

بررسی آزمایشگاهی رفتار پی رینگی مستقر بر خاک مسلح شده با خرده‌لاستیک دانه‌یی و ژئوگرید تحت بار تکراری

محمدحسین کیقبادی (دانشجوی دکتری)

عادل عساکره* (استادیار)

بهزاد کلانتری (استادیار)

مسعود دهقانی (استادیار)

دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه هرمزگان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹)
دوره ۲ - شماره ۱/۱، ص. ۵۵-۴۵

در پژوهش حاضر رفتار پی‌های رینگی مستقر بر بستر ماسه‌یی مسلح شده با خرده‌لاستیک و ژئوگرید در برابر سطوح مختلف بارهای تکراری ناشی از پر و خالی شدن مخزن با استفاده از آزمایش‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزودن یک لایه مخلوط خاک و خرده‌لاستیک در ترکیب با ژئوگرید می‌تواند نشست‌های خمیری پی را تا ۶۳/۵٪ کاهش داده و باعث عملکرد ارتجاعی‌تر سیستم شود، به‌گونه‌یی که نسبت (سهام) نشست کشسانی از ۵/۸۵٪ در خاک غیرمسلح تا ۲۴/۲٪ در خاک مسلح افزایش یابد. همچنین ضخامت بهینه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک در هر دو حالت حضور یا عدم حضور ژئوگرید برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، استفاده‌ی همزمان از مسلح‌کننده‌های خرده‌لاستیک و ژئوگرید تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد پی رینگی دارد.

mhkeyghobadi@yahoo.com
asakereh@hormozgan.ac.ir
behzad996@yahoo.com
masouddehghani38@gmail.com

واژگان کلیدی: پی رینگی، ماسه، خرده‌لاستیک، بار تکراری، نشست پی.

۱. مقدمه

از پی‌های رینگی به‌عنوان پی‌سازه‌های خاص همچون مخازن ذخیره‌سازی نفت و گاز و دیگر سیالات، آتن‌های تلویزیونی، دودکش‌ها، راکتورهای اتمی و برج‌های ارتباطی استفاده می‌شود. بنابراین این‌گونه از پی‌ها با توجه به نوع کاربری آن‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. از نظر ظاهری پی‌های رینگی و دایروی به یکدیگر شبیه‌اند، ولی واقعیت این است که عملکرد پی‌های رینگی در مقایسه با پی‌های دایروی به دلیل نحوه‌ی توزیع تنش در زیر این پی‌ها متفاوت بوده و در صورت استفاده از پی‌های رینگی با مشخصات بهینه، این پی‌ها عملکرد بهتری نسبت به پی‌های دایروی دارند. مثلاً در تحقیقی که در سال ۲۰۱۷ صورت گرفت، ظرفیت باربری نهایی از ۵۵۵ کیلوپاسکال برای پی دایروی به ۶۵۵ کیلوپاسکال برای پی رینگی با قطر خارجی معادل (و نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴)، افزایش یافته است.^[۱] همچنین، با توجه این که در ساخت پی‌های رینگی از مصالح کم‌تری نسبت به پی‌های دایروی با قطر معادل استفاده می‌شود، استفاده از پی‌های رینگی توجیه اقتصادی بیشتری دارد. چنان که گفته شد استفاده از پی رینگی با مشخصات بهینه، باعث بهبود عملکرد این‌گونه پی‌ها می‌شود. یکی از این پارامترهای مهم که نقش

بسرایی در بهبود عملکرد این پی‌ها دارد، نسبت قطر داخلی (d) به قطر خارجی (D) پی‌های رینگی است که مقدار آن در مطالعات مختلف در حدود ۰/۴ به دست آمده است.^[۲-۴] همچنین یکی دیگر از پارامترهای مهم مؤثر در بهبود عملکرد پی رینگی، زبری کف پی است که با افزایش آن ضریب ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.^[۵-۶] کوپیدن لایه‌های زیرین پی رینگی و متراکم کردن آن نیز از دیگر عوامل مؤثر در بهبود عملکرد این پی‌ها و مخصوصاً کاهش نشست پی است.^[۷] مثلاً در تحقیقی که در سال ۲۰۱۲ روی پی‌های رینگی مستقر بر بستر ماسه‌یی با تراکم مختلف صورت گرفت، با افزایش چگالی نسبی یک لایه ماسه (که ضخامت آن برابر با قطر خارجی پی رینگی است) نشست پی تا ۷۳/۶٪ کاهش یافت.^[۸] علاوه بر موارد ذکر شده، افزودن مسلح‌کننده‌هایی همچون ژئوستتیک‌ها به بستر پی‌های رینگی می‌تواند تأثیر خوبی در بهبود عملکرد این پی‌ها (افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست) داشته باشد. به‌خصوص با بهینه کردن پارامترهایی نظیر فاصله‌ی اولین لایه‌ی مسلح‌کننده تا زیر پی، فاصله‌ی بین لایه‌ها، عرض لایه‌ها و تعداد لایه‌ها، می‌توان انتظار داشت ظرفیت باربری پی رینگی چندین برابر بهتر از حالت غیرمسلح شود.^[۹]

یکی از راه‌هایی که باعث بهبود عملکرد بسترهای خاکی می‌شود، افزودن با همان مخلوط‌سازی خرده‌لاستیک با خاک است. در مطالعه‌یی که در سال ۲۰۰۵ با استفاده از آزمایش سه‌محوری روی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک صورت گرفت،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۳۰، پذیرش ۱۳۹۷/۴/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.50302.2296

مشخص شد افزودن خرده‌لاستیک به خاک می‌تواند باعث افزایش پارامترهای مربوط به مقاومت برشی خاک از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شود.^[۸] طبق مطالعات قبلی پارامترهایی نظیر وزن واحد حجم مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، نسبت ابعاد دانه‌های خرده‌لاستیک، درصد خرده‌لاستیک و همچنین نوع خرده‌لاستیک تأثیر بسزایی در بهبود رفتار خاک دارند.^[۸-۱۲]

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که خرده‌لاستیک‌ها از لاستیک‌های مستعمل تهیه می‌شوند و بنابراین استفاده از این مواد دور ریز علاوه بر فواید یاد شده، می‌تواند کمک شایانی در حفاظت از محیط زیست باشد. لازم به ذکر است سالانه حجم زیادی از لاستیک‌های مستعمل تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از آن در طبیعت رها شده و باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند.^[۱۳] نتایج پژوهش‌ها روی پی‌های مستقر بر بسترهای مسلح شده با خرده‌لاستیک نشان می‌دهد، مسلح‌سازی بسترهای خاکی با خرده‌لاستیک می‌تواند سبب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست انواع پی‌ها (مربعی، دایروی و نواری) شود.^[۱۴-۱۶] نتایج دو تحقیق در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ نشان می‌دهد ضخامت بهینه لایه مسلح شده با خرده‌لاستیک در زیر پی‌های مربعی و دایروی به ترتیب ۵/۷ و ۴/۰ برابر بعد پی است و در صورت استفاده از این مقادیر ظرفیت باربری در یک نشست مشخص از پی به صورت چشم‌گیری (از ۲۷٪ تا ۲۰۶٪ نسبت به حالت غیرمسلح) افزایش می‌یابد و چنانچه از ضخامتی بیشتر از ضخامت بهینه استفاده شود تأثیر استفاده از لایه مسلح خاک و خرده‌لاستیک، به دلیل افزایش قابلیت فشردگی پذیری، کاهش می‌یابد.^[۱۴-۱۵] پژوهش‌های فوق روی پی‌های تحت بار استاتیکی صورت گرفته است. اما پژوهش‌هایی نیز روی پی‌ها تحت بار تکراری صورت گرفته که نشان می‌دهد افزودن یک یا چند مسلح‌کننده در ترکیب با یکدیگر به بستر زیرین پی‌ها می‌تواند تأثیر مهمی بر کاهش نشست پی در برابر بارها داشته باشد. مثلاً نتایج یک تحقیق در سال ۲۰۱۱ که با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس روی پی مربعی تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است، نشان می‌دهد که استفاده از ژئومش (Geomesh) به تنهایی یا در ترکیب با انکر سیستم ترکیبی گرید - انکر (Grid-Anchor) به عنوان مسلح‌کننده در بستر زیرین پی، می‌تواند نشست‌های دائمی ماندگار را به ترتیب ۲۴ و ۳۰ درصد نسبت به حالت غیر مسلح کاهش داده و همچنین تعداد چرخه رسیدن به شرایط پایدار (از لحاظ نشست) را کاهش دهد. البته، استفاده از سیستم ترکیبی گرید - انکر تأثیر بیشتری نسبت به سیستم ژئومش به تنهایی، در کاهش نشست‌های دائمی داشته است.^[۱۷]

