

اثر سرعت بارگذاری بر ظرفیت باربری شالوده‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌یی مسلح به ژئوگرید

سیده‌جداالدین میرمحمدحسینی* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سعید ابریشمی (استادیار)
گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار خاک و عملکرد شالوده‌ها «سرعت بارگذاری» است و تخمین رفتاری‌ها نیازمند شناخت اثرات کمی و کیفی این پارامتر است. در این نوشتار، نتایج مطالعات آزمایشگاهی صورت‌گرفته روی مدل پی نواری واقع بر سطح خاک ماسه‌یی غیرمسلح و نیز مسلح به ژئوگرید تحت بارهای استاتیکی، به صورت کنترل نیرو و با سرعت‌های مختلف ارائه شده است. سپس اثر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری و نشست نهایی مدل پی بررسی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از سیستم آزمایشگاهی جدیدی که برای مدل‌سازی فیزیکی رفتار شالوده‌ها توسعه یافته، انجام شده است. نتایج حاصله ضمن اثبات دقت و تکرارپذیری مدل فیزیکی، به‌ویژه در حالت غیرمسلح، نشان می‌دهد که اثر نرخ بارگذاری بر رفتار شالوده‌های مسلح و غیرمسلح متفاوت است. افزایش سرعت بارگذاری منجر به کاهش اندک ولی قابل مشاهده‌ی ظرفیت باربری و افزایش نسبی نشست‌های نهایی خاک مسلح می‌شود.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، ژئوگرید، ماسه، نرخ بارگذاری، مدل‌سازی فیزیکی، ظرفیت باربری، نشست.

mirh53@yahoo.com
saeedabrishami@yahoo.com

۱. مقدمه

یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی‌های متعارف موجود، معمولاً از قابلیت بررسی تأثیر سرعت بر فاز سیال و سپس مطالعه‌ی تأثیر متقابل فاز سیال بر رفتار کل توده برخوردارند. از آنجا که توسعه‌ی مدل‌های رفتاری مناسب معمولاً بدون انجام مدل‌سازی‌های فیزیکی امکان‌پذیر نیست، این تحقیق از اهمیتی خاص برخوردار است و نتایج آن می‌تواند فراهم‌آورنده‌ی شناختی کامل‌تر در این زمینه باشد.

در تحقیق حاضر، به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، ابتدا آزمایش‌هایی روی خاک و ژئوگرید صورت گرفته است. سپس با استفاده از سیستمی که جدیداً در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شده،^[۱] و به منظور بررسی توانایی‌های سیستم آزمایشگاهی و برنامه‌ریزی آزمایش‌های اصلی، آزمایش‌های اولیه‌ی مدل‌سازی انجام شده است.

آزمایش‌های اصلی به دو گروه آزمایش‌های غیرمسلح و مسلح تقسیم شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته روی خاک غیرمسلح با نتایج بررسی‌های دیگر محققین،^[۲] مؤید صحت و دقت آزمایش‌ها و عملکرد سیستم توسعه‌یافته برای مدل‌سازی فیزیکی مسئله‌ی ظرفیت باربری است. اما مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته روی خاک مسلح با خاک غیرمسلح و با نتایج تنها تحقیق صورت گرفته در این زمینه، بیانگر تفاوت و تنوع رفتاری است.

نواحی وسیعی از سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک با ماسه پوشیده شده است. این خاک‌ها تحت بارهای افزایشی معمولاً نشست‌هایی اضافی دارند. مسلح‌سازی خاک با ژئوگرید از جمله روش‌های متعارف مقاوم‌سازی به صورت فیزیکی است که منجر به افزایش ظرفیت باربری و سختی خاک می‌شود. از این روش در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی نظیر شالوده‌های سطحی، خاک‌ریز بزرگراه‌ها و خطوط لوله استفاده می‌شود.

هنوز جنبه‌های بسیاری از اثرات مسلح‌سازی بر رفتار خاک‌ها ناشناخته است، که از آن جمله می‌توان به تأثیر نرخ بارگذاری بر رفتار شالوده‌ها اشاره کرد. افزایش سرعت بارگذاری بر شالوده‌های مختلف، خصوصاً واقع بر خاک‌های اشباع و نیمه‌اشباع ممکن است به افزایش سریع فشارهای منفذی، کاهش ناگهانی فشارهای مؤثر و شکست پی منجر شود، به‌ویژه آن‌که شالوده‌های بسیاری، نظیر شالوده‌ی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار^۱ و سکوه‌های پرتاب موشک^۲ برخلاف شالوده‌ی ساختمان‌ها، تحت بارهای ضربه‌یی و سریع‌اند.

مدل‌سازی عددی این مسئله برای خاک خشک بدون توسعه‌ی یک مدل رفتاری مناسب امکان‌پذیر نیست، چرا که در اغلب مدل‌سازی‌های عددی، خاک همانند

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۶/۲۲، اصلاحیه ۱۳۸۹/۵/۲۳، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۹.

۲. پیشینه‌ی موضوع

شکل ۱ مقطع و پلان یک پی نواری به عرض B واقع بر سطح خاک ماسه‌بی مسلح به یک لایه ژنوگرید به عرض b و طول l (برابر طول پی) در عمق u تحت بار گسترده‌ی ایستای q را نمایش می‌دهد. بررسی این مسئله برای خاک‌های ماسه‌بی و نیز مطالعه‌ی پارامترهای اصلی طراحی توسط محققین بسیاری انجام شده، [۳-۶] اما بررسی تأثیر نرخ بارگذاری چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است.

بر اساس جست‌وجوی صورت‌گرفته در متون فنی، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی برای بررسی تأثیر نرخ بارگذاری روی ظرفیت باربری خاک‌های مسلح صورت گرفته است. این در حالی است که این موضوع برای خاک‌های غیرمسلح پیش‌تر مفصلاً مطالعه شده است.

تأثیر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری شالوده‌ی سطحی دایره‌یی واقع بر ماسه تحت بار قائم محوری ابتدا در سال ۱۹۵۸ و پس از آن در سال ۱۹۶۵ به صورت کامل‌تر بررسی شد [۷] نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد:

۱. ظرفیت باربری ابتدا با افزایش سرعت بارگذاری تا مقادیر متوسط حدود 0.05 mm/sec به مقدار اندک ولی قابل تشخیص کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت باربری همراه با کاهش ابعاد گوه خاک است (شکل ۲).

۲. در آزمایش‌های سریع‌تر افزایش ظرفیت باربری مشاهده می‌شود که این افزایش برای خاک خشک قابل توجه نیست، به طوری که ظرفیت باربری در سریع‌ترین آزمایش‌ها -- با نرخ بارگذاری 25.4 mm/sec -- از ظرفیت باربری در شرایط بارگذاری آرام بیشتر نمی‌شود (شکل ۲).

