

بررسی آزمایشگاهی اثر ریزشمع در پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی اشباع انزلی

علی قربانی* (دانشیار)

محمدعلی صمتی فومنی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شهریه (پیاپی ۱۳۹۹)
دوره ۲ - ۳۶، شماره ۱/۲، ص. ۲۴-۱۵

در نوشتار حاضر، تأثیر ریزشمع تزریقی در پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی اشباع انزلی با چگالی نسبی 30% و 50% با استفاده از دستگاه میز لرزه بررسی شده است. برای این منظور، ریزشمع‌هایی با رعایت قوانین مقیاس در ۳ آرایش مختلف با قطر معادل $9/9$ سانتی‌متر و طول ۲۳ سانتی‌متر تحت فشار $1/1$ بار در جعبه‌ی میز لرزه ساخته شدند. نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده‌ی آثار چشم‌گیر افزایش تعداد ریزشمع‌ها، چگالی نسبی خاک و سربار در بیشینه‌ی مقدار نسبت اضافه فشار آب حفره‌ی و تعداد سیکل‌های لازم برای رسیدن به آن هستند. مقایسه‌های انجام شده با روش‌های موجود ارزیابی پتانسیل روانگرایی بیانگر لزوم بازنگری روش‌های مذکور با در نظر گرفتن آثار کاهش حاصل از اجرای ریزشمع در مناطق مستعد روانگرایی است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، حدود بالا و پایین جدیدی با توجه به شرایط آزمایش، جهت پیش‌بینی مقادیر 30 در ماسه‌ی خالص و مسلح شده با ریزشمع ارائه شده است.

ghorbani@guilan.ac.ir
mohammadalisomti@yahoo.com

واژگان کلیدی: ماسه‌ی انزلی، روانگرایی، میز لرزه، چگالی نسبی، ریزشمع تزریقی.

۱. مقدمه

شده بر آن می‌شود. [۱۳، ۱۴] در سال‌های اخیر، مطالعه‌های زیادی جهت بررسی پارامترهای مختلف مؤثر در عملکرد لرزه‌ی ریزشمع‌ها انجام شده است. [۱۳-۱۷] برخی پژوهشگران با انجام یک سری آزمایش‌های سائتریفوژ، آثار کاهش‌دهی ریزشمع در پتانسیل روانگرایی خاک ماسه‌ی اشباع را گزارش کردند. در آزمایش‌های اشاره شده جهت مدل‌سازی ریزشمع تزریقی، سطح بیرونی غلاف ریزشمع مدل شده با چسباندن ذرات ماسه‌ی اندود شد و سپس به داخل سوراخ حفاری شده در خاک ماسه‌ی رانده شد. [۱۸، ۱۹] در حالی که مک مانوس^۲ و همکاران (۲۰۰۵)، اثر تزریق دوغاب در اجرای ریزشمع در خاک ماسه‌ی خشک را با انجام یک سری آزمایش‌های میز لرزه بررسی و با اندازه‌گیری مقادیر کرنش سیکلی، افزایش مقاومت خاک در برابر روانگرایی در خاک مسلح شده با ۲ ریزشمع مایل را گزارش کردند. [۲۰]

در پژوهش حاضر، اثر ریزشمع تزریقی در میزان کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی اشباع انزلی با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه ($g-1$) بررسی شده است. منطقه‌ی انزلی به دلیل قرار گرفتن در پهنه‌ی زلزله‌خیزی با خطر نسبی زیاد بر طبق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ با پتانسیل روانگرایی بالایی دارد و این امر اهمیت پژوهش حاضر را روشن می‌سازد. روش به کار گرفته شده در پژوهش حاضر، کاملاً جدید است؛ زیرا با توجه به مطالعات پیشین، تأثیر تزریق دوغاب در اجرای ریزشمع در ماسه‌ی اشباع تاکنون بررسی نشده است. بنابراین از طریق آزمایش‌های میز لرزه، اثر تعداد ریزشمع، چگالی نسبی خاک، و سربار^۳ سنگی خشک در سه آرایش مختلف ریزشمع‌ها مطالعه شده

پدیده‌ی روانگرایی که در خاک‌های سست اشباع غیرچسبیده تحت اثر اعمال بارهای استاتیکی و دینامیکی روی می‌دهد، منجر به بروز خسارت‌های زیاد به سازه‌های موجود همچون سدها و خاکریزها می‌شود. [۲۱] پدیده‌ی اشاره شده در زلزله‌ی متحیل و رودبار استان گیلان (۱۳۶۹) مشاهده شد و عوارضی مانند: نشست‌های متقارن و نامتقارن پی‌ها، ترک‌های عریض و طویل و جوشش ماسه را به همراه داشت. [۳] طی سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی، از قبیل: زهکش‌های شنی، ستون‌های سنگی، ستون اختلاط عمیق خاکی، تراکم دینامیکی، انواع روش‌های تثبیتی، تزریق پرفشار و شمع‌های تراکمی و غیرتراکمی جهت بهسازی خاک‌های ماسه‌ی مستعد روانگرایی مطالعه شده است. [۴-۹] به منظور کاهش خطرات ناشی از روانگرایی و افزایش پایداری پی‌ها و ساختمان‌های ساخته شده بر آن‌ها، استفاده از ریزشمع‌های تزریقی^۱ که در واقع به شمع‌های تزریقی جایگزینی و حفاری شده با قطر کمتر از ۳۰ سانتی‌متر اطلاق می‌شود، رواج بسیاری در ساخت و سازه‌های شهری پیدا کرده است. [۱۰] به دلیل فضای کم موردنیاز برای اجرا و نداشتن سر و صدا و لرزش، استفاده از ریزشمع در مناطق مسکونی توصیه می‌شود. [۱۰] ریزشمع‌های شبکه‌ی با افزایش ظرفیت باربری خاک باعث کاهش نشست پی و سازه‌های ساخته