در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۴ مطالعاتی روی پی دایروی با قطر ۳۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری چرخه‌ای و مستقر بر یک چال آزمایش به ابعاد 2000×2000 میلی‌متر (که در بستر طبیعی زمین حفر شده بود)، انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تغییر شکل‌های خمیری در اثر استفاده از لایه‌های ژئوسل به تنهایی و در ترکیب با لایه‌های خرده‌لاستیک به ترتیب ۵۷٪ و ۶۸٪ نسبت به خاک غیر مسلح کاهش می‌یابد. همچنین سهم نشست‌های کشسانی از نشست‌های کلی، از ۴۶٪ در خاک غیر مسلح به ۲۲/۶۶٪ در اثر افزودن لایه‌های مسلح‌سازی افزایش می‌یابد.^[۱۸] در واقع استفاده از لایه مسلح خاک و خرده‌لاستیک یا لایه مسلح‌کننده ژئوسل (Geocell) به تنهایی و به صورت ترکیبی در بستر زیرین پی، می‌تواند باعث کاهش تغییر شکل‌های کلی و خمیری شده و با افزایش سهم نشست‌های کشسانی باعث شود سیستم ارتجاعی‌تر عمل کرده و قدرت جذب انرژی بالاتری داشته باشد.^[۱۸-۲۰]

در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت پی‌های رینگ و با توجه به مطالب یاد شده، رفتار این‌گونه از پی‌ها در برابر بارهای تکراری و همچنین میزان تأثیر استفاده از

مسلح‌کننده‌هایی همچون خرده‌لاستیک و ژئوگرید (به صورت مجزا و در ترکیب با یکدیگر) در بستر ماسه‌ی زیرین پی بر بهبود عملکرد این‌گونه از پی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا یک سری آزمایش‌های اولیه بر روی پی رینگ مستقر بر بستر ماسه‌ی غیرمسلح انجام گرفت و سپس مجموعه آزمایش‌های دیگری با همان پی بر بستر ماسه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک دانه‌ی، صورت پذیرفت تا تأثیر این افزودنی بر رفتار پی رینگ در برابر بار تکراری مشخص شود. در آخرین سری از آزمایش‌ها تأثیر افزودن یک لایه ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با مخلوط خاک و خرده‌لاستیک بر رفتار پی رینگ در برابر بارهای تکراری مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است تأثیر ضخامت لایه مسلح خاک و خرده‌لاستیک که یکی از مهم‌ترین پارامترهاست، در هر دو شرایط حضور و عدم حضور لایه ژئوگرید مورد ارزیابی قرار گرفته است.

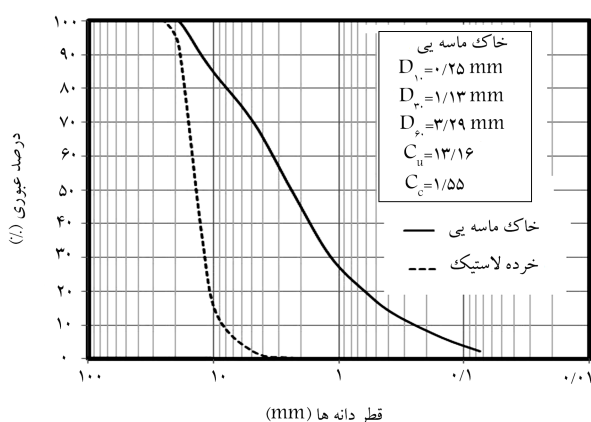
۲. مصالح مورد استفاده در آزمایش

در تمامی آزمایش‌ها از یک نوع خاک ماسه‌ی برای پر کردن چاله‌ی آزمایش که به طول و عرض ۲۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹۰ میلی‌متر در بستر طبیعی زمین حفر شده بود، استفاده شد که با توجه به سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM ۲۴۸۷-۱۱) (D)^[۲۱] این خاک از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده است. مشخصات این خاک و دانه‌بندی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

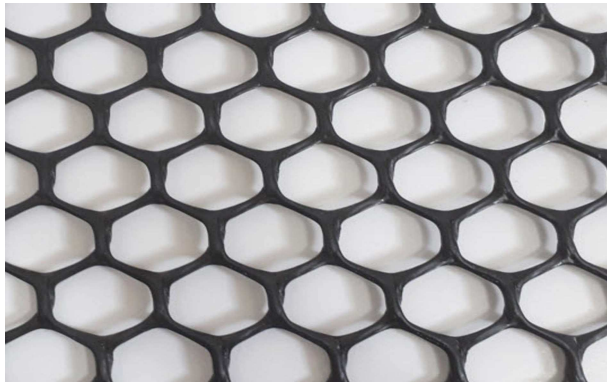
خرده‌لاستیک مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع خرده‌لاستیک دانه‌ی است که عاری از هرگونه مواد زائد (سیم و نخ) است. لازم به ذکر است استفاده از این نوع خرده‌لاستیک به‌عنوان مسلح‌کننده در ترکیب با خاک برای بهبود رفتار بستر خاکی

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک.

پارامتر	مقدار
اندازه‌ی موثر دانه‌ها (D_{10})	۰٫۲۵ mm
اندازه‌ی متوسط دانه‌ها (D_{50})	۲٫۳۵ mm
ضریب یکنواختی (C_u)	۱۳٫۱۶
ضریب دانه‌بندی (C_c)	۱٫۵۵
نسبت تخلخل بیشینه (e_{max})	۰٫۷۴
نسبت تخلخل کمینه (e_{min})	۰٫۳
درصد رطوبت (w)	۵٫۴٪
زاویه‌ی اصطکاک (ϕ)	۴۱٫۷°



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه و خرده‌لاستیک.



شکل ۳. ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش‌ها.



شکل ۲. خرده‌لاستیک دانه‌یی مورد استفاده در آزمایش‌ها.

لازم به ذکر است که ابعاد ترانسه به‌گونه‌یی انتخاب شده است که فضای کافی برای اجرای بخش‌های مختلف آزمایش از قبیل حفر ترانسه، اجرای لایه‌های مختلف خاک غیرمسلح و همچنین لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک و کوبیدن این لایه‌ها با استفاده از فشرده‌ساز بنزینی (که دارای صفحه‌ی 40×40 سانتی‌متری است)، مهیا بوده و همچنین امکان تخلیه و پرکردن ترانسه در زمان مناسب توسط نیروی انسانی وجود داشته باشد. با توجه به این که طول و عرض ترانسه در حدود ۷ برابر بعد صفحه‌ی بارگذاری است، مرزهای جانبی نمی‌تواند تأثیر چندانی بر نتایج داشته باشد.^[۲۴-۲۶] مشاهدات میدانی نیز نشان می‌دهد که سطح خاک برآمده در اطراف پی در فاصله‌ی کم‌تر از دو برابر قطر خارجی پی از محیط پیرامونی آن گسترش یافته و بنابراین اثر مرزی دیواره‌های ترانسه بسیار ناچیز است. همچنین با توجه به این که عمق ترانسه بیش از سه برابر بعد صفحه‌ی بارگذاری است، مرز پایینی (کف) ترانسه نیز نمی‌تواند تأثیر چندانی بر نتایج داشته باشد.^[۲۷] روابط موجود در زمینه‌ی تنش انتشار یافته در زیر مرکز یک سطح بارگذاری رینگ‌ی نیز نشان می‌دهد که تنش انتشار یافته در این عمق (۹۹۰ میلی‌متر) در حدود ۰/۱ تنش اعمالی روی سطح پی رینگ‌ی است که بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است و تأثیر چندانی بر نتایج آزمایش ندارد.^[۲۸] یک شمای کلی از آزمایش‌ها و دستگاه مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است. غیر از لایه‌ی کلاهی که با ضخامت ۹۰ میلی‌متر به‌عنوان بالاترین لایه‌ی خاکی اجرا می‌شود، بقیه‌ی لایه‌ها اعم از لایه‌های خاکی و لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک با ضخامت ۷۵ میلی‌متر در چاله‌ی مذکور ریخته شده و با استفاده از یک فشرده‌ساز بنزینی که عمق تأثیر آن بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر است، کوبیده می‌شود (شکل ۵). با توجه به عمق تأثیر فشرده‌ساز و ضخامت لایه‌های اجرایی، اولاً این فشرده‌ساز برای کوبیدن لایه‌هایی با ضخامت مذکور مناسب است و ثانیاً کوبیدن لایه‌های بالایی تأثیر زیادی بر تراکم لایه‌های پایینی نخواهد داشت. لازم به ذکر است که لایه‌های خاکی و لایه‌های خاک و خرده‌لاستیک هرکدام به ترتیب با دو و سه بار عبور فشرده‌ساز به بیشینه‌ی وزن مخصوص خود رسیده و عبور بیشتر فشرده‌ساز تأثیر چندانی بر افزایش وزن مخصوص این لایه‌ها نداشته است. میزان متوسط وزن مخصوص لایه‌های خاکی و لایه‌های مخلوط خاک و خرده‌لاستیک پس از عملیات تراکم، با استفاده از انجام حداقل سه آزمایش متوالی مخروط ماسه (ASTM-D1556/D1556M-15)^[۲۹] تعیین شد (جدول ۲). چنان که در جدول ۲ مشاهده می‌شود وزن مخصوص به دست آمده برای مخلوط خاک و خرده‌لاستیک به میزان قابل توجهی کم‌تر از وزن مخصوص به دست آمده برای خاک غیرمسلح است که این ناشی از سبک بودن دانه‌های لاستیک است. لازم به ذکر است برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه و جلوگیری از تعدد بیش از