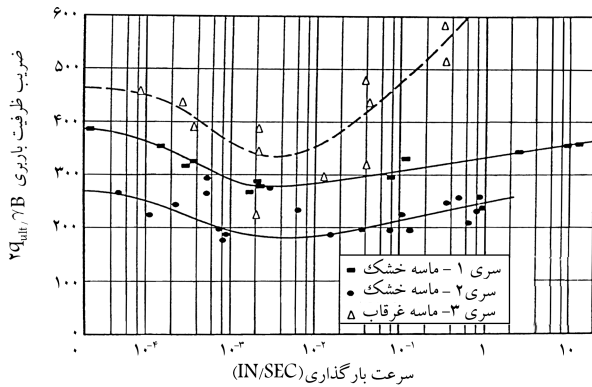
۳. هر منحنی بار - نشست یک بخش خطی اولیه دارد که به یک پیشینه و کمیته‌ی منتهی به بخش خطی دیگری با شیب شدیداً کاهش یافته می‌رسد؛ سپس گسیختگی برشی کلی رخ می‌دهد (شکل ۳).

۴. بار نهایی در ماسه‌ی خشک در نشست حدود $7/8$ درصد بعد شالوده (قطر)

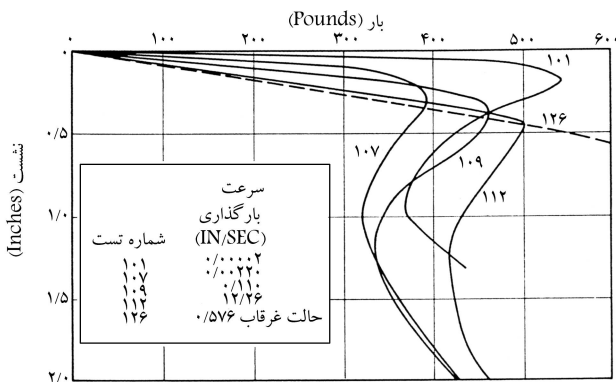
رخ می‌دهد (شکل ۴). به نظر می‌رسد افزایش نشست‌های نهایی در نرخ‌های بارگذاری، به مقدار اندک ولی خیلی سریع رخ می‌دهد؛ این تغییر برای شالوده‌های واقع بر ماسه‌ی اشباع کاملاً واضح است.

۵. به نظر می‌رسد با افزایش سرعت بارگذاری از اندک تا تقریباً سریع، تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد.

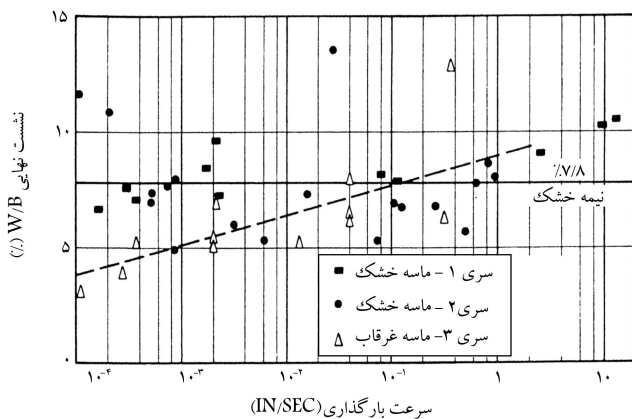
محققین در شرح پدیده مشاهده‌شده بیان داشته‌اند که در بارگذاری ایستای ماسه



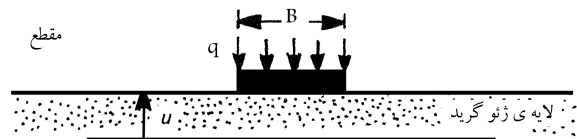
شکل ۲. تأثیر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه‌ی غیرمسلح. [۲]



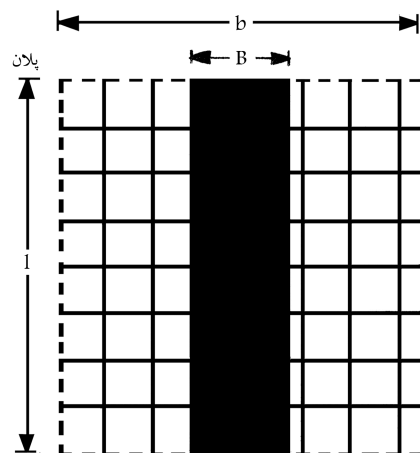
شکل ۳. نمودار بار - نشست پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه غیر مسلح. [۲]



شکل ۴. تغییرات نشست نهایی با نرخ بارگذاری برای پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه‌ی غیرمسلح. [۲]

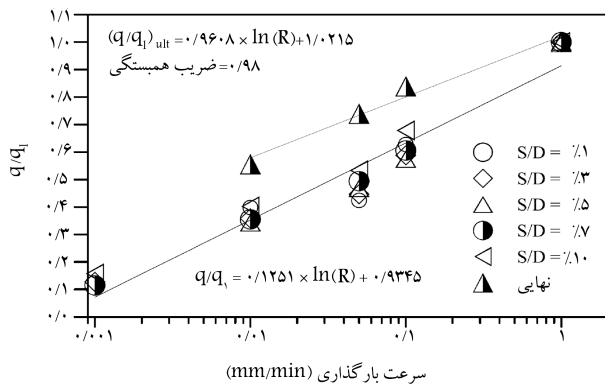


الف) مقطع پی نواری؟



ب) پلان پی نواری و ژنوگرید. [۵، ۶]

شکل ۱. بررسی ظرفیت باربری خاک مسلح.



شکل ۷. اثر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه‌ی مسلح به ژئوگرید [۹]

لگاریتمی افزایش می‌یابد (شکل ۶). براساس تعریف، E مدول تغییر مکان یعنی شیب قسمت خطی منحنی بار-نشست و E_1 مقدار E به‌ازای نرخ بارگذاری 1 mm/min است.

۳. اثرات نرخ بارگذاری روی ظرفیت باربری -- چه در سطح سرویس و چه در سطح نهایی -- می‌تواند قابل توجه باشد و ظرفیت باربری به‌صورت لگاریتمی با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد (شکل ۷).