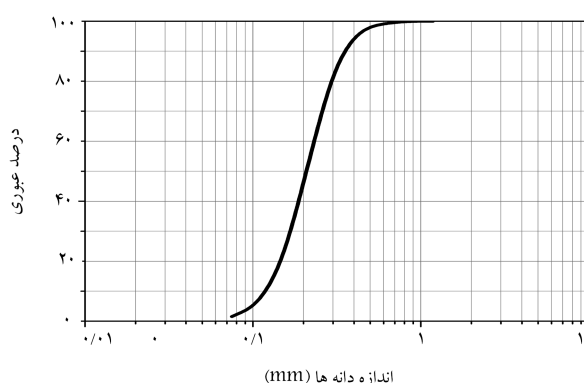
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۴/۳۱، پذیرش ۱۳۹۷/۵/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.50037.2278

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی بندر انزلی.

تخلخل بیشینه (e_{max})	۰/۸۸
تخلخل کمینه (e_{min})	۰/۶۶
ضریب یکنواختی (C_u)	۱/۸۳
ضریب خمیدگی (C_c)	۱/۲۳
چگالی ویژه (G_s)	۲/۶۵
قطر متوسط (D_{50})	۰/۲۱
قطر موثر	۰/۱۲



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی بندر انزلی.

است، که حدود بالا و پایینی^۴ جهت پیش‌بینی نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی در ماسه‌ی خالص و مسلح‌شده با ریزشمع تزریقی با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده ارائه شده است.

۲. خصوصیات مصالح آزمایش

خاک ماسه‌یی استفاده شده در آزمایش‌های انجام شده از ناحیه‌ی ساحلی انزلی تهیه شده است که نمودار دانه‌بندی و خصوصیات آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است که نشان‌دهنده‌ی ماسه‌ی بدانه‌بندی شده (SP) براساس طبقه‌بندی یونیفاید است.

۳. تجهیزات آزمایش

۳.۱. تانک شفاف و میز لرزه

تانک شفاف به‌صورت مکعب‌مستطیل با بدنه‌ی پلکسی‌گلاس (پلاستیک فشرده) است. ارتفاع، طول، عرض و ضخامت آن به ترتیب ۴۵، ۵۳، ۵۰ و ۱ سانتی‌متر است. صفحات پلاکسی‌گلاس به وسیله‌ی پیچ‌ها و چسب مخصوص به هم متصل و آب‌بند شده‌اند. میز لرزه با استفاده از الکتروموتوری با توان ۲/۲ کیلووات که قابلیت ایجاد ۲۰۰ دور بر ثانیه را دارد، لرزانده می‌شود.^[۲۱] همچنین ورقه‌هایی از فوم به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر برای کاهش موج‌های بازتابی ناشی از مرز صلب در دو طرف قسمت داخلی تانک (در جهت عمود بر لرزش) قرار داده شدند،^[۲۲] و به منظور جلوگیری از ورود خاک و آب به داخل حفره‌های فوم، سطح آن‌ها با پوشش پلاستیکی نازکی پوشانده شد.

۲.۳. قرائت تغییر مکان افقی و شتاب تانک

حرکت افقی تانک توسط یک مبدل تفاضلی متغیر خطی^۵ با دامنه‌ی ۳۷ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که به‌صورت افقی و قائم بر سطح خارجی تانک نصب شده است، ثبت می‌شود. همچنین یک عدد شتاب‌سنج^۶ برای ثبت شتاب حرکت به روی بدنه‌ی تانک نصب شده است.

۳.۳. قرائت فشار آب حفره‌یی

به علت سیکلی بودن بار وارده و تغییرات بسیار سریع فشار آب حفره‌یی از ۲ عدد مبدل فشار آب حفره‌یی جهت ثبت فشار آب حفره‌یی^۷ استفاده شده است که در ارتفاع‌های ۷/۵ و ۱۷/۵ سانتی‌متری از سطح فیلترکف تانک نصب شده‌اند. در ضمن به جهت حذف خطاهای ناشی از اعمال بار در راستای حرکت دستگاه، مبدل‌های ذکر شده در راستای عمود بر حرکت به روی دیواره‌ی تانک نصب شده‌اند تا از این طریق فشار آب موجود در وسط نمونه ثبت شود.^[۲۱] برای کالیبراسیون حسگر فشار آب، علاوه بر استفاده از متخصص ابزار دقیق، قبل از هر آزمایش با ریختن آب در ارتفاع کل تانک و سپس خالی کردن کامل آب، با ثبت کردن اعداد متناظر مربوط به ارتفاع استاتیکی آب، رابطه‌ی درون‌یابی خطی هر حسگر برای مشاهده‌ی ارتفاع آب و تغییرات آن در حین لرزش به‌دست آمده است.

