil", *In Global Humanitarian Technology Conference*, South Asia Satellite (GHTC-SAS), pp. 330-333 (2013).
6. Yoon, Y.W., Cheon, S.H. and Kang, D.S. "Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(5), pp. 439-453 (2004).
7. Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N.Z. and Kim, B. "Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material", *Waste Management*, **26**(9), pp. 1033-1044 (2006).
8. Moghaddas Tafreshi, S.N., Tavakoli Mehrjardi, Gh. and Dawson, A.R. "Buried pipes in rubber-soil back-filled trenches under cyclic loading", *Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE*, **138**(11), pp. 1346-1356 (2012).
9. Prasad, D.S.V. and Prasada Raju, G.V.R. "Performance of waste tyre rubber on model flexible pavement", *ARPJ, Journal of Engineering and Applied Sciences*, **4**(6), pp. 89-92 (2009).
10. 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).
11. Edinçliler, A. and Cagatay, A. "Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions", *Geosynthetic International*, **20**(1), pp. 39-46 (2013).
12. Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. and Dawson, A.R. "Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced", *Geosynthetic International*, **20**(3), pp. 143-161 (2013).
13. American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D2487-11 (2011).
14. American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D1557-12 (2012).
15. Hsieh, C. and Mao, L. "A bench-scale performance test for evaluation of the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", *Geosynthetic Research and Development in Progress*, pp. 1-11 (2008).
16. Moghaddas Tafreshi, S.N., Tavakoli Mehrjardi, Gh. and Ahmadi, M. "Experimental and numerical investigation on circular footing subjected to incremental cyclic loads", *International Journal of Civil Engineering*, Iran, **6**(4), pp. 265-274 (2011).
17. Boussinesq, J. "Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques", Albert Blanchard, Paris, (Reprinted, 1969 with an introduction by A. Caquot, Gauthier-Villars, Paris) (1885). (in French)
18. American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ASTM D1196-12 (2012).