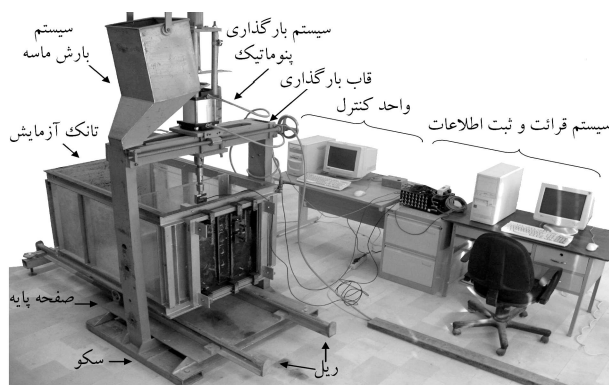
۴. تسلیح خاک با ژئوگرید در سطوح فشار سرویس باعث کاهش نشست‌های خزشی می‌شود، ولی لغزش و گسیختگی مسلح‌کننده در فشارهای نهایی باعث فعال‌سازی مجدد خزش می‌شود.

۵. اثر خزش روی پاسخ بار-نشست خاک ماسه‌یی مسلح مهم نیست، چرا که مسلح‌سازی نشست‌ها را کاهش می‌دهد و رفتار را اصلاح می‌کند.

در تحقیق یادشده صرفاً پیچیدگی تأثیر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری بیان شده، اما جزئیات مشاهده شده و دلایل کاهش احتمالی آن نادیده گرفته شده است.

۳. مدل فیزیکی

سیسټم مورد استفاده در تحقیق حاضر (شکل ۸)، با هدف مدل‌سازی مسائل بارگذاری و باربری شالوده‌ها و فراهم آوردن اطلاعات دقیق برای بررسی درستی فرضیات و مدل‌های تحلیلی، عددی و رفتاری، ضمن رفع نقایص و نقاط ضعف عمده‌ی



شکل ۸. مجموعه‌ی کامل سیستم آزمایشگاهی مطالعه‌ی رفتار پی‌های نواری واقع بر خاک مسلح.

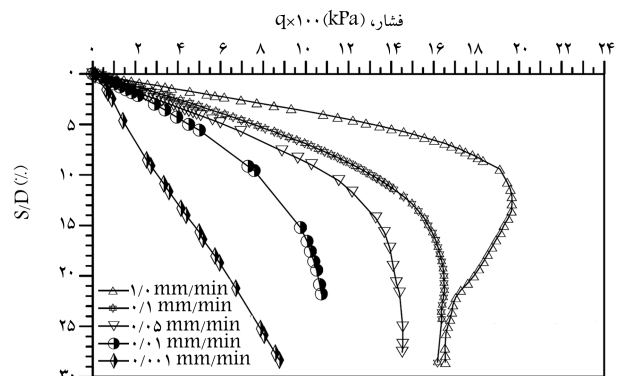
با کنترل تنش، ذرات برای تنظیم موقعیت خود در هر نمو بار نیازمند زمان‌اند [۲]. در صورتی که این فرصت به ذرات داده نشود، ابتدا افت ظاهری مقاومت یا ظرفیت باربری و افزایش تغییرشکل یا تراکم‌پذیری رخ می‌دهد. با این وجود، با افزایش بیشتر نرخ بارگذاری، اثر زمانی دیگری بیشتر محسوس می‌شود. ذرات برای جابه‌جایی در امتداد مسیر کمینه‌ی مقاومت نیز نیاز به زمان دارند و در شرایط کاملاً سریع قادر به دنبال کردن این مسیر نیستند و در نتیجه، مقاومت برشی و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. این توضیح با مشاهدات سطوح گسیختگی توسعه‌یافته در خاک تأیید می‌شود.

تفاوت گسیختگی با تمرکز بر سرعت بارگذاری (برش سوراخ‌کننده برای بارهای خیلی سریع و برش کلی برای سایر موارد) را می‌توان با توجه به بازسازی آیرنسی خاک در برش توضیح داد. همچنین می‌توان نشان داد که این عامل اثری مشابه فشار سربار یا دفن‌شدگی عمیق روی مد گسیختگی دارد [۸].

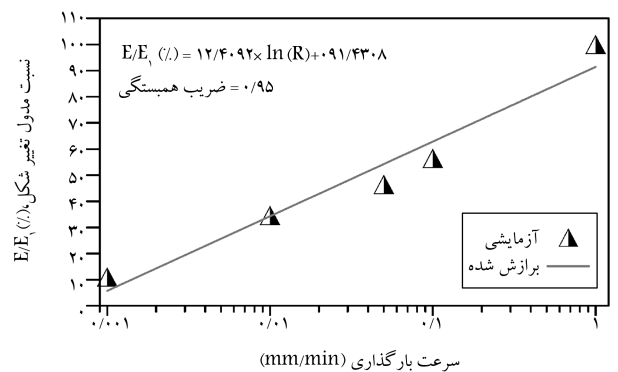
در سال ۲۰۰۵ محققین با انجام آزمایش‌هایی روی مدل پی دایره‌یی به قطر 70 mm واقع بر سطح توده‌ی خاک ماسه‌یی به قطر 485 mm و ارتفاع 300 mm مسلح به یک لایه‌ی ژئوگرید به قطر $d/D=6.93$ در نسبت عمق $u/D=0.36$ ضمن مطالعه‌ی پدیده‌ی خزش به مطالعه‌ی اثر نرخ بارگذاری به‌صورت کنترل تغییر مکان بر رفتار پی‌های دایره‌یی واقع بر ماسه‌ی مسلح به ژئوگرید پرداختند [۲]. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

۱. رفتار پی‌های مسلح، به‌شدت تحت تأثیر نرخ بارگذاری است (شکل ۵).

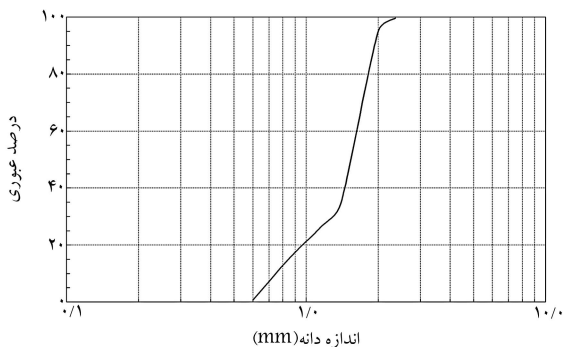
۲. اثرات نرخ تغییر مکان روی نشست خاک مسلح می‌تواند قابل توجه باشد و مدول تغییر مکان خاک ماسه‌یی مسلح به ژئوگرید با افزایش نرخ بارگذاری به‌صورت



شکل ۵. نمودار بار-نشست پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه‌ی مسلح به ژئوگرید [۹]



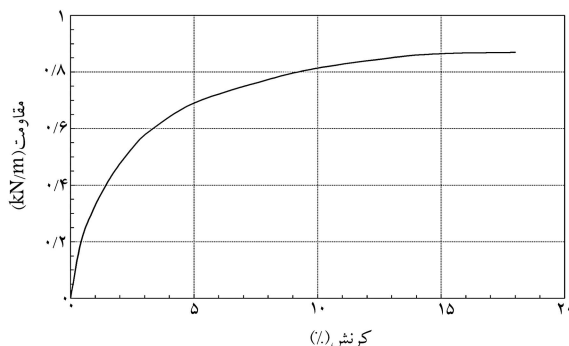
شکل ۶. تغییرات مدول تغییرشکل با نرخ بارگذاری برای پی دایره‌یی سطحی واقع بر ماسه‌ی مسلح به ژئوگرید [۹]



شکل ۹. دانه‌بندی مصالح خاکی.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکی.