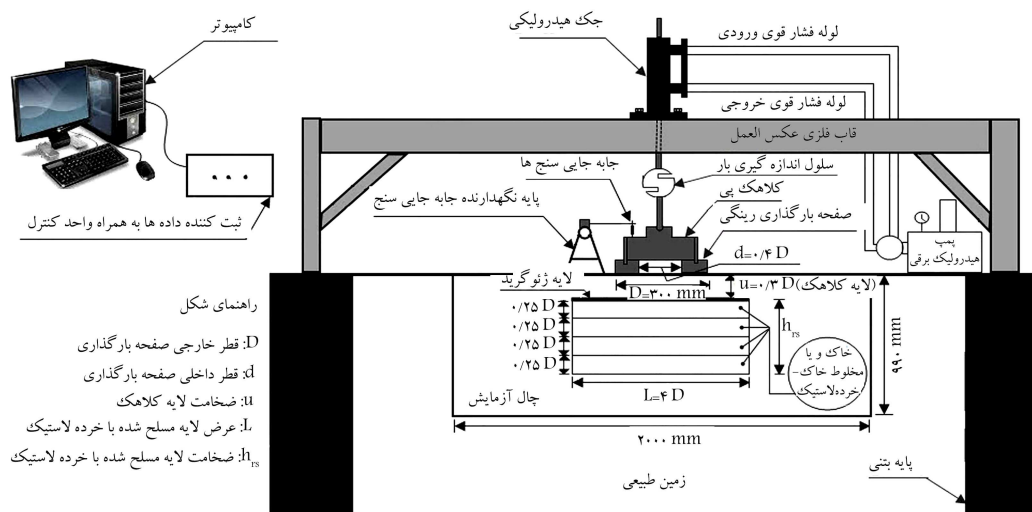
در آزمایش‌های بارگذاری صفحه تحت بار استاتیکی و تکراری (که توسط پژوهشگران قبلی انجام شده)، بسیار مؤثر بوده است.^[۱۵، ۱۸، ۲۰] همچنین مخلوط‌سازی این نوع از خرده‌لاستیک با خاک به‌راحتی توسط مخلوط‌کن (mixer) انجام می‌پذیرد و از این جهت در پروژه‌های واقعی بسیار سودمند است. اندازه دانه‌های خرده‌لاستیک مذکور از ۲ تا ۲۰ میلی‌متر بوده و اندازه قطر متوسط دانه‌ها ۱۴ میلی‌متر است. بر اساس نتایج تحقیق انجام شده در سال ۲۰۰۵ که با استفاده از پی‌هایی با اندازه‌های مختلف و مستقر بر بستری با دانه‌بندی مختلف (از ریزدانه تا درشت‌دانه) صورت گرفت، اگر قطر صفحه‌ی بارگذاری بزرگ‌تر از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات خاک باشد، دیگر قطر صفحه‌ی بارگذاری تأثیر چندانی مهمی بر نشست‌های سطحی نخواهد داشت.^[۲۱] نتایج پژوهش‌های دیگر نیز که روی انواع مخلوط خاک و خرده‌لاستیک صورت گرفت، نشان می‌دهد که در صورت رعایت معیار فوق، قطر صفحه‌ی بارگذاری تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و نتایج از تکرارپذیری خوبی برخوردارند.^[۱۹، ۲۳، ۲۴]

همچنین در سال ۲۰۱۶ طی چند سری مطالعات آزمایشگاهی که روی پی‌های مدل کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس مستقر بر مخلوط انواع خاک (ریزدانه و درشت‌دانه) در ترکیب با خرده‌لاستیک صورت گرفت، مشخص شد که چون در هر دو آزمایش کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس، معیار فوق (بزرگ‌تر بودن قطر صفحه‌ی بارگذاری از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات) رعایت شده، قطر صفحه‌ی بارگذاری تأثیری بر نتایج آزمایش نداشته است. مثلاً در هر دو آزمایش کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک، ۰/۴ برابر قطر پی به دست آمده است.^[۲۵] لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌های تحقیق حاضر، قطر خارجی صفحه‌ی بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر است که بزرگ‌تر از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات خاک و خرده‌لاستیک است. با توجه به مطالب گفته شده نگرانی خاصی در مورد اثر بعد صفحه‌ی بارگذاری وجود ندارد. منحنی دانه‌بندی و شکل خرده‌لاستیک مورد استفاده به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع CE۱۳۱ و از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) است (شکل ۳)؛ ابعاد چشمه‌ی این ژئوگرید 27×27 میلی‌متر و مقاومت کششی آن ۵/۸ کیلو نیوتن بر متر است.

۳. دستگاه انجام آزمایش، آماده‌سازی آزمایش و نحوه‌ی

بارگذاری

چنان که در بخش قبل بیان شد، آزمایش‌ها روی چاله‌یی به طول و عرض ۲۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹۰ میلی‌متر که در بستر طبیعی زمین حفر شده بود، انجام شد.



شکل ۴. شمای کلی از آزمایش ها و دستگاه مربوط.

قبلی که روی پی رینگگی صورت گرفت، به ترتیب $0.3D$ و $4D$ قطر خارجی پی رینگگی است) در نظر گرفته شد. [۷۴] لازم به ذکر است طبق نتایج حاصل از مطالعات پژوهشگران قبلی روی پی های مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک، وجود یک لایه ی خاکی غیرمسلح به عنوان کلاهک روی لایه ی مسلح شده با خرده لاستیک می تواند اثرات مثبت این لایه ی مسلح را افزایش دهد. [۲۳،۱۳] بنابراین در پژوهش حاضر نیز از یک لایه ی خاک غیرمسلح به عنوان لایه ی کلاهک روی لایه ی مسلح شده با خرده لاستیک استفاده شده است. چنان که در شکل ۴ مشاهده می شود سیستم بارگذاری متشکل از قسمتهای مختلفی از قبیل قاب فلزی به همراه پایه های بتنی برای تأمین نیروی عکس العمل، چک هیدرولیکی به ظرفیت 10^6 تن به همراه شیلنگ های رفت و برگشت برای اتصال به یک پمپ هیدرولیکی برقی برای باز و بسته شدن چک (به منظور بارگذاری و باربرداری)، سلول اندازه گیری بار (نصب شده در مسیر بارگذاری) با دقت 0.01% و ظرفیت $15 kN$ و در نهایت یک سیستم انتقال بار شامل شفت بارگذاری (نصب شده در زیر سلول اندازه گیری بار) و کلاهک پی (قرار گرفته در زیر شفت بارگذاری) برای انتقال بار به صفحه ی رینگگی بارگذاری است.

لازم به ذکر است که انتهای شفت بارگذاری کروی است که در قسمت فوقانی کلاهک پی که کاسه یی شکل است می نشیند تا اجازه ی حرکت آزادانه به صفحه ی بارگذاری و نشست های نامتقارن احتمالی آن را بدهد. همچنین قسمت تحتانی کلاهک پی از یک لوله ی فلزی فولادی ساخته شده که در داخل شیار تراشیده شده روی صفحه ی بارگذاری قرار می گیرد. صفحه ی بارگذاری نیز یک صفحه ی رینگگی فولادی صلب با ضخامت $25/4$ میلی متر و قطر خارجی $300 D$ میلی متر است. دو جابه جایی سنج (LVdt) با دقت 0.01% در محدوده ی 100 میلی متر، در دو طرف صفحه ی بارگذاری با استفاده از پایه ی نگه دارنده ی مستقل نصب شد تا بتوان میزان نشست سطحی صفحه ی بارگذاری را ثبت کرد. لازم به ذکر است که ابزارهای اندازه گیری پس از هر سری انجام آزمایش کالیبره می شدند تا دقت خود را حفظ کنند. یک تصویر واقعی از دستگاه آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است؛ از یک ثبت کننده داده ها برای ثبت داده ها استفاده شده است که این ثبت کننده ی داده ها می تواند اطلاعات ورودی را با سرعت یک نمونه در ثانیه به صورت همزمان از هر یک از ابزارهای اندازه گیری ثبت کرده و به عنوان خروجی به رایانه انتقال



شکل ۵. تصویری از کوبیدن بستر با فشرده ساز بنزینی.

جدول ۲. وزن مخصوص لایه های مختلف پس از تراکم با فشرده ساز.