۴.۳. دستگاه قرائت داده‌ها

دستگاه قرائت داده‌ها از ۴ قسمت تشکیل شده است که شامل: برد منبع تغذیه، برد درایور حسگرها، برد مبدل آنالوگ به دیجیتال و یک ترانس مبدل برق متناوب ۲۲۰ ولت شهری به برق یکنواخت با خروجی ۵ و ۱۲ ولت است. وظیفه‌ی دستگاه مذکور، قرائت داده‌های آنالوگ از حسگرها و تبدیل آن‌ها به داده‌های دیجیتال قابل قبول برای رایانه است که قسمت اصلی آن از برد مبدل آنالوگ به دیجیتال تشکیل می‌شود و قادر است در هر ثانیه ۱۲۵ داده را ثبت کند.^[۲۱]

۵.۳. دستگاه تزریق

به منظور انجام تزریق، طراحی و ساخت دستگاه تزریق در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی فنی دانشگاه گیلان انجام و پس از طراحی، ساخت، و انجام مراحل کالیبراسیون، دستگاه ساخته شده‌ی تزریق استفاده شد. همچنین، کلیه‌ی آزمایش‌های میز لرزه و آزمایش‌های پایه نیز در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه گیلان انجام شده است. اجزاء دستگاه تزریق، شامل: کمپرسور هوا به ظرفیت ۱۰ بار، مخزن دوغاب، ورودی و خروجی دوغاب از مخزن، شیر کنترل و تنظیم فشار هوای تزریق، شیلنگ تزریق و اتصال‌های مربوط بین ریزشمع و شیلنگ تزریق است. در شکل ۲، قسمت‌هایی از دستگاه تانک شفاف و دستگاه تزریق مشاهده می‌شوند.

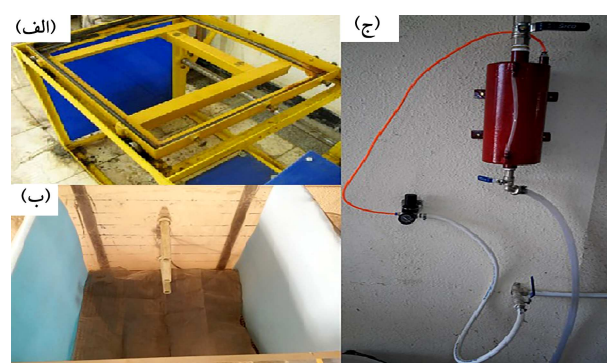
۴. آرایش ریزشمع

برای کاهش آثار مرز جانبی در اندرکنش بین ریزشمع‌ها و خاک، کمینه‌ی فاصله بین ریزشمع تا مرز جانبی (در موازات حرکت افقی) و همچنین کمینه‌ی فاصله بین انتهای ریزشمع تا کف تانک به ترتیب ۲۴ و ۱۲ برابر قطر معادل ریزشمع در نظر گرفته شده است.^[۲۳] برای رعایت آنالیز ابعادی با توجه به محدودیت‌های موجود در فراهم کردن شرایط یکسان در مدل آزمایشگاهی با شرایط واقعی، از قوانین مقیاس موجود در



الف) ایجاد سوراخ برای غلاف ریز شمع؛ ب) قراردادن غلاف ریز شمع؛ ج) انجام عمل تزریق؛ د) پس از عمل آوری ۷ روزه.

شکل ۴. جزئیات عملیات تزریق آزمایشگاهی ریزشمع تزریقی.

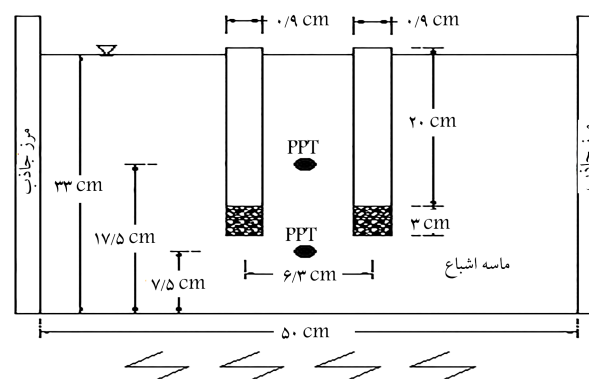


الف) میز لرزه؛ ب) تانک شفاف، مرز جاذب و لوله های سنسور فشار آب؛ ج) دستگاه تزریق آزمایشگاهی.

شکل ۲. جزئیات دستگاه آزمایش.

جدول ۲. ضرایب مقیاس در میز لرزه. [۲۴]

پارامتر	مقدار
طول	$\frac{1}{15.7}$
جرم حجمی	۱
شتاب	۱
تشن	$\frac{1}{15.7}$
زمان	$\frac{1}{15.7 \times 75}$
بسامد	15.7×75



شکل ۳. نحوه قرار گرفتن گروه ریزشمع (با دو ریزشمع) در داخل تانک شفاف.

دستگاه میز لرزه (۱g)، [۲۴] استفاده شده است که ضرایب آن در جدول ۲ ارائه شده است. لذا، در ابتدا مشخصات فنی مصالح تشکیل دهنده ریزشمع با استفاده از آزمایش های استاندارد مطابق جدول ۳ ارائه شد، [۲۵] و سپس با استفاده از روش مقطع معادل (با مبنا قرار دادن مدول کشسانی مصالح)، [۱۲] و همچنین رابطه ی ۱، [۲۴] عدد مقیاس ۱۵/۷ به دست آمد. در رابطه ی ۱، n عدد مقیاس، I_p و I_m به ترتیب بیانگر همان اینرسی معادل مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی و همچنین E_p و E_m به ترتیب بیانگر مدول کشسانی معادل ریزشمع مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی هستند. مشخصات هندسی ریزشمع های مدل شده واقعی در جدول ۳ ارائه شده است.

$$\frac{E_m I_m}{E_p I_p} = \frac{1}{n^{4.5}} \quad (1)$$

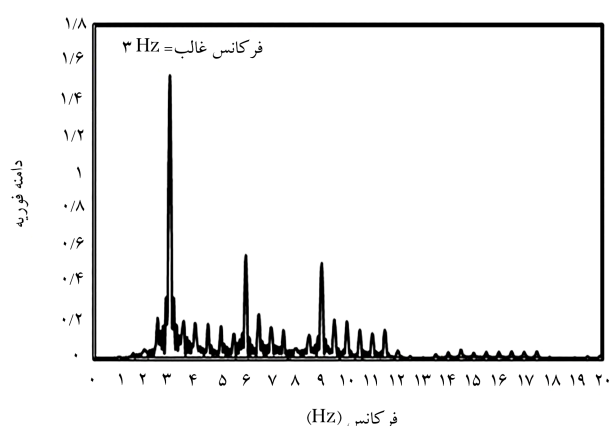
در پژوهش حاضر، از سه آرایش ریزشمع با ۱، ۲ و ۴ ریزشمع تزریقی استفاده شده است. شکل ۳، آرایش ۲ ریزشمع را نشان می دهد.