پارامتر	نماینه	مقدار
ضریب یکنواختی	C_u	۲٫۱۸
ضریب خمیدگی	C_c	۱٫۳۸
اندازه‌ی مؤثر دانه‌ها	$D_{۱۰}$	۰٫۷۴۵ mm
اندازه‌ی متوسط دانه‌ها	$D_{۵۰}$	۱٫۵۴ mm
توده‌ی ویژه دانه‌ها	G_s	۲٫۶۶
نسبت تخلخل کمینه	e_{min}	۰٫۵۵
نسبت تخلخل بیشینه	e_{max}	۰٫۷۸
وزن مخصوص خشک	γ_d	۱۵٫۸ kN/m ^۳
چگالی نسبی	D_r	٪۵۶
زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه	φ	۴۱٫۵°



شکل ۱۰. آزمایش کشش ژئوگرید.

ایران است که ابعاد آن ۳ mm (متناسب با ابعاد متوسط دانه‌های خاک) است. مقاومت این ژئوگرید، با استفاده از تعدادی آزمون کششی به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که مقاومت آن بسیار ناچیز و نزدیک به ۲٫۵ درصد مقاومت ژئوگریدهای واقعی است (شکل ۱۰). سایر مشخصات ژئوگرید در جدول ۲ آورده شده است.

عرض لایه‌ی مسلح‌کننده به میزانی برابر با عرض محفظه و طول آن برابر طول محفظه (معادل ۱۵B) انتخاب شده تا کل سطح محفظه را پوشش دهد. با انتخاب این طول، همچنین از عدم رخداد کشش ژئوگرید (شکل ۱۱) اطمینان کافی حاصل می‌شود.

سیستم‌های پیشین، از تجارب و امکانات موجود برای مطالعه‌ی رفتار کمی و کیفی وسیعاً بهره می‌جوید.^[۱] اجزاء اصلی این سیستم عبارت‌اند از: ۱. محفظه‌ی خاک و ملحقات آن؛ ۲. سیستم بارگذاری؛ ۳. سیستم بارش؛ ۴. سیستم قرائت و ثبت اطلاعات؛ ۵. مدل پی که در کنار مصالح مورد استفاده برای مدل‌سازی در این بخش به اختصار تشریح شده است.

۱.۳. محفظه‌ی خاک و ملحقات آن

محفظه‌ی خاک دارای ابعاد داخلی طول ۸۰ cm، عرض ۳۴٫۲ cm و ارتفاع ۷۵ cm است. به منظور ایجاد صلبیت مورد نیاز و تقلیل تغییر شکل‌های محفظه به مقادیر ناچیز، قاب این محفظه با پروفیل‌های فلزی ساخته شده و کف آن ورق فلزی ضخیم است. سه وجه جانبی از ورق پلکسی‌گلاس ساخته شده که امکان مشاهده‌ی چگونگی ساخت نمونه و تغییر شکل خاک را فراهم می‌سازد. وجه چهارم (یکی از وجوه طولی) از ورق فلزی ساخته شده ولی برای کاهش اصطکاک جدار با مصالح، از داخل ورق پلکسی‌گلاس به آن متصل شده است. محفظه‌ی خاک روی ریلی قرار دارد که امکان جابه‌جایی آن را برای انجام عملیات بارش و بارگذاری فراهم می‌سازد.

۲.۳. سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری به صورت هوای فشرده^۴ است. سیلندر دوسر شفت دوطرفه توسط شیر متناسب‌ساز برقی (EP) که نوعی شیر تنظیم فشار است، کنترل می‌شود. این شیر به وسیله‌ی کارت D/A و نرم‌افزار توسعه‌یافته‌ی EP از سیستم رایانه‌ی فرمان می‌گیرد. بر این اساس، می‌توان بار ایستا را تا میزان معین و با سرعت مورد نظر به صورت خطی بر روی مدل پی اعمال کرد.

۳.۳. سیستم بارش

نمونه‌سازی یکی از مراحل مهم در مطالعات آزمایشگاهی است. در این تحقیق برای به دست آمدن نمونه‌ی همگن با چگالی نسبی مشخص و تکرارپذیری شرایط آزمایشگاهی، روش بارش ماسه انتخاب شده که خاک از ارتفاعی معین و با سرعتی ثابت داخل محفظه ریخته می‌شود.^[۱۰]

۴.۳. ماسه

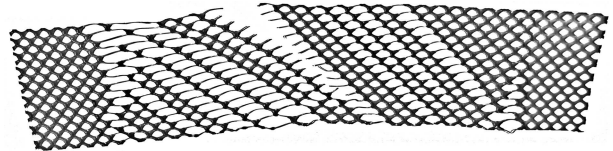
برای سهولت تحلیل نتایج به دست آمده و نیز کنترل دقیق پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش از یک‌سوی، و تسریع عملیات آماده‌سازی و تکرارپذیری آن از سوی دیگر، از مصالح ماسه‌پی خشک با دانه‌بندی یکنواخت (شکل ۹) -- که براساس طبقه‌بندی Unified در گروه SP قرار می‌گیرد -- استفاده شده است. پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی خاک براساس آزمایش‌های استاندارد تعیین، و در جدول ۱ ارائه شده است.

۵.۳. ژئوگرید

با توجه به گسترش روزافزون کاربرد مصالح بسپاری، به ویژه کاربرد ژئوگرید در مسلح‌سازی شالوده‌ها، از این مصالح برای تسلیح خاک استفاده شده است. به منظور کاهش اثر مقیاس، ضعیف‌ترین ژئوگریدهای موجود در بازار مورد بررسی قرار گرفته‌اند.^[۴] ژئوگرید منتخب و مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت مش

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید.

پارامتر	واحد	مقدار
نام تجاری	-	GS۳۵
جنس	-	HDPE
وزن	gr/m ²	۳۵°
ابعاد مش	mm	۴٫۵ × ۴٫۵
ضخامت مش	mm	۱٫۵۵
مقاومت کششی	kN/m	۰٫۸۷°
کش آمدگی در بار حداکثر	%	۱۸



شکل ۱۱. ژئوگرید مورد استفاده بعد از آزمایش کشش.