متوسط وزن مخصوص (kN/m^3)	نوع لایه
۱۸۱۲*	خاک غیرمسلح
۱۳۱۲	مخلوط خاک - خرده لاستیک

* درجه تراکم تقریبی خاک غیرمسلح 90% می باشد.

اندازه ی پارامترهای مورد بررسی که گیج کننده است و باعث ازدیاد بیش از حد تعداد آزمایش ها می شود، در آزمایش های مربوط به پژوهش حاضر، از مقدار بهینه ی برخی از پارامترها از قبیل درصد بهینه ی خرده لاستیک در مخلوط خاک و خرده لاستیک، و نیز عمق مدفون و عرض بهینه ی لایه ی مسلح کننده که توسط پژوهشگران قبلی به دست آمده، استفاده شده است.

در این راستا در پژوهش حاضر، درصد وزنی خرده لاستیک دانه یی در مخلوط خاک و خرده لاستیک برابر با 8% وزنی کل مخلوط که به عنوان مقدار بهینه در آزمایش های بارگذاری صفحه به دست آمده بود [۲۴] انتخاب شد. همچنین عمق مدفون لایه ی مسلح کننده (که برابر با ضخامت لایه ی کلاهک یا همان بالاترین لایه ی خاکی نشان داده شده در شکل ۴ است) و عرض بهینه ی لایه ی مسلح کننده (که در شکل ۴ نشان داده شده است) با توجه به نتایج حاصل از مطالعات پژوهشگران

جدول ۳. برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها.

سری آزمایش	نوع بستر پی	تعداد لایه ژئوگرید	نسبت ضخامت لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک به قطر خارجی پی (h_{rs}/D)	تعداد آزمایش	هدف آزمایش
۱	غیرمسلح	-	-	۱ + ۱ *	برای مقایسه‌ی با خاک مسلح
۲	مسلح شده با خرده‌لاستیک	-	۱۰/۷۵، ۵۰/۵۰، ۲۵/۵۰	۳ + ۴ *	برای یافتن اثر خرده‌لاستیک و ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مسلح شده با آن
۳	مسلح شده با خرده‌لاستیک و ژئوگرید	۱	۱۰/۷۵، ۵۰/۵۰، ۲۵/۵۰	۴ + ۵ *	برای یافتن اثر ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با خرده‌لاستیک و یافتن ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک در حضور لایه‌ی ژئوگرید

* آزمایش‌های تکراری

شود. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که فشار مربوط به نسبت نشست ۱۲٪ تقریباً برابر با ۸۴۰ کیلوپاسکال است (لازم به ذکر است نمودار بار - نشست مربوط به این آزمایش برای پرهیز از اطاله‌ی کلام در اینجا نشان داده نشده است). برای انجام آزمایش‌های چرخه‌ی فشار مذکور به سه سطح ۲۴۰، ۵۶۰ و ۸۴۰ کیلوپاسکال تقسیم شده تا سطوح مختلف پر و خالی شدن مخزن مستقر بر پی رینگی شبیه‌سازی شود و همچنین تأثیر مسلح‌کننده‌ها در سطوح مختلف بارگذاری تکراری مشخص شود. برای هر سطح از بارگذاری ۱۰ چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری در نظر گرفته شد که نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد این تعداد از چرخه برای رسیدن به شرایط پایدار کافی است و تعداد چرخه‌ی بیشتر تأثیر چندانی بر تغییر شکل بستر پی نخواهد داشت. سرعت بارگذاری و باربرداری در تمام طول آزمایش ثابت و برابر با ۱ کیلوپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شد که توسط واحد کنترل و نرم‌افزار مربوط به آن در رایانه به سیستم اعمال شد.



شکل ۶. تصویر واقعی از دستگاه آزمایش.

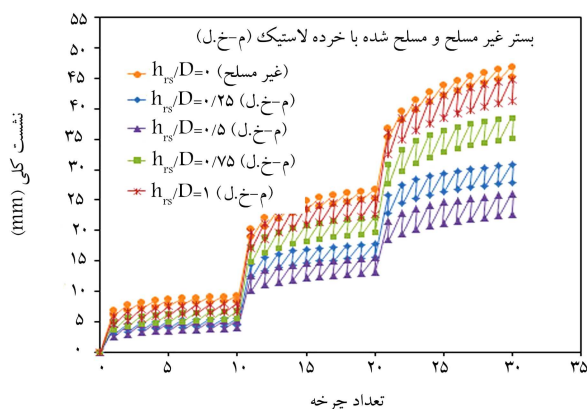
۴. برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها

سه سری آزمایش پی رینگی تحت بار تکراری مشتمل بر ۱۸ آزمایش به ترتیب روی بستر غیرمسلح، بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (بدون حضور ژئوگرید) و بستر مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده‌لاستیک انجام گرفت تا اثر هر یک از مسلح‌کننده‌ها به تنهایی و در ترکیب با یکدیگر مشخص شود. همچنین اثر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک در هر دو شرایط حضور و عدم حضور ژئوگرید مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات و اهداف مربوط به آزمایش‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ۸ آزمایش از ۱۸ آزمایش مذکور، آزمایش‌های تکراری برای سنجش تکرارپذیری و قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها بوده است. تفاوت بین نتایج حاصل از آزمایش‌های اصلی و تکراری در حدود ۴ تا ۸ درصد بوده که برای پروژه‌های ژئوتکنیکی مناسب به نظر می‌رسد.

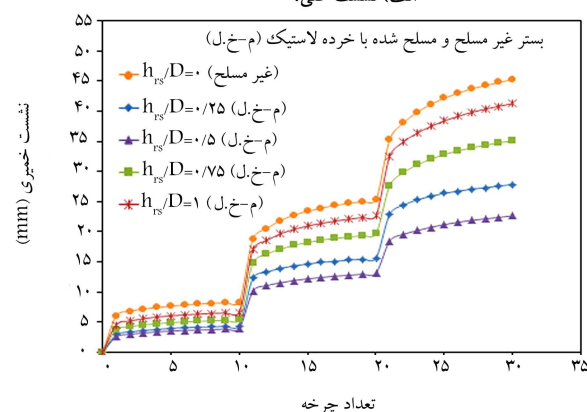
چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، آزمایش‌های سری اول روی بستر خاکی غیرمسلح صورت پذیرفت تا با مقایسه‌ی این آزمایش‌ها و آزمایش‌های مربوط به بستر خاکی مسلح میزان تأثیر مسلح‌شدن مشخص شود. سری دوم آزمایش‌ها روی بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (بدون حضور لایه‌ی ژئوگرید) انجام گرفت تا تأثیر مسلح

دهد. یک واحد کنترل در داخل محفظه‌ی ثبت‌کننده‌ی داده‌ها کار گذاشته شد که می‌توانست با کمک نرم‌افزار مخصوص نصب شده روی رایانه، مسیر بارگذاری و باربرداری و مقدار و سرعت آن را برای سیستم تنظیم کند. در تمام زمان‌های انجام آزمایش مسیر بارگذاری وارده توسط کاربر، و بارقنات شده توسط سلول اندازه‌گیری بار به صورت همزمان در نمایش‌گر رایانه نشان داده می‌شد تا صحت و دقت بار وارده کنترل شود.

در مورد مسیر بارگذاری وارده باید گفت که در بسیاری از پژوهش‌های قبلی درخصوص بهبود رفتار پی در اثر استفاده از مسلح‌کننده‌ها، تمرکز اصلی روی میزان بهبود ظرفیت باربری بدون توجه به محدودیت‌های مربوط به نشست بوده است.^[۳۰-۳۲] این موضوع باعث می‌شود که مقایسه‌ها بین رفتار خاک مسلح و غیرمسلح در نسبت‌های نشست (نسبت نشست پی به قطر یا عرض پی) غیرهمسان انجام پذیرد و در ضمن مقایسه‌ها بعضاً در نسبت‌های نشست بسیار بالا (حتی تا ۴۰٪ و ۵۰٪) و غیرکاربردی و غیرمعمول صورت بگیرد. برخی از پژوهشگران رفتار پی را در محدوده‌ی نسبت‌های نشست واقعی کاربردی، مثلاً کم‌تر از ۱۲٪، بررسی کردند.^[۳۵] در پژوهش پیش رو یک آزمایش استاتیکی اولیه با استفاده از یک پی رینگی مستقر بر بستر غیرمسلح صورت گرفت تا فشار وارده مربوط به نسبت نشست (میزان نشست به قطر خارجی پی رینگی) ۱۲٪ تخمین زده



الف) نشست کلی؛



ب) نشست خمیری.

شکل ۷. نمودار تغییرات پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای هر دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح خاک و خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت‌های مختلف شامل ۱ و $h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75$ در سطوح مختلف بارگذاری تکراری شامل ۲۸۰، ۵۶۰ و ۸۴۰ کیلوپاسکال.