۵. مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی

خاک ماسه ای اشباع با چگالی های نسبی ۳۰٪ و ۵۰٪ به ترتیب با وزن مخصوص اشباع ۹۴۰ و ۱۹۳۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب برای ساخت مدل های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد و براساس روابط وزنی - حجمی، وزن خاک و رطوبت مورد نیاز نمونه های مختلف محاسبه شدند. سه روش کوبش مرطوب^۸، رسوب گذاری ماسه به صورت خشک^۹ و رسوب گذاری ماسه در آب^{۱۰} برای ساخت نمونه های ماسه ای در آزمایشگاه وجود دارد، [۲۶] که در مطالعه ی حاضر از روش کوبش مرطوب استفاده شد. در واقع، با استفاده از یک سری از آزمایش های پایه و صحیح خطا کردن در نمونه سازی، یک نمونه ی ۳۳ سانتی متری همگن با چگالی ۳۰٪، با کوبش یکسان توسط یک کوبه ی سبک ۶ × ۱۲ سانتی متری در ۴ لایه ی ۸/۲۵ سانتی متری در داخل تانک ساخته شد، در حالی که با چگالی ۵۰٪، نیاز به ساخت ۵ لایه ی ۶/۶۶ سانتی متری با کوبه ی مورد نظر در داخل تانک است. در گام بعدی، در نمونه های خاکی به کمک یک لوله ی فلزی توخالی به قطر ۸/۸ سانتی متر، گمانه یی به طول ۲۳ سانتی متر ایجاد شد و سپس غلاف ریزشمع در داخل آن قرار گرفت. پس از قرار دادن غلاف ریزشمع در گمانه ی ایجاد شده، عملیات تزریق با دوغاب سیمانی با نسبت آب به سیمان ۵/۸ تحت فشار ۸/۱ بار انجام پذیرفت. بلافاصله پس از تزریق دوغاب، آلمان تسلیح به صورت قائم در مرکز ریزشمع قرار گرفت. پس از ۷ روز عمل آوری ریزشمع، عملیات اشباع سازی خاک ماسه ای صورت پذیرفت. به این صورت که به کمک شیر زیرین تانک و صفحه ی مشبکی (پوشیده شده با الک نمره ۴۰۰) که در زیر نمونه ی خاک قرار داشت، با کمک جریان آب با فشار خیلی کم به مدت ۲۴ ساعت (جهت اطمینان از اشباع سازی و جلوگیری از برهم خوردن درصد تراکم خاک)، [۲۷، ۲۸] اشباع سازی انجام پذیرفت. جهت حصول اطمینان برای اشباع شدن نمونه ی خاکی، علاوه بر داده برداری دیجیتالی از حسگر فشار آب برای مشاهده فشار آب استاتیکی در وسط نمونه ی خاکی، با قرار دادن لوله های پیزومتری به آرامی در نقاط دیگر سطح خاک، ارتفاع آب در هر نقطه از خاک بررسی شد. در شکل ۴، جزئیات اجرای ریزشمع تزریقی در تانک شفاف مستقر بر میز لرزه مشاهده می شود. پس از آن وسایل ابزار دقیق به دستگاه ثبت داده متصل و پس از ۵ ثانیه از ثبت داده ها، نمونه های ساخته شده تحت بارگذاری دینامیکی هارمونیک با بسامد ۳ هرتز، شتاب اعمالی بیشینه ی ۰/۳۲g و زمان ۹/۵ ثانیه قرار گرفتند. تاریخچه ی زمانی تغییر مکان افقی، شتاب اعمالی و سرعت حرکت افقی تانک در شکل ۵ ارائه شده است، و شتاب بیشینه ی ۰/۳۲g در واقع براساس متوسط شتاب بیشینه در زلزله های رودبار و منجیل سال ۱۳۶۹ انتخاب شده است.

جدول ۳. مشخصات فنی ریزش‌ها.