۴. آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی

۴.۱. چگونگی انجام آزمایش

ابتدا محفظه‌ی خاک زیر سیستم بارش مستقر می‌شود. خاک از صفحه‌ی مشبک با قطر چشمه‌های ۱۰ میلی‌متر در ۴ لایه (هر لایه به ضخامت ۱۴ سانتی‌متر) و از ارتفاع ثابت ۷۵ سانتی‌متر درون محفظه باریده می‌شود. ارتفاع بارش با توجه به کالیبراسیون سیستم بارش به‌گونه‌ی انتخاب شده که تغییرات آن تأثیر چندانی بر چگالی ماسه نداشته باشد. ضخامت لایه‌ی بارش نیز با توجه به حجم مخزن بارش و محدوده‌ی عدم تأثیرپذیری چگالی از ارتفاع (۷ ± ۷۵) انتخاب شده است. چگالی تمامی لایه‌ها پس از آزمایش و به‌وسیله‌ی ظروف صلبی که در گوشه‌های محفظه جاگذاری شده‌اند، کنترل می‌شود. حین بارش خاک در لایه‌ی چهارم، چنانچه مسلح‌سازی هدف باشد، بارش پس از رسیدن به ارتفاع محل استقرار مسلح‌کننده متوقف می‌شود و ژئوگرید پس از تسطیح روی سطح ماسه قرار می‌گیرد. سپس عملیات بارش تا رسیدن به سطح نهایی ادامه می‌یابد.

پس از اتمام عملیات بارش، عملیات تسطیح بدون دست‌خوردگی عمق خاک و با دقت خاصی انجام می‌شود تا سطح خاک کاملاً تراز و برای قرارگرفتن مدل پی مناسب باشد. سپس محفظه‌ی خاک به آرامی حرکت داده شده و زیر قاب بارگذاری، در محل خود ثابت می‌شود. مدل پی که قبلاً به شافت سیلندر بارگذاری متصل شده، به آرامی پایین می‌آید و روی سطح خاک قرار می‌گیرد.

دستور مورد نظر، شامل نرخ بارگذاری و بیشینه بار اعمالی به سیستم کنترل داده می‌شود. هم‌زمان سیستم کنترل و سیستم قرائت و ثبت اطلاعات فعال شده و تا پایان انجام آزمایش دستور مورد نظر پی‌گیری می‌شود و اطلاعات مورد نظر به‌منظور تحلیل نتایج قرائت و ثبت می‌شوند. مطابق جدول ۳، مجموعاً سه سری آزمایش مختلف به‌منظور نیل به اهداف این تحقیق صورت گرفته است.

۴.۲. آزمایش‌های اولیه

آزمایش‌های اولیه با هدف بررسی توانایی‌های دستگاه، دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها صورت گرفته است. با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۶۵، سرعت متوسط حدود ۰٫۲ mm/sec است.^[۱] انجام آزمایش‌های اولیه چنان است که نرخ تغییر مکان برای پی واقع بر خاک غیرمسلح در قسمت خطی در حدود متوسط و نرخ اعمال بار برای خاک مسلح و غیرمسلح یکی باشد. با توجه به نتایج این آزمایش‌ها که قبلاً آمده است:^[۱]

۱. می‌توان ظرفیت باربری پی حالت غیر مسلح (آزمایش UR۳) را با نظریه‌های موجود مقایسه کرد. با انجام تحلیل معکوس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی نزدیک ۴۵ درجه به دست می‌آید. از آنجا که معمولاً زاویه‌ی اصطکاک داخلی در حالت کرنش مسطح حدود ۳ درجه تا ۱۰ درصد بیش از حالت سه‌محوری است، نتیجه‌ی آزمایش با نظریه کاملاً مطابقت دارد.

$$q_u = 0.75 \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

۲. با افزایش عمق اولین لایه‌ی مسلح‌کننده (u)، ظرفیت باربری ابتدا تا نسبت بهینه‌ی u/B که نزدیک ۰٫۵ است (بیشینه اثر تسلیح برای نرخ بارگذاری مشخص با توجه به آزمایش‌های دیگر از نگارندگان)،^[۱] افزایش و سپس کاهش می‌یابد. روند مشاهده شده و نسبت بهینه‌ی حاصله با نتایج سایر مطالعات همخوانی

۴.۳. سیستم قرائت و ثبت اطلاعات

از حسگر اندازه‌گیر تغییر مکان (LVDT) با دامنه‌ی جابه‌جایی ۱ cm و با قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی تا سرعت ۱ m/s با دقت ۰٫۵ mm برای اندازه‌گیری نشست و از حسگر اندازه‌گیر نیرو (سلاول بار) با دینامیکی با شکل S و با ظرفیت ۲٫۵ تن برای اندازه‌گیری بار محوری اعمالی با دقت ۰٫۶ کیلوگرم استفاده شده است. چهار حساسه‌ی (سنسور) اندازه‌گیری فشار نرمال در وجوه جانبی و یک حساسه در کف، به‌منظور اندازه‌گیری فشار نصب شده است. طراحی و ساخت این حساسه نیز برای آزمایش‌های سریع چنان است که قادر به اندازه‌گیری و ثبت تغییرات سریع فشار باشد.

اطلاعات حساسه‌ها به‌صورت آنالوگ توسط یک ثبت اطلاعات ۳۲ کاناله‌ی دینامیکی، که توانایی قرائت ۵۰ داده از هر کانال در یک ثانیه را دارد، قرائت شده و به سیگنال‌های دیجیتالی تبدیل می‌شود.

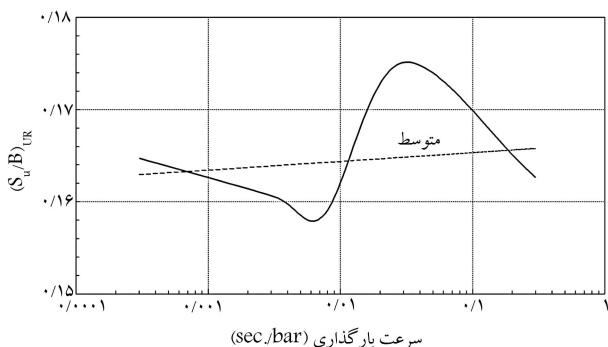
۴.۳.۱. مدل پی

مدل پی به‌منظور تحقق شرایط کرنش مسطح باید دارای سختی کافی باشد. از طرفی باید سبک باشد تا قرارگرفتن آن روی خاک، تنش اولیه‌ی ناچیزی ایجاد کند و کار کردن با آن راحت باشد. به‌همین منظور برای ساخت مدل از آلومینیوم استفاده شده است.