بیش از حد مخازن و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به تأسیسات مدفون مثل لوله‌های انتقال سیالات) شده که البته مسلح‌سازی بهینه‌ی خاک می‌تواند تغییر شکل‌های خمیری را در طول تعداد چرخه‌ی کم بسیار کاهش دهد. این رفتار نتیجه پدیده‌ی به اسم «فروریزی» (Shakedown) است. طبق مطالعات پژوهشگران قبلی، وقتی تغییر شکل‌های خمیری در طول تعداد کمی از چرخه‌های بارگذاری و باربرداری کاهش یافته و ناپدید می‌شوند، یک نوعی از رفتار به نام «فروریزی» مشاهده می‌شود که می‌تواند منجر به ایجاد شرایط پایدار شود و سیستم در این حالت ارتجاعی‌تر عمل می‌کند.^[۲۶-۲۷] نتایج حاصل از مطالعات پژوهشگران قبلی نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند به دلایل مختلف از قبیل سطح پایین تنش وارده^[۲۶] یا مسلح‌سازی خاک با انواع مسلح‌کننده‌ها^[۲۸] اتفاق بیفتد. در پژوهش حاضر چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد پدیده‌ی فروریزی در سطوح پایین تنش بدون در نظر گرفتن نوع بستر (مسلح یا غیرمسلح) اتفاق افتاده است، ولی در سطوح بالای تنش این پدیده فقط در برخی از حالات خاک مسلح اتفاق افتاده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سطوح بالای تنش، پدیده‌ی فروریزی به دلیل مسلح‌سازی بستر خاکی با خرده‌لاستیک اتفاق افتاده است. در واقع استفاده از خرده‌لاستیک در ترکیب با خاک موجب عملکرد ارتجاعی‌تر (کشسانی‌تر) کلی در یک چرخه‌ی مشخص از بارگذاری، هر دو نشست کلی و خمیری در اثر افزودن لایه‌های خاک و خرده‌لاستیک کاهش

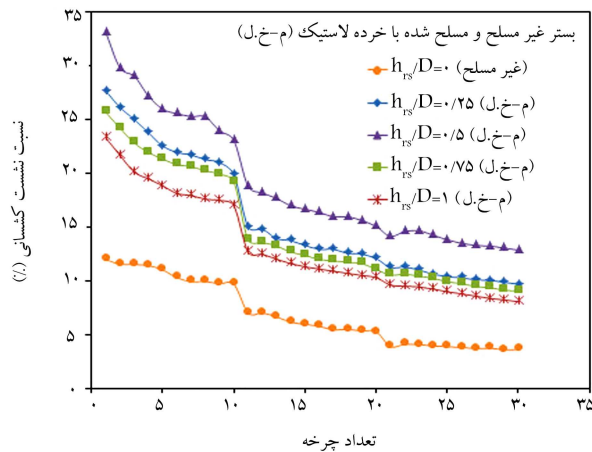
شدن با خرده‌لاستیک مشخص شود. چنان که در جدول ۳ دیده می‌شود نسبت ضخامت لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک (h_{rs}) به قطر خارجی پی رینگگی (D) متغیر بوده تا تأثیر این پارامتر مهم بر رفتار پی رینگگی مستقر بر بستر خاکی مسلح شده با خرده‌لاستیک سنجیده شود. در سری سوم و آخر از آزمایش‌ها یک لایه‌ی ژئوگرید به بستر پی رینگگی اضافه شد تا تأثیر مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک مشخص شود. همچنین در این سری از آزمایش‌ها نیز نسبت ضخامت لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک (h_{rs}) به قطر خارجی پی رینگگی (D) متغیر بوده تا تأثیر این پارامتر مهم بر رفتار پی رینگگی مستقر بر بستر خاکی مسلح شده با خرده‌لاستیک در شرایط حضور لایه‌ی ژئوگرید سنجیده شود.

۵. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بحث در مورد آن‌ها

۱.۵. اثر مسلح‌سازی با خرده‌لاستیک بر رفتار پی رینگگی

چنان که در بخش قبل بیان شد آزمایش‌های سری اول و دوم به ترتیب روی بستر غیرمسلح و بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک انجام گرفت. در شکل ۷ الف نمودار تغییرات نشست کلی پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای هر دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح خاک و خرده‌لاستیک، با نسبت ضخامت‌های (نسبت ضخامت لایه‌ی خاک و خرده‌لاستیک به قطر خارجی پی رینگگی) مختلف ($h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) ارائه شده است. همچنین تغییرات نشست‌های خمیری پی رینگگی که همان نشست‌های باقی‌مانده پس از اعمال یک چرخه‌ی کامل بارگذاری و باربرداری است، در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای هر دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح خاک و خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت‌های مختلف ($h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) در شکل ۷ ب ارائه شده است.

چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، هر دو نشست کلی و خمیری با افزایش سطح بارگذاری یک‌باره افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش تعداد چرخه در هر سطح بارگذاری بر این نشست‌ها افزوده می‌شود؛ البته چنان که مشاهده می‌شود بیشترین افزایش نشست مربوط به چرخه‌ی اول هر سطح بار است مثلاً نشست خمیری رخ داده در اثر سطح دوم بارگذاری (۵۶۰ کیلوپاسکال) و در طی ۱۰ چرخه برای پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت ($h_{rs}/D = 0.75$) چیزی در حدود ۹٫۲ میلی‌متر است که حدود ۶۷٪ آن در طول چرخه‌ی اول این سطح از بارگذاری اتفاق افتاده است. در واقع سرعت افزایش نشست‌های کلی و خمیری در هر دو بستر مسلح و غیرمسلح، با افزایش تعداد چرخه کاهش می‌یابد؛ این کاهش سرعت در بسترهای مسلح شده با خرده‌لاستیک نسبت به بستر غیرمسلح بیشتر دیده می‌شود. این موضوع را می‌توان به وضوح از روی کاهش شیب نمودارها و به بیان دیگر کاهش اختلاف ابتدا و انتهای یک سطح مشخص از بارگذاری (در اثر مسلح‌سازی) مشاهده کرد. مثلاً در سطح دوم از بارگذاری (۵۶۰ کیلوپاسکال) نشست‌های خمیری در خاک غیرمسلح، پس از اعمال ۱۰ چرخه بارگذاری تکراری در حدود ۱۷ میلی‌متر افزایش یافته است، در حالی که این مقدار در بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت 0.75 چیزی در حدود ۹٫۲ میلی‌متر است. این بدان معناست که در بسترهای مسلح نسبت به بستر غیرمسلح، شرایط پایدار در طول تعداد کم‌تری از چرخه‌های بارگذاری و باربرداری حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که تغییر شکل‌های خمیری در بستر زیرین پی‌های رینگگی می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های زیاد (از قبیل نشست



شکل ۸. نمودار تغییرات نسبت نشست کسسانی پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای هر دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح خاک و خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت‌های مختلف شامل ۱ و ۰٫۷۵، ۰٫۵، ۰٫۲۵، h_{rs}/D در سطوح مختلف بارگذاری تکراری شامل ۲۸۰، ۵۶۰ و ۸۴۰ کیلوپاسکال.

کسسانی با افزایش ضخامت لایه‌ی مسلح‌سازی، سهم این نشست‌ها از نشست‌های کلی کاهش می‌یابد؛ این امر را می‌توان ناشی از افزایش نشست‌های خمیری با افزایش بیش از حد ضخامت لایه‌ی مسلح (بیش از نصف قطر خارجی پی) که بیشتر به آن اشاره شد، تلقی کرد. با توجه به نتایج فوق درباره نشست‌های کلی و خمیری و همچنین نسبت نشست‌های کسسانی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک و خرده‌لاستیک برابر با نصف قطر خارجی پی رینگگی است.

۲.۵. تأثیر مسلح‌سازی با ژئوگرید و خرده‌لاستیک بر رفتار پی رینگگی

چنان که در بخش ۴ بیان شد و نیز با توجه به برنامه‌ی ارائه شده در جدول ۳، آزمایش‌های سری سوم روی پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید تنها و بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید انجام گرفت تا اثر مسلح‌سازی با ژئوگرید تنها و بدون حضور لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک و نیز اثر مسلح‌سازی همزمان با مسلح‌کننده‌های ژئوگرید و خرده‌لاستیک مشخص شود.

در شکل ۹ الف نمودار تغییرات نشست کلی پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای بسترهای غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید تنها و مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید، با ضخامت‌های مختلف از لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (۱) و ۰٫۷۵، ۰٫۵، ۰٫۲۵ (h_{rs}/D) ارائه شده است. همچنین تغییرات نشست‌های خمیری پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای بسترهای غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید تنها و مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید با ضخامت‌های مختلف از لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (۱) و ۰٫۷۵، ۰٫۵، ۰٫۲۵ (h_{rs}/D) در شکل ۹ ب ارائه شده است.