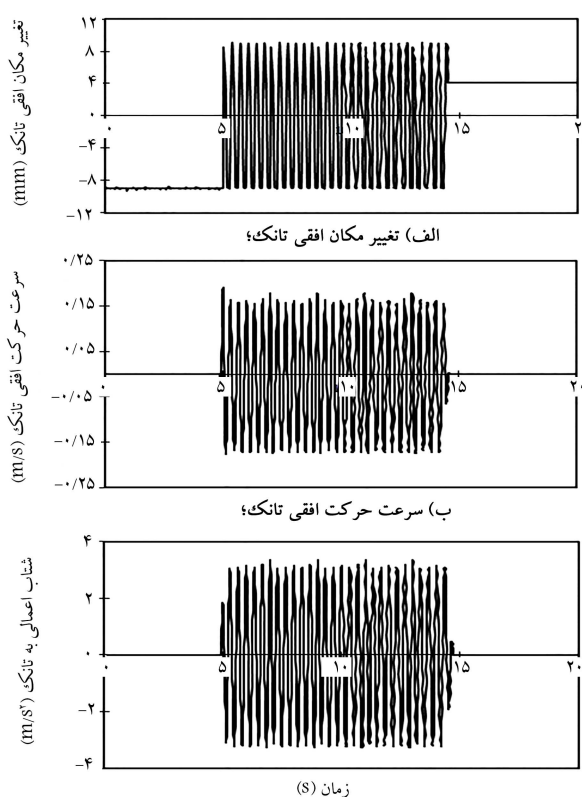
نوع	آزمایشگاهی	نمونه‌ی واقعی
جنس غلاف	پلاستیک نرم	فولاد
طول غلاف (m)	۰٫۲	۳٫۱۴
ضخامت غلاف (cm)	۰٫۰۶	۱
قطر داخلی ریزش (cm)	۰٫۷	۱۱
شعاع دوغاب خالص اطراف غلاف (cm)	۰٫۱	۲
شعاع نفوذ دوغاب در ماسه‌ی اطراف غلاف (cm)	۰٫۳	۵
قطر المان تسلیح (cm)	۰٫۱۲	۱۸
مدول کشسانی غلاف (GPa)	۰٫۰۰۶	۲۰۰
مدول کشسانی ماسه‌ی دوغابی (GPa)	۰٫۲	۰٫۲
مدول کشسانی دوغاب (GPa)	۳۰	۳۰
مدول کشسانی المان تسلیح (GPa)	۱۰۰	۲۰۰



شکل ۶. طیف فوری دامنهی شتاب ورودی به تانک.



شکل ۷. برش عرضی از پروفیل خاک بعد از اجرای ریزش و عمل‌آوری.



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی.

در شکل ۶، نیز طیف فوری دامنهی شتاب ورودی به تانک مشاهده می‌شود که مطابق آن، بسامد غالب وارده، یعنی بسامد ارتعاش‌هایی که در آن بیشینه‌ی مقادیر طیف دامنهی فوری ایجاد می‌شود، برابر ۳ هرتز است. شکل ۷، یک برش عرضی از پروفیل خاک بعد از اجرای ریزش و عمل‌آوری را نشان می‌دهد که دوغاب نفوذی به ماسه‌ی اطراف غلاف ریزش به خوبی نمایان است. همچنین شکل ۸، جزئیات ریزش تزیقی ساخته شده پس از عمل‌آوری را نشان می‌دهد. مشخصات آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است.

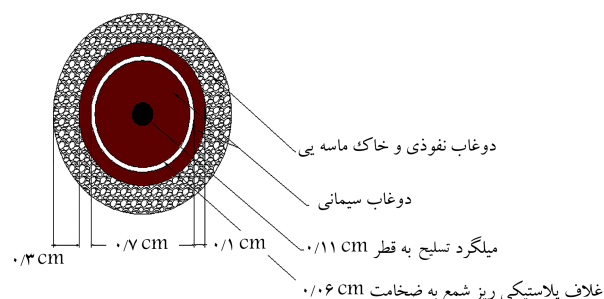
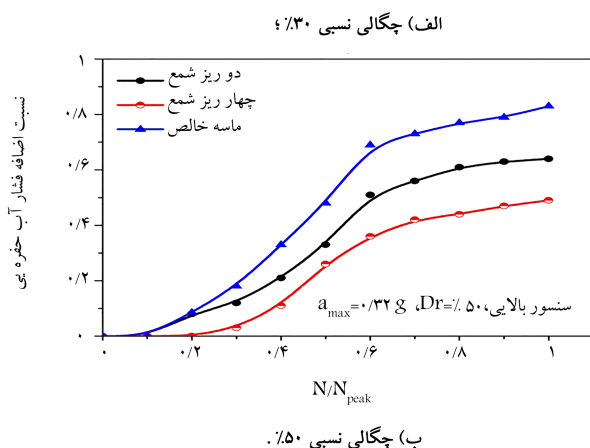
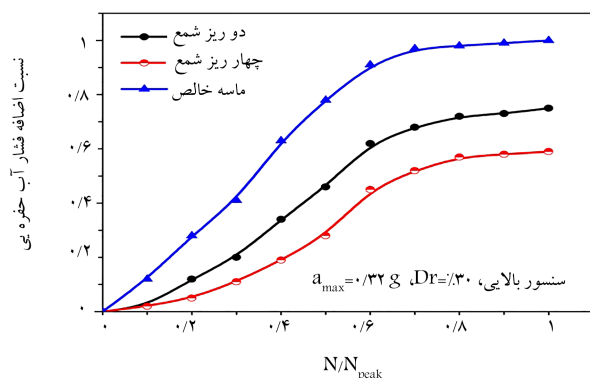
۶. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

۱۶. اثر چگالی نسبی خاک در کاهش پتانسیل روانگرایی

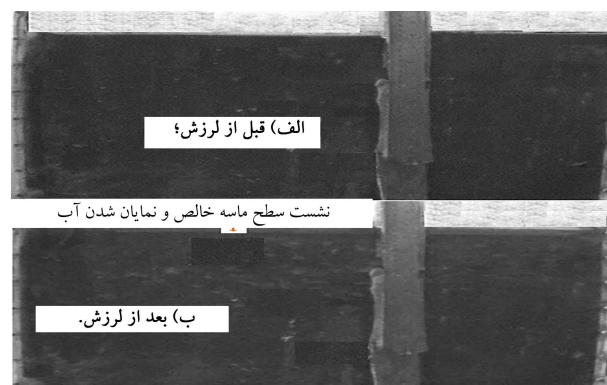
لایه‌های زیرسطحی منطقه‌ی ساحلی انزلی اغلب از خاک‌هایی با تراکم سست تا متوسط تشکیل شده است. [۲۷، ۲۸] بنابراین در پژوهش حاضر با انتخاب دو چگالی نسبی متفاوت (۳۰٪ و ۵۰٪)، سرعت ایجاد فشار آب و بیشینه‌ی تعداد سیکل لازم (N_{peak}) برای رسیدن به $r_{u,max}$ بررسی شده است. در شکل ۹، نشست سطح