عرض مدل پی با توجه به طول محفظه‌ی خاک و برای کاهش اثر دیواره‌ها و تشکیل کامل گوه‌های لغزش معادل ۵ سانتی‌متر انتخاب شده است. برای رعایت صلبیت، ضخامت مدل پی نیز معادل ۷٫۵ سانتی‌متر انتخاب شده است. طول مدل پی ۳۴ سانتی‌متر و نزدیک به اندازه‌ی عرض محفظه‌ی خاک است. اختلاف ۲ میلی‌متری موجود، برای آسان قرارگیری پی در محفظه‌ی خاک و جاوگیری از درگیری مکانیکی بین مدل و محفظه حین آزمایش در نظر گرفته شده است. کف پی با چسباندن یک لایه‌ی بسیار نازک مصالح ماسه‌پی به‌کمک چسب اپوکسی زبر شده است.

جدول ۳. دسته‌بندی آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی.

نام سری آزمایش	وضعیت تسلیح		
	تعداد لایه‌ها	نسبت عمق (u/B)	طول (b/B)
آزمایش‌های اولیه	۱	۰٫۲۵ تا ۱٫۲۵	۱۵
خاک غیرمسلح	-	-	-
خاک مسلح	۱	۰٫۵	۱۵



شکل ۱۳. تأثیر نرخ بارگذاری بر نشست نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌یی غیرمسلح.

پی‌های واقع بر ماسه‌ی غیرمسلح و مقایسه با نتایج سایر محققین صورت گرفته است. در جدول ۴ خلاصه‌ی از مشخصات چند آزمایش مهم این سری ارائه شده است. چنان‌که در شکل ۱۲ نیز ملاحظه می‌شود، با افزایش نرخ بارگذاری ظرفیت باربری تا سرعت‌های متوسط کاهش و سپس افزایش می‌یابد؛ اما روند تغییرات نشست میهم بوده و با افزایش سرعت بارگذاری، اندکی افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

روند تغییرات ظرفیت باربری و نشست حالت حدی با گزارشات ارائه‌شده توسط محققین در سال ۱۹۶۵^[۲] همخوانی دارد. جالب‌ترین که نتایج حاصل از مقادیر نرخ بارگذاری کم، متوسط و سریع نیز یکسان بوده، اما موارد اختلافی نیز وجود دارد.

نشست نهایی حدود دو برابر گزارشات ارائه‌شده توسط محققین در سال ۱۹۶۵ است که علت آن تفاوت شکل پی است. لازم به یادآوری است که عمق تأثیر پی نواری تقریباً ۲ برابر پی دایره‌یی است. ظرفیت باربری در سرعت کم فقط حدود ۱۰ درصد بیشتر است درحالی‌که این مقدار در تحقیقات پیشین حدود ۳۳ درصد بوده است.

برخلاف نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده در سال ۱۹۶۵ (شکل ۳)، سختی خاک در ناحیه‌ی خطی آزمایش‌های مختلف تقریباً برابر است و منحنی‌های بار-نشست تقریباً منطبق‌اند (شکل ۱۴).

۴.۴. آزمایش‌های خاک مسلح

آزمایش‌های این سری با هدف مطالعه‌ی اثر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری نهایی و رفتار پی‌های واقع بر ماسه‌ی مسلح به ژئوگرید انجام شده است. چگالی خاک و نحوه‌ی انجام آزمایش مشابه خاک غیرمسلح بوده و تنها تفاوت، وجود یک لایه ژئوگرید در عمق بهینه (u/B=۰٫۵) است که پیش‌تر به‌وسیله‌ی آزمایش‌های اولیه تعیین شده است.

جدول ۵ خلاصه‌ی از نتایج چند آزمایش مهم این سری را نشان می‌دهد.

دارد.^[۶-۳] بنابراین، در کلیه آزمایش‌های صورت‌گرفته روی خاک مسلح، ژئوگرید در عمق بهینه قرار داده شده است.

۳. محققین از دو پارامتر نسبت ظرفیت باربری نهایی (BCR_u) و نسبت نشست نهایی (SR_u) برای بررسی تأثیر تسلیح خاک استفاده می‌کنند.

$$BCR_u = (q_u)_R / (q_u)_{UR} \quad (۲)$$

$$SR_u = (S_u)_R / (S_u)_{UR} \quad (۳)$$

که در آن‌ها $(q_u)_R$ و $(q_u)_{UR}$ به‌ترتیب ظرفیت باربری نهایی پی مسلح و غیر مسلح و $(S_u)_R$ و $(S_u)_{UR}$ به‌ترتیب نشست نهایی پی مسلح و غیرمسلح هستند. مقدار BCR_u برابر ۲٫۱۰ و SR_u متناظر ۱٫۶۰ است و در مجموع سختی خاک حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات ایستای صورت‌گرفته توسط سایر محققین نیز نسبت BCR_u را حدود ۱٫۵ تا ۲٫۵ به‌دست داده است.^[۶-۳]

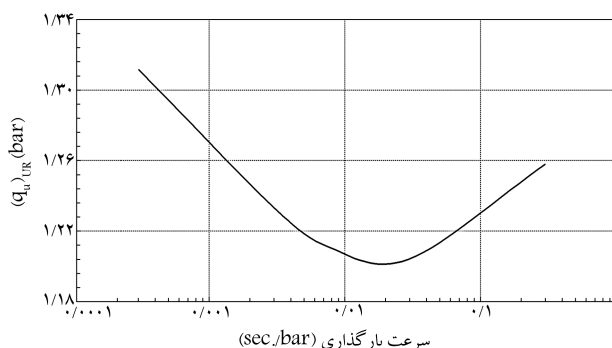
۴. تغییرات نشست نهایی با تغییرات ظرفیت باربری هم‌خوانی دارد، ولی مقدار افزایش نشست نسبت به حالت غیرمسلح کم‌تر از مقدار افزایش ظرفیت باربری است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش سختی خاک است.

۵. نمودار بار-نشست پس از ایجاد تراکم اولیه در خاک یک قسمت خطی دارد که سرعت متوسط نشست براساس آن محاسبه شده است.

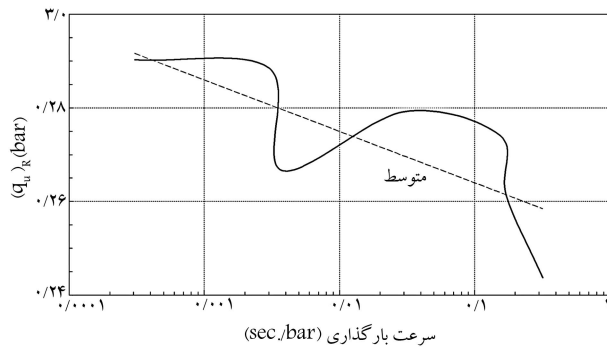
۶. پراکندگی نتایج خاک مسلح بیشتر است، چرا که امکان دارد حین نمونه‌سازی قفل و بست مناسب بین ذرات خاک و مسلح‌کننده برقرار نشود و ظرفیت باربری کم‌تر از حد انتظار مشاهده شود.