مشابه آزمایش سری اول و دوم (که بر روی بستر غیرمسلح و بسترهای مسلح شده با خرده‌لاستیک انجام گرفت)، آزمایش سری سوم (که روی بستر مسلح شده با ژئوگرید و بسترهای مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید انجام گرفت) نیز نشان می‌دهد که هر دو نشست‌های کلی و خمیری با افزایش سطح بارگذاری و همچنین با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری افزایش می‌یابند، اما با افزایش تعداد چرخه‌ها، سرعت افزایش نشست کاهش می‌یابد که این موضوع در بسترهای مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید به وضوح مشاهده می‌شود و لذا در این

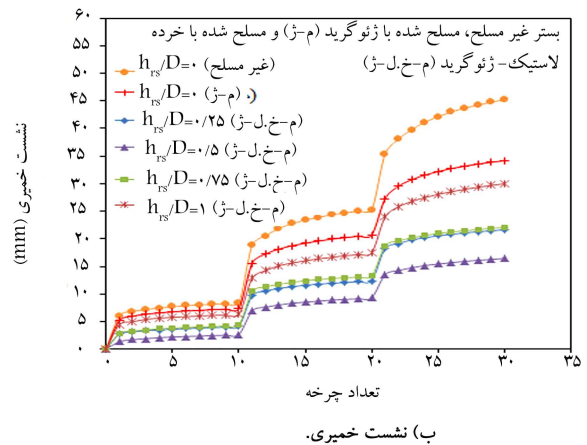
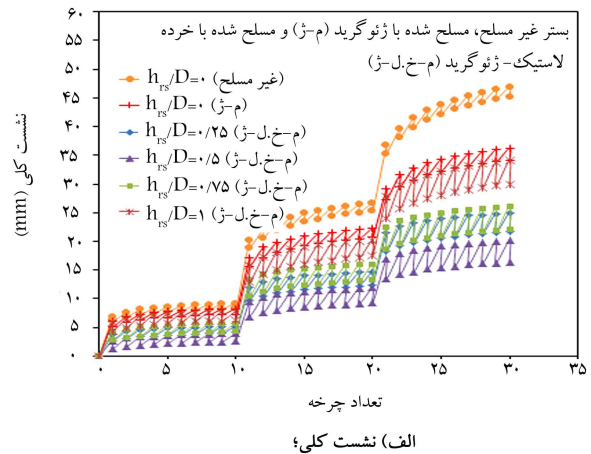
می‌یابد. مثلاً در چرخه‌ی پانزدهم از بارگذاری تکراری نشست‌های خمیری مربوط به پی رینگگی مستقر بر بستر غیرمسلح و همچنین بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۰٫۲۳/۴، ۰٫۱۴/۵۶، ۰٫۱۲/۲، ۰٫۱۸/۲۱ و ۰٫۲۰/۹۷ میلی‌متر است؛ این مقادیر نشان می‌دهد در اثر افزودن لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ نشست‌های خمیری به ترتیب ۰٫۳۸٪، ۰٫۴۸٪، ۰٫۲۲٪ و ۱۰٪ نسبت به شرایط غیرمسلح کاهش داشته‌اند. این مقادیر نشان می‌دهد، در یک چرخه‌ی مشخص از فرایند بارگذاری و باربرداری بدون توجه به سطح بار، با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (h_{rs}) تا ضخامتی برابر با نصف قطر خارجی (D) پی رینگگی (یعنی $h_{rs}/D = 0.5$) نشست‌های کلی و خمیری کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک تا ضخامت‌هایی بیشتر از نصف قطر خارجی پی رینگگی (یعنی ۱ و ۰٫۷۵) سبب افزایش مجدد نشست‌های کلی و خمیری می‌شود. این افزایش مجدد نشست‌ها در نسبت‌های ضخامت بالا از لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک می‌تواند به دلیل نرمی بیش از حد یا قابلیت فشرده‌گی بالا در اثر افزایش بیش از حد ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک باشد که اثر مسلح‌سازی با خرده‌لاستیک را تضعیف می‌کند. چنان که گفته شد، افزودن لایه‌ی مسلح خاک و خرده‌لاستیک به بستر پی می‌تواند رفتار بستر را ارتجاعی‌تر کند و بدین ترتیب نشست‌های کسسانی یا ارتجاعی (اختلاف نشست پی در بارگذاری و باربرداری در هر چرخه) را افزایش دهد. قابلیت جذب انرژی با افزایش سهم نشست‌های کسسانی افزایش یافته و بدین ترتیب سیستم به سمت شرایط پایدار حرکت می‌کند. اما چنان که ذکر شد افزایش بیش از حد ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک سبب افزایش نشست‌های کلی و خمیری می‌شود.

با توجه به جمع مطالب گفته شده، باید از لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک با ضخامت بهینه استفاده کرد تا اثرات مثبت استفاده از این لایه حفظ شود. برای ارزیابی رفتار ارتجاعی بستر پی، تغییرات نسبت نشست کسسانی (نسبت نشست کسسانی در هر چرخه به بیشینه نشست کلی رخ داده از شروع چرخه‌ی اول) در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای هر دو بستر غیرمسلح و بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک با نسبت ضخامت‌های مختلف (۱ و ۰٫۷۵، ۰٫۵، ۰٫۲۵) در شکل ۸ ارائه شده است.

در شکل ۸ به وضوح می‌بینیم که نسبت نشست کسسانی در تمامی چرخه‌های بارگذاری برای بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (صرف نظر از ضخامت لایه‌ی خاک و خرده‌لاستیک) بیشتر از بستر غیرمسلح است و این نشان می‌دهد که بستر مسلح نسبت به بستر غیرمسلح ارتجاعی‌تر عمل می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که در یک چرخه‌ی مشخص از فرایند بارگذاری و باربرداری بدون توجه به سطح بار، با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (h_{rs}) تا ضخامتی برابر با نصف قطر خارجی (D) پی رینگگی (یعنی $h_{rs}/D = 0.5$) نسبت نشست‌های کسسانی افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک تا ضخامت‌هایی بیشتر از نصف قطر خارجی پی رینگگی (یعنی ۱ و ۰٫۷۵) سبب کاهش مجدد نسبت نشست‌های کسسانی می‌شود. به طور مثال در چرخه‌ی پانزدهم نسبت نشست کسسانی برای خاک غیرمسلح و خاک مسلح شده با خرده‌لاستیک با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۰٫۵/۹۵٪، ۰٫۱۳/۲۸٪، ۰٫۱۶/۶۵٪، ۰٫۱۲/۳۶٪ و ۰٫۱۱/۳٪ است. این افزایش اولیه و سپس کاهش سهم نشست‌های کسسانی با افزایش ضخامت لایه‌ی مسلح خاک و خرده‌لاستیک، نشان می‌دهد علی‌رغم افزایش نشست‌های