جدول ۴. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

شماره	چگالی نسبی (%)	تعداد ریزشمع	فاصله‌ی ریزشمع‌ها (cm)	سر بار (kPa)
۱	۵۰	۰	۰	۰
۲	۵۰	۱	۰	۰
۳	۵۰	۲	۶/۳	۰
۴	۵۰	۴	۶/۳	۰
۵	۳۰	۰	۰	۰
۶	۳۰	۱	۰	۰
۷	۳۰	۲	۶/۳	۰
۸	۳۰	۴	۶/۳	۰
۹	۳۰	۰	۰	۱/۲
۱۰	۳۰	۱	۰	۱/۲
۱۱	۳۰	۲	۶/۳	۱/۲
۱۲	۳۰	۴	۶/۳	۱/۲



شکل ۸. مقطع عرضی مدل ریزشمع تزریقی بعد از عمل‌آوری.



شکل ۹. نمایش تغییرات سطح ماسه‌ی خالص قبل و بعد از لرزش.

شکل ۱۰. اثر چگالی نسبی خاک در تغییرات نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی.

نرمالیز شده (N/N_{peak}) را نشان می‌دهد که مطابق آن با افزایش چگالی نسبی خاک، مقادیر فشار آب و سرعت ایجاد آن کاهش یافته است که مطابق انتظار با کاهش تخلخل خاک، فشار آب کمتری در خاک ایجاد شده است. نتایج مشابه در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است. [۲۹ و ۲۸]

افزایش تعداد ریزشمع در مقایسه با افزایش چگالی نسبی خاک، تأثیر بیشتری در کاهش فشار آب و پتانسیل روانگرایی دارد که به وضوح در جدول ۵ نمایان

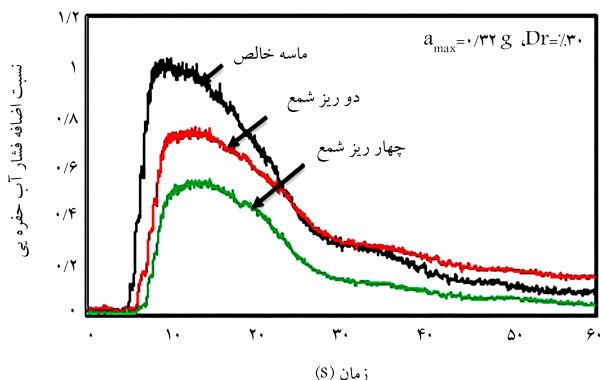
ماسه‌ی خالص بعد از روانگرایی و نمایان شدن آب به خوبی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی کاهش تخلخل خاک و یا افزایش چگالی خاک پس از لرزش است. نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی (r_u) مطابق با رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود که در آن Δu و σ'_0 به ترتیب بیانگر اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی و تنش مؤثر اولیه در ارتفاع حسگر مورد نظر هستند.

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0} \quad (2)$$

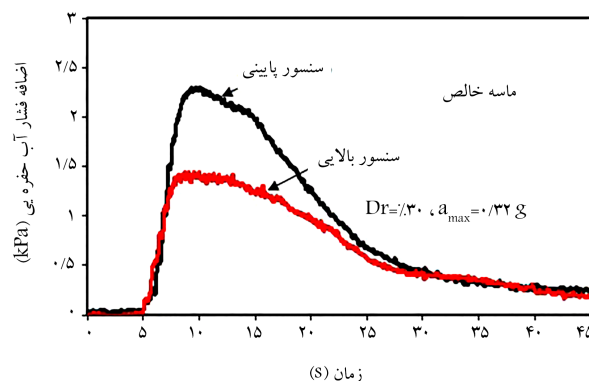
شکل ۱۰، تغییرات نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی نسبت به سیکل‌های اعمالی

جدول ۵. تغییرات مقادیر $r_{u,max}$ و N_{peak} ماسه‌ی مسلح شده نسبت به ماسه‌ی خالص.

۵۰				۳۰				چگالی نسبی (%)
بدون	۱	۲	۴	بدون	۱	۲	۴	
ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	ریزشمع	تعداد ریزشمع
۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۴۹	۱	۰/۹۶	۰/۷۵	۰/۵۹	$r_{u,max}$
-	۶	۲۱	۳۹/۵	-	۴	۲۵	۴۱	میزان کاهش $r_{u,max}$ ماسه‌ی مسلح شده نسبت به ماسه‌ی مسلح نشده (%)
۱۶/۲	۱۸	۲۱/۹	۲۶/۴	۱۲/۹	۱۵/۶	۱۹/۵	۲۲/۵	N_{peak}
-	۱۱	۳۵	۶۳	-	۲۱	۵۱	۷۴/۴	میزان افزایش N_{peak} ماسه‌ی مسلح شده نسبت به ماسه‌ی مسلح نشده (%)



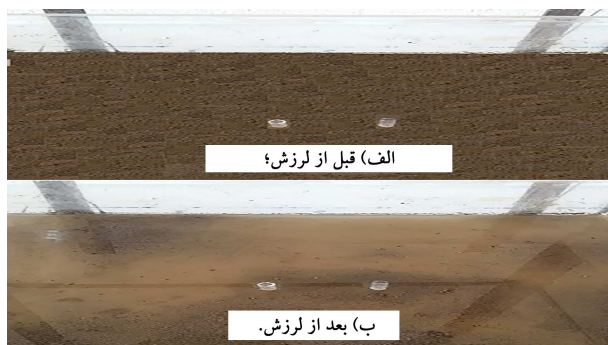
شکل ۱۲. اثر ریزشمع در تاریخچه‌ی زمانی تغییرات نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی در حسگر بالایی.