۳.۴. آزمایش‌های خاک غیرمسلح

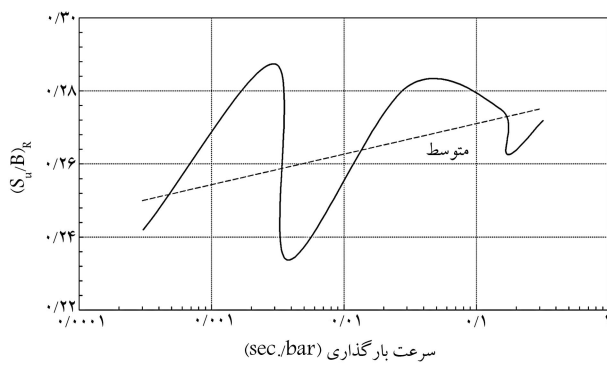
این آزمایش‌ها با هدف تعیین اثر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری و نشست نهایی



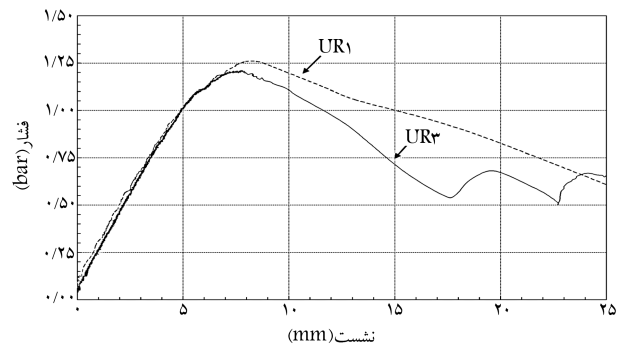
شکل ۱۲. تأثیر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌یی غیرمسلح.



شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌یی مسلح به ژئوگرید با نرخ بارگذاری.



شکل ۱۶. تغییرات نشست نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه‌یی مسلح به ژئوگرید با نرخ بارگذاری.



شکل ۱۴. مقایسه منحنی بار- نشست آزمایش‌های UR۱ و UR۳.

چنان که در شکل ۱۵ نیز ملاحظه می‌شود، برخلاف خاک غیرمسلح، ظرفیت باربری نهایی با افزایش نرخ بارگذاری فقط کاهش می‌یابد. مقدار کاهش ظرفیت باربری حدود ۱۲ درصد است. این در حالی است که نشست نهایی حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است (شکل ۱۶) و در مجموع سختی خاک کاهش یافته است.

به نظر می‌رسد در سرعت‌های کم، به دلیل فرصت ذرات برای حرکت و جابه‌جایی، تعامل کامل بین خاک و ژئوگرید رخ می‌دهد درحالی که با افزایش نرخ اعمال بار، درگیری و تعامل خاک و مسلح‌کننده به صورت کامل رخ نداده و در نتیجه ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت بارگذاری همراه با اینرسی خاک موجب می‌شود گسترش تنش به حالت سوراخ‌کنندگی^۷ نزدیک شود. در نتیجه، تنش بیشتری به ناحیه‌ی کوچک‌تری از مسلح‌کننده وارد می‌شود و به همین دلیل، همراه با کاهش ظرفیت باربری شاهد افزایش کرنش و نشست خواهیم بود.

جدول ۴. نتایج برخی از آزمایش‌های گروه الف (خاک غیرمسلح).

شماره‌ی آزمایش	سرعت متوسط نشست (mm/sec.)	سرعت متوسط بارگذاری (bar/sec.)	بار نهایی (qu) (bar)	نسبت نشست نهایی (Su/B) (%)
UR۱	۱٫۶۲۴۲	$۲۹۸٫۳ \times ۱۰^{-۲}$	۱٫۲۵۸	۱۶٫۲۷
UR۲	۰٫۱۷۶۵	$۲۹٫۷۳ \times ۱۰^{-۲}$	۱٫۲۰۴	۱۷٫۵۱
UR۳	۰٫۰۴۰۱	$۷٫۵۰ \times ۱۰^{-۲}$	۱٫۲۱۱	۱۵٫۸۶
UR۴	۰٫۰۱۶۵	$۳٫۰۸ \times ۱۰^{-۲}$	۱٫۲۳۳	۱۶٫۰۶
UR۵	۰٫۰۰۱۵۶	$۰٫۳۰ \times ۱۰^{-۲}$	۱٫۳۱۱	۱۶٫۴۷

جدول ۵. نتایج برخی از آزمایش‌های گروه ب (خاک مسلح به یک لایه‌ی ژئوگرید با طول ۱۵B و در عمق ۰٫۵B).

شماره‌ی آزمایش	سرعت متوسط نشست (mm/sec.)	سرعت متوسط بارگذاری (bar/sec.)	بار نهایی (qu) (bar)	نسبت نشست نهایی (Su/B) (%)
R۱	۱٫۲۹۷۳	$۳۱۹٫۷ \times ۱۰^{-۲}$	۲٫۴۳۷	۲۷٫۱۸
R۲	۰٫۵۵۳۲	$۱۵۳٫۷ \times ۱۰^{-۲}$	۲٫۷۴۱	۲۷٫۴۹
R۳	۰٫۱۱۶	$۲۹٫۸ \times ۱۰^{-۲}$	۲٫۷۹۱	۲۸٫۱۰
R۴	۰٫۰۱۰۷	$۳٫۰۲ \times ۱۰^{-۲}$	۲٫۸۸۵	۲۸٫۷۳
R۵	۰٫۰۰۱	$۰٫۳۱ \times ۱۰^{-۲}$	۲٫۹۰۳	۲۴٫۷۱

و نتایج محققین قبلی^[۹] وجود دارد. به نظر می‌رسد دلیل کاهش شدید مقاومت با کاهش نرخ بارگذاری، وقوع خزش در توده‌ی خاک است. در ضمن محققین قبلی از ژئوگریدهای تجاری با مقاومت کششی 12 kN/m و ضخامت گره و نوار 6.5 mm استفاده کرده‌اند که با مصالح ماسه‌یی ریز $D_{10} = 0.1 \text{ mm}$ متجانس نیست.

بررسی نمودارهای بار - نشست در آزمایش‌های این گروه نشان می‌دهد که مشابه خاک غیرمسلح، نمودار با قسمت خطی آغاز می‌شود و در نزدیکی حالت گسیختگی به قسمت غیرخطی منتهی می‌شود. همچنین، سختی خاک در ناحیه‌ی خطی آزمایش‌های مختلف تقریباً برابر است (شکل ۱۸).