با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ به ترتیب داشته‌اند. این مقادیر نشان می‌دهد، در بسترهای مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید همانند بسترهای مسلح شده با خردلاستیک بدون حضور ژئوگرید (شکل ۷) و در یک چرخه‌ی مشخص از فرایند بارگذاری و باربرداری بدون توجه به سطح بار، با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک (h_{rs}) تا ضخامتی برابر با نصف قطر خارجی (D) پی رینگگی یعنی ($h_{rs}/D = 0.5$) نشست‌های کلی و خمیری کاهش می‌یابند و افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک تا ضخامت‌هایی بیشتر از نصف قطر خارجی پی رینگگی (یعنی ۱ و $h_{rs}/D = 0.75$) سبب افزایش مجدد نشست‌های کلی و خمیری می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که در تمام چرخه‌های بار تکراری صرف‌نظر از سطح بار وارده، نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با خردلاستیک (بدون حضور ژئوگرید شکل ۷) با نسبت ضخامت $h_{rs}/D = 0.75$ بیشتر از بستر مسلح شده با خردلاستیک (بدون حضور ژئوگرید، در شکل ۷) با نسبت ضخامت $h_{rs}/D = 0.25$ است، در حالی که نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید (شکل ۹) با نسبت ضخامت $h_{rs}/D = 0.75$ تقریباً برابر با بستر مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید (شکل ۹) با نسبت ضخامت $h_{rs}/D = 0.25$ است که این موضوع می‌تواند مربوط به اثرات مثبت استفاده از ژئوگرید باشد. نتایج حاصل از تحقیقات پژوهشگران قبلی در مورد سازوکار گسیختگی بسترهای مسلح شده با مسلح‌کننده‌های نواری افقی و از جمله لایه‌های افقی ژئوستنتیک نشان می‌دهد که گوه گسیختگی شبه صلب (تشکیل شده در زیر صفحه‌ی بارگذاری)، در بسترهای مسلح شده با ژئوستنتیک گسترش بیشتری از لحاظ عرض و ارتفاع نسبت به بسترهای غیرمسلح دارند.^[۲۸-۴۰] بنابراین مسلح‌سازی بستر پی با مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید سبب می‌شود که محدوده‌ی بزرگ‌تری از لحاظ عمق، در اثر بارگذاری درگیر شده و این موضوع می‌تواند سبب فعال شدن نقش مسلح‌سازی لایه‌هایی از مخلوط خاک و خردلاستیک شود که در عمق پایین‌تری قرار گرفته‌اند. ولی با توجه به نمودارهای موجود در شکل ۹ اثر مثبت لایه‌ی ژئوگرید در فعال کردن لایه‌هایی از مخلوط خاک و خردلاستیک به اندازه‌ی نبوده است که بتواند بر آثار منفی ناشی از به کارگیری یک لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک با ضخامتی بیش از ضخامت بهینه که برابر با نصف قطر خارجی پی رینگگی است (به بخش ۱.۵ رجوع شود) غلبه کند، زیرا چنان‌که در بخش قبل گفته شد افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک به ضخامتی بیش از ضخامت بهینه سبب افزایش نشست‌های خمیری می‌شود. بنابراین چنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در شرایطی که ژئوگرید حضور داشته باشد همانند شرایطی که ژئوگرید حضور ندارد، کم‌ترین نشست‌ها (کلی و خمیری) مربوط به پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با مخلوط خاک و خردلاستیک با ضخامتی برابر با نصف قطر خارجی پی رینگگی است. همچنین از مقایسه‌ی شکل‌های ۷ و ۹ مشخص می‌شود که در یک چرخه‌ی مشخص از بار تکراری صرف‌نظر از سطح بار، بستر مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید عملکرد بهتری نسبت به بستر مسلح شده با خردلاستیک (بدون حضور ژئوگرید) در کاهش نشست‌های کلی و خمیری داشته است. به طور مثال در چرخه‌ی پانزدهم از بارگذاری تکراری نشست‌های خمیری برای پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با خردلاستیک (بدون حضور ژئوگرید) با h_{rs}/D برابر با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۱۸٫۲۱، ۱۲٫۲، ۱۴٫۵۶ و ۲۰٫۹۷



شکل ۹. نمودار تغییرات پی رینگگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای بسترهای غیرمسلح، مسلح شده ژئوگرید و مسلح شده با خردلاستیک - ژئوگرید با نسبت ضخامت‌های مختلف شامل ۱ و ۰٫۷۵، ۰٫۵، ۰٫۲۵ h_{rs}/D در سطوح مختلف بارگذاری تکراری شامل ۲۸۰، ۵۶۰ و ۸۴۰ کیلوپاسکال.

بسترهای مسلح، شرایط پایدار در طول چرخه‌های کم‌تری نسبت به بستر غیرمسلح حاصل می‌شود.

چنان‌که در شکل ۹ (در یک چرخه‌ی مشخص از فرایند بارگذاری تکراری، هر دو نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید (بدون حضور لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک) کم‌تر از نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر غیرمسلح است. همچنین نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید کم‌تر از نشست‌های کلی و خمیری پی رینگگی مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید (بدون حضور لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک) است که این نشان می‌دهد مسلح‌سازی هم‌زمان با خردلاستیک و ژئوگرید مؤثرتر از مسلح‌سازی با لایه‌ی ژئوگرید تنها (بدون حضور لایه‌ی مخلوط خاک و خردلاستیک) است. مثلاً در چرخه‌ی پانزدهم از بارگذاری تکراری نشست‌های خمیری مربوط به پی رینگگی مستقر بر بسترهای غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید (بدون حضور خردلاستیک) و مسلح شده با ترکیب خردلاستیک - ژئوگرید با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۲۳٫۴، ۱۹٫۲، ۱۱٫۶، ۸٫۵۴، ۱۲٫۴۲ و ۱۶٫۰۲ میلی‌متر است که این مقادیر نشان می‌دهد نشست‌های خمیری در اثر افزودن لایه‌ی ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با لایه‌ی مسلح خاک و خردلاستیک

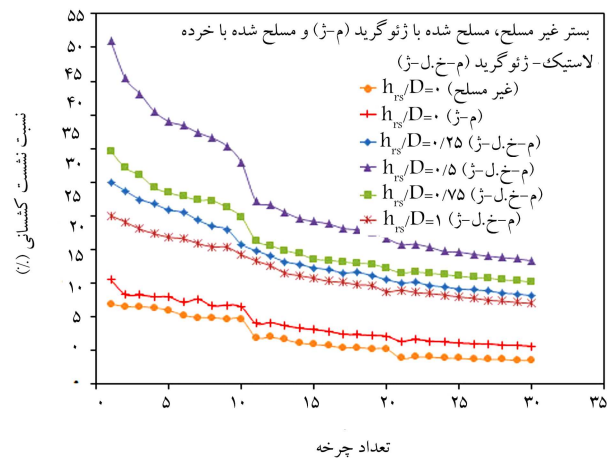
۰/۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۰/۸۱۳، ۰/۱۷۳، ۰/۲۴۲، ۰/۱۸۶، ۰/۱۵۱۸ است.

با توجه به مطالب گفته شده درباره‌ی نشست‌های کلی، خمیری و نسبت نشست‌های کشسانی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در بسترهای مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید همانند بسترهای مسلح شده با خرده‌لاستیک بدون حضور ژئوگرید (رجوع به بخش ۱۰.۵) ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک و خرده‌لاستیک برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است.

مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۰ نشان می‌دهد که در یک چرخه‌ی مشخص از بار تکراری صرف‌نظر از سطح بار، بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید عملکرد بهتری نسبت به بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (بدون حضور ژئوگرید) در افزایش سهم نشست‌های ارتجاعی داشته است. مثلاً در چرخه‌ی پانزدهم از بارگذاری تکراری نسبت نشست‌های کشسانی برای پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (بدون حضور ژئوگرید) با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۰/۱۳۲۸، ۰/۱۶۶۵، ۰/۱۲۳۶ و ۰/۱۱۳ است، در حالی که نسبت نشست‌های کشسانی برای پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۰/۱۷۳، ۰/۲۴۲، ۰/۱۸۶ و ۰/۱۵۱۸ است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت پی‌های رینگی و کاربرد گسترده‌ی آنها در صنایع مختلف، رفتار این‌گونه پی‌ها در برابر بارهای تکراری و همچنین میزان تأثیر مسلح‌کننده‌هایی همچون خرده‌لاستیک دانه‌پی و ژئوگرید به‌تنهایی و در ترکیب با یکدیگر بر بهبود رفتار این‌گونه از پی‌ها، توسط آزمایش‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لایه‌ی مسلح شده با خرده‌لاستیک، می‌تواند نشست‌های خمیری پی رینگی را تا ۴۸٪ نسبت به حالت غیرمسلح کاهش دهد که البته با افزودن یک لایه‌ی ژئوگرید در بالای لایه‌ی مذکور، این مقدار تا ۶۳/۵٪ افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد مسلح‌سازی هم‌زمان با خرده‌لاستیک و ژئوگرید تأثیر بیشتری در کاهش نشست خمیری و بهبود رفتار پی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد سرعت افزایش نشست‌های کلی و خمیری در بسترهای مسلح شده نسبت به بستر غیرمسلح، کاهش می‌یابد. در واقع افزودن مسلح‌کننده‌هایی چون خرده‌لاستیک و ژئوگرید به‌تنهایی و در ترکیب با یکدیگر، می‌تواند تغییر شکل‌های خمیری را در طول تعداد چرخه‌ی کم کاهش دهد که باعث بروز رفتاری به اسم «فروریزی» می‌شود که در اثر آن سیستم ارتجاعی‌تر عمل کرده و شرایط پایدار حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در چرخه‌ی پانزدهم از بارگذاری تکراری، نسبت نشست کشسانی پی رینگی مستقر بر خاک غیر مسلح ۵/۹۵٪ بوده است که این مقدار در اثر مسلح‌سازی خاک تا ۲۴/۲٪ افزایش یافته است. به بیان دیگر با افزودن مسلح‌کننده‌هایی چون خرده‌لاستیک و ژئوگرید، سهم نشست‌های کشسانی بیشتر شده و قدرت جذب انرژی سیستم بالاتر می‌رود. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌ها (درباره نشست‌های کلی، خمیری و نسبت نشست‌های کشسانی) نشان می‌دهد که در بستر مسلح شده با خرده‌لاستیک (بدون حضور ژئوگرید) و همچنین بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک و خرده‌لاستیک برای بهبود رفتار پی رینگی در برابر بار تکراری، برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نسبت نشست کشسانی پی رینگی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده بر بسترهای غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید و مسلح شده با خرده‌لاستیک - ژئوگرید با نسبت ضخامت‌های مختلف شامل ۱ و ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ h_{rs}/D در سطوح مختلف بارگذاری تکراری شامل ۲۸۰، ۵۶۰ و ۸۴۰ کیلوپاسکال.