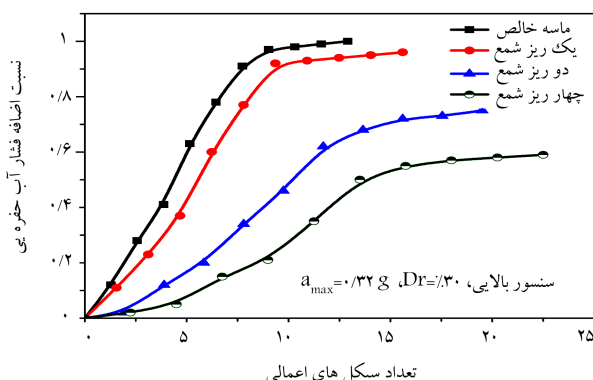
شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی تغییرات اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی.

است. همچنین در جدول مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی نسبی خاک، تعداد سیکل بیشینه‌ی مورد نیاز برای رسیدن به $r_{u,max}$ افزایش یافته است. در واقع، در خاک ماسه‌یی سست، به دلیل نزدیکی نسبت تخلخل خاک به نسبت تخلخل بحرانی، تعداد سیکل کمتری در مقایسه با حالت متراکم‌تر جهت رسیدن به حالت روانگرایی و یا نزدیک به آن مورد نیاز است.

همچنین در شکل ۱۱، تاریخچه‌ی زمانی تغییرات اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی در دو عمق مختلف خاک مشاهده می‌شود که مطابق آن، فشار آب حفره‌یی اضافی با افزایش عمق خاک به دلیل دور شدن از مرز زهکشی (سطح بالای نمونه) افزایش بیشتری را نشان می‌دهد که این موضوع در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است. [۲۸] همچنین فشار آب در عمق پایینی، زودتر از عمق بالایی شروع به کاهش کرده است که نشان‌دهنده‌ی جریان آب به سمت سطح خاک و وقوع نشست سطح خاک است.



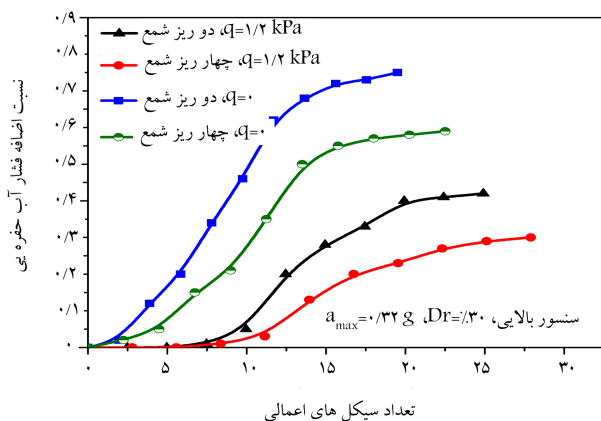
شکل ۱۳. نمایش تغییرات نمونه‌ی مسلح شده با ریزشمع، قبل و بعد از لرزش.



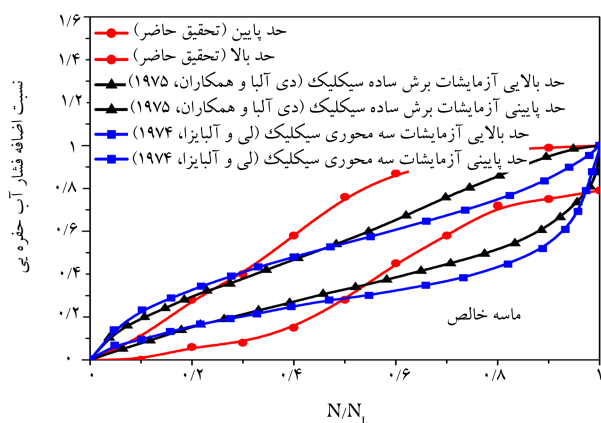
شکل ۱۴. اثر ریزشمع در تغییرات نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی نسبت به سیکل‌های اعمالی.

۲.۶. تأثیر ریزشمع در کاهش پتانسیل روانگرایی

تأثیر ریزشمع در تغییرات مقادیر نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی در خاک ماسه‌یی با چگالی نسبی ۳۰٪ در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که مطابق آن سرعت ایجاد فشار آب حفره‌یی با افزایش تعداد ریزشمع کاهش یافته است. شرایط نمونه‌ی مسلح شده با ریزشمع قبل و بعد از لرزش (تحت شتاب کمتر از $0.1g$) نیز در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که مطابق آن در ناحیه‌ی مسلح نشده‌ی خاک، نشست بیشتری نسبت به ناحیه‌ی مسلح شده وجود دارد که می‌توان آن را به کاهش فشار آب در ناحیه‌ی دوغابی و همچنین به افزایش چگالی در اطراف ریزشمع مرتبط دانست. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تعداد سیکل لازم برای رسیدن به بیشینه‌ی مقدار نسبت اضافه‌ی فشار آب حفره‌یی با افزایش تعداد ریزشمع افزایش می‌یابد که مطابق جدول ۵، افزایش در



شکل ۱۷. تأثیر سربار سنگی در تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره ای نسبت به سیکل های اعمالی.