مقایسه‌ی نمودار بار - نشست آزمایش‌های همسان دو گروه (شکل ۱۹) نشان می‌دهد که سختی اولیه‌ی خاک در هر دو حالت تقریباً برابر است ولی به تدریج با افزایش تغییرشکل‌ها و درگیری بیشتر خاک و مسلح‌کننده، سختی خاک مسلح افزایش می‌یابد.

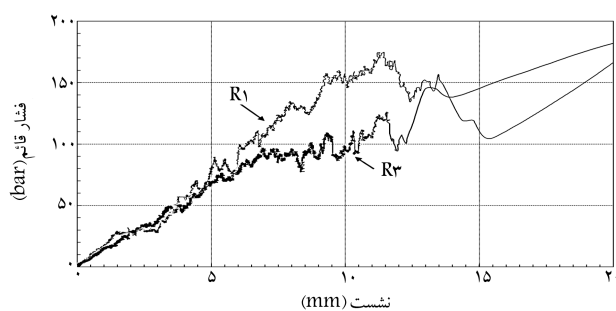
۵. نتیجه‌گیری

تأثیر نرخ بارگذاری بر رفتار خاک غیرمسلح قبلاً مشاهده و تحلیل شده و در این تحقیق نیز چنین رفتاری ملاحظه شده که نشان‌دهنده‌ی صحت و دقت مدل‌سازی است. اما در خاک مسلح دو مصالح کاملاً متفاوت کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. ماسه از مصالح دانه‌یی بدون مقاومت کششی است در حالی که ژئوگرید فاقد مقاومت فشاری و خمشی بوده، و فقط مقاومت کششی دارد. درگیری ژئوگرید با دانه‌های خاک منجر به افزایش سختی و ظرفیت باربری خاک می‌شود.

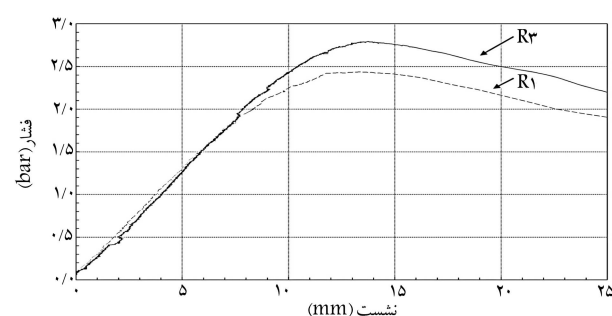
اندرکنش این دو مصالح منجر به پیچیدگی رفتار مجموعه و بروز رفتار متفاوت با خاک غیرمسلح می‌شود. به همین دلیل آزمایش‌های صورت‌گرفته به منظور بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار مدل پی نواری واقع بر خاک مسلح به ژئوگرید، نشان‌گر رفتارهایی کاملاً متفاوت با خاک غیرمسلح است. این موضوع از مهم‌ترین دستاوردها و نوآوری این مطالعه است؛ یعنی برخلاف خاک غیرمسلح، ظرفیت باربری نهایی خاک مسلح با افزایش نرخ بارگذاری کاهش و نشست نهایی خاک مسلح افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد زمان کم ذرات برای حرکت و درگیر شدن با مسلح‌کننده و نیز نزدیک شدن وضعیت گسیختگی به سوراخ‌کنندگی و در نتیجه تمرکز تنش، دلیل اصلی چنین رفتاری باشد.

پانویس

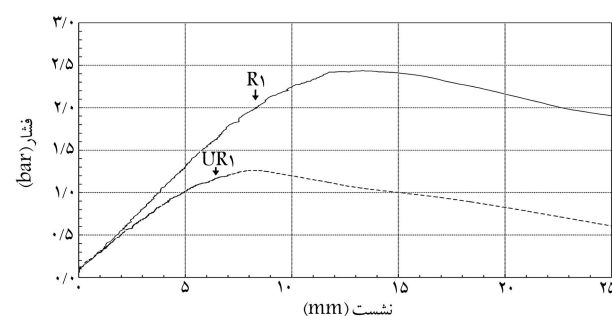
1. blast resistant structures
2. missile launching
3. inertial restraint
4. pneumatic
5. linear variable differential transducer
6. Loadcell
7. punching



شکل ۱۷. مقایسه‌ی منحنی فشار جانبی قائم - نشست آزمایش‌های R_1 و R_3 .



شکل ۱۸. مقایسه‌ی منحنی بار - نشست آزمایش‌های R_1 و R_3 .



شکل ۱۹. مقایسه‌ی منحنی بار - نشست آزمایش‌های R_1 و UR_1 .

مقایسه‌ی منحنی فشار جانبی قائم - نشست دو آزمایش ۶۴ و ۶۵ (شکل ۱۷) نشان می‌دهد که علی‌رغم فشار کم‌تر در آزمایش ۶۴، به دلیل وجود حالت سوراخ‌کنندگی، تمرکز فشار زیر پی بیشتر است و فشار خاک فرصت گسترش در توده را پیدا نکرده است. یادآور می‌شود تفاوت قابل ملاحظه‌یی بین نتایج حاضر

منابع

1. Abrishami, S. and Mirhosseini, S.M. "Design and development of a new physical model of strip footings on reinforced soil media under cyclic loadings", *Amirkabir University Journal*, (2009).
2. Vesic, A.S.; Banks, D.C. and Woodard, J.M. "An experimental study of dynamic bearing capacity of footings on

- sand", *Proc. of Sixth Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Montreal, Canada, pp. 209-213 (1965).
3. Chen, Q., *An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation*, PhD Thesis, Louisiana State University (2007).
 4. Patra, C.R.; Das, B.M. and Atalar, C. "Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid reinforced sand", *Geotextiles & Geomembranes*, **23**, pp. 454-462 (2005).
 5. Patra, C.R.; Das, B.M.; Bhoi, M. and Shin, E.C. "Eccentrically loaded strip foundation on geogrid reinforced sand", *Geotextiles & Geomembranes*, **24**, pp. 254-259 (2006).
 6. Sitharam, T.G. and Sireesh, S. "Behavior of embedded footings supported on Geogrid cell reinforced foundation beds", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **28**, pp. 452-463 (2005).
 7. De Beer, E.E. and Vesic, A. "Etude experimentale de la capacite portante du sable sous des fondations directes etablies en surface", *Annales des Travaux Publics de Belgique*, **59**, pp. 3-51 (1958).
 8. Heller, L.W., *Failure Modes of Impact-Loaded Footings on Dense Sand*, Technical Report, R-281, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, p. 31 (1964).
 9. Alawaji, H.A. "Creep and rate of loading effects on geogrid-reinforced sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, **23**, pp. 583-600 (2005).
 10. Kolbuszewski, J. "General investigation of the fundamental factors controlling loose packing of sands", *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Rotterdam, **VII**, pp. 47-49 (1948).