میلی‌متر است، در حالی که نشست‌های خمیری برای پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به ترتیب برابر با ۱۶/۰۲ و ۱۲/۴۲، ۸/۵۴، ۱۱/۶ میلی‌متر است.

چنان که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مسلح‌سازی خاک با ژئوگرید و به ویژه مسلح‌سازی خاک با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید می‌تواند نشست‌های خمیری را در طول تعداد چرخه‌ی کم بسیار کاهش دهد که مطابق آنچه که در بخش ۱۰.۵ بیان شد، این رفتار «فروریزی» نام دارد که باعث می‌شود سیستم ارتجاعی‌تر عمل کند و شرایط پایدار حاصل شود. برای ارزیابی رفتار ارتجاعی بسترهای مسلح شده با ژئوگرید، تغییرات نسبت نشست کشسانی در برابر تعداد چرخه‌ی وارده برای بسترهای غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید تنها و مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید با نسبت ضخامت‌های مختلف (۱ و ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ h_{rs}/D) در شکل ۱۰ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود نسبت نشست کشسانی در تمامی چرخه‌های بارگذاری برای بستر مسلح شده با ژئوگرید، بیشتر از بستر غیرمسلح است؛ همچنین نسبت نشست کشسانی در تمامی چرخه‌های بارگذاری برای بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید بیشتر از بستر مسلح شده با ژئوگرید تنها (بدون حضور خرده‌لاستیک) است که این نشان می‌دهد بسترهای مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید نسبت به بستر مسلح شده با ژئوگرید تنها ارتجاعی‌تر عمل می‌کند.

همچنین در یک چرخه‌ی مشخص از فرایند بارگذاری و باربرداری بدون توجه به سطح بار، در بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید، با افزایش ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک (h_{rs}) تا ضخامتی برابر با نصف قطر خارجی (D) پی رینگی یعنی $(h_{rs}/D = 0.5)$ نسبت نشست‌های کشسانی افزایش می‌یابد (شکل ۱۰) و افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی مخلوط خاک و خرده‌لاستیک تا ضخامت‌هایی بیشتر از نصف قطر خارجی پی رینگی (یعنی ۱ و ۰/۷۵ h_{rs}/D) سبب کاهش مجدد نسبت نشست‌های کشسانی می‌شود. مثلاً نسبت نشست‌های کشسانی برای پی رینگی مستقر بر بستر غیر مسلح و همچنین بستر مسلح شده با ترکیب خرده‌لاستیک - ژئوگرید با نسبت‌های ضخامت (h_{rs}/D) ۰/۲۵، ۰/۵،

منابع (References)

- Sharma, V. and Kumar, A. "Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations", *Geotextiles and Geomembranes*, **45**(5), pp. 9-507 (2017).
- Ohri, M.L., Purhit, D.G.M. and Dubey, M.L. "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand", *International Conference of Civil Engineers*, Tehran, Iran (1997).
- Boushehrian, J.H. and Hataf, N. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 241-256 (2003).
- EI Sawwaf, M. and Nazir, A. "Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil", *Journal of Geotechnic and Geoenvironmental Engineering*, **138**(3), pp. 376-384 (2012).
- Kumar, J. and Ghosh, P. "Bearing capacity factor N_γ for ring footings using the method of characteristics", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(5), pp. 1474-148 (2005).
- Zhao, L. and Wang, J.H. "Vertical bearing capacity for ring footings", *Computers and Geotechnics*, **35**(2), pp. 292-304 (2008).
- Laman, M. and Yildiz, A. "Numerical study of ring foundation on geogrid reinforced sand", *Geosynthetics International*, **14**(2), pp. 52-64 (2007).
- Gotteland, P., Lambert, S. and Balachowski, L. "Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures", *Studia Geotechnica et Mechanica*, **27**(1-2), pp. 55-66 (2005).
- Edinçliler, 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*, **21**(3), pp. 441-452 (2012).
- Anvari, S.M. and Shooshpasha, I. "Influence of size of granulated rubber on bearing capacity of fine-grained sand", *Arabian Journal of Geosciences*, **9**(18), pp. 707 (2016).
- Bali Reddy, S., Pradeep Kumar, D. and Murali Krishna, A. "Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoenvironmental applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**(2), pp. 1-7 (2016).
- Chenari, R.J., Fatahi, B., Maroufi, M.A.A. and et al. "An experimental and numerical investigation into the compressibility Geotechnical and Geological and settlement of sand mixed with TDA", *Engineering*, **35**(5), pp. 1-20 (2017).
- US-EPA. "Markets for Scrap tires", United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, EPA1530-SW90-074A (October 1991).
- <https://archive.epa.gov/epawaste/conservation/materials/tires/web/pdf/tires.pdf>.
- 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. 457-556 (2012).
- Tavakoli Mehrjardi, Moghaddas Tafreshi, S.N., Joz Darabi, N., G.H. and et al. "Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **23**(1), pp. 1-24 (2016).
- Mittal, R.K. and Gill, G. "Pressure settlement behaviour of strip footing resting on tire-chip reinforced sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **14**(2), pp. 1-7 (2017).
- Boushehrian, A.H., Hataf, N. and Ghahramani, A., "Modeling of the cyclic behavior of shallow foundations resting on geomesh and grid-anchor reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **29**(3), pp. 242-248 (2011).
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. and Dawson, A.R. "Repeated loading of soil containing granulated rubber and multiple geocell layers", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**, pp. 25-38 (2014).
- Tavakoli Mehrjardi, G.H., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes", *Geotextiles and Geomembranes*, **34**, pp. 116-130 (2012).
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Joz Darabi, N. and Dawson, A.R. "Cyclic loading response of footing on multi-layered rubber-soil mixtures", *Geomechanics and Engineering*, **14**(2), pp. 115-129 (2018).
- ASTM D 2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, (2011).
- Hsieh, C. and Mao, L. "A bench-scale performance test for evaluation of the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", In *Geosynthetics Research and Development in Progress*, pp. 1-11 (2005).
- Norouzi2a, A. "Application of waste rubber to Tafreshi, S.N. and reduce the settlement of road embankment", *Geomechanics and Engineering*, **9**(2), pp. 219-241 (2015).
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. and Dawson, A.R. "Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation", *Geosynthetics International*, **20**(3), pp. 143-161 (2013).
- Joz Darabi, N. and Moghaddas Tafreshi, S.N. "Investigation into footing behavior of layered granulated rubber-soil mixture: Experimental study on small and large scale models", *Sharif Journal Civil Engineering*, **32.2**(2.2), pp. 79-88 (2016).
- Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 89-98 (2009).
- 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 Engineerig*, Iran, **6**(4), pp. 265-274 (2011).
- Tavakoli Mehrjardi, G.H. Jamshidi, H., *Bearing capacity and settlement of ring footing*, Technical and Soil Mechanics Lab Co, (2010). Book In Persian.

30. ASTM D1556/D1556M-15, "Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method", American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. (2015).
31. Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K. and Madhavi Latha, G. "Model studies on geocell supported embankments constructed over soft clay foundation". *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **23**(1), pp. 45-54 (2000).
32. DeMerchant, M.R., Valsangkar, A.J. and Schriver, A.B. "Plate load tests on geogrid reinforced expanded shale lightweight aggregate" *Geotextile and Geomembranes*, **20**(3), 173-190 (2002).
33. Dash, S.K., Sireesh, S. and Sitharam, T.G. "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 197-219 (2003).
34. Sitharam, G. and Sireesh, S. "Behavior of embedded footings supported on geogrid cell reinforced foundation beds", *Geotechnical Testing Journal*, **28**(5), pp. 452-463 (2005).
35. Sitharam G, Sireesh, S and Dash, SK. "Performance of surface footing on geocell reinforced soft clay beds", *Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(5), pp. 509-524 (2007).
36. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(1), pp. 72-84 (2010a).
37. Werkmeister, S., Dawson, A.R. and Wellner, F. "Permanent deformation behavior of granular materials", *Road Materials and Pavement Design*, **6**(1), pp. 31-51 (2005).
38. Ghadimi, B., Nikraz, H. and Rosano, M. "Dynamic simulation of a flexible pavement layers considering shake-down effects and soil-asphalt interaction", *Transportation Geotechnics*, **7**, pp. 40-58 (2016).
39. Huang, C.C., and Tatsuoka, E. "Prediction of bearing capacity in level sandy ground reinforced with strip reinforcement", In Proc. of International Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement (IS Kyushu'88), Fukuoka, Japan, 1, pp. 191-196 (1988).
40. Huang, C.C., Tatsuoka, F. "Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground", *Geotextiles and Geomembranes*, **9**(1), pp. 51-82 (1990).