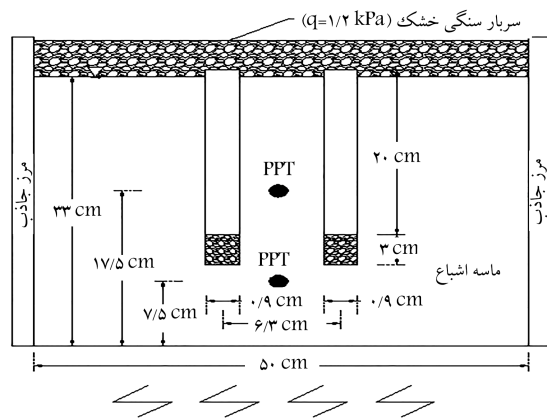


شکل ۱۸. مقایسه ای حدود پیشنهادی پژوهش حاضر و مطالعات پیشین.

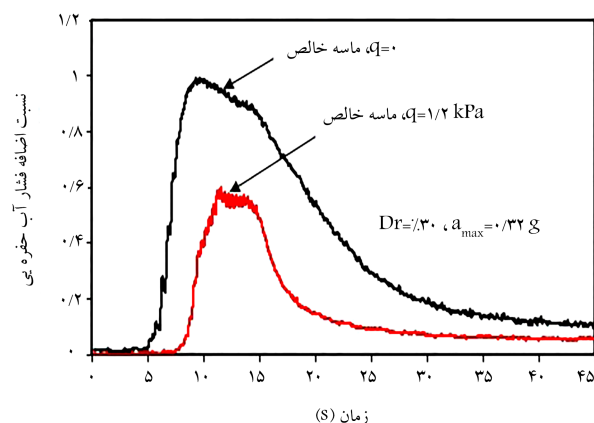
حضور ۴ ریزشمع به بیشترین مقدار خود می رسد. کاهش فشار آب و افزایش مقاومت در برابر روانگرایی را می توان ناشی از افزایش سختی خاک، افزایش تراکم موضعی در خاک اطراف ریزشمع و به خصوص پیوند دوغاب، و خاک اطراف ریزشمع دانست. در واقع با محدودیت در مقابل ایجاد فشار آب در ناحیه ی ریزشمع ها، تولید فشار آب حفره ای کاهش می یابد. در حالی که ملاحظه می شود یک ریزشمع، تأثیر ناچیزی در کاهش مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره ای داشته است.

۷. حدود تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره ای

در شکل ۱۸، حدود بالا و پایین مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره ای به دست آمده بر حسب سیکل های نرمالیز شده (N/N_L) در ماسه ی مسلح نشده با چگالی های نسبی ۳۰٪ و ۵۰٪ تحت بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و $0.32g$ با حدود ارائه شده توسط لی و آلبازا (براساس نتایج آزمایش های سه محوری سیکلیک) [۲۰]، دی آلبا و همکاران (براساس نتایج آزمایش های برش ساده ی سیکلیک) [۲۱] مقایسه شده است. N_L تعداد سیکل لازم برای رسیدن به مقدار بیشینه ی نسبت اضافه فشار آب حفره ای (روانگرایی و یا نزدیک به روانگرایی) است. ملاحظه می شود که در نسبت N/N_L کوچک تر از ۰.۴، هم پوشانی قابل توجهی بین حدود پیشنهادی پژوهش حاضر با حدود ارائه شده در مطالعات پیشین وجود دارد، در حالی که هم پوشانی مذکور با افزایش مقادیر N/N_L (از ۰.۴ به ۱) کاهش یافته است که این عدم تطابق می تواند ناشی از شتاب های القایی بالا در میز لرزه در مقایسه با شتاب های اعمالی در سه محوری سیکلیک و برش ساده ی



شکل ۱۵. نمای شماتیک نمونه سازی با ریزشمع و سربار.



شکل ۱۶. تأثیر سربار سنگی در تاریخچه ی زمانی تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره ای ماسه ی خالص.

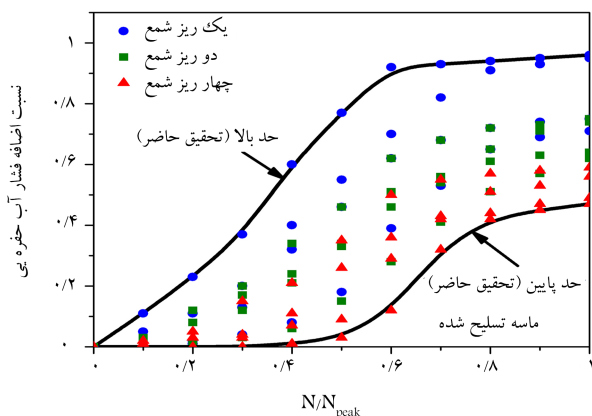
۳.۶. اثر سربار سنگی در کاهش پتانسیل روانگرایی

به منظور بررسی اثر سربار در پتانسیل روانگرایی خاک ماسه ای از یک لایه ی سربار سنگی (معادل ۱/۲ کیلو پاسکال) با قابلیت زهکشی بالا مطابق شکل ۱۵ استفاده شده است. شکل ۱۶، نشان دهنده ی کاهش قابل توجه مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره ای و سرعت تغییرات آن در اثر اعمال سربار در ماسه ی مسلح نشده است، به طوری که مقدار $r_{u,max}$ از ۱ به ۰.۵۹ (۴۱٪ کاهش) تنزل یافته است. همچنین ملاحظه می شود که تعداد سیکل لازم برای رسیدن به $r_{u,max}$ ۴۶٪ (از ۱۲/۹ به ۱۸/۹) افزایش یافته است که با نتایج مطالعات پیشین، مطابقت قابل توجهی دارد. [۲۷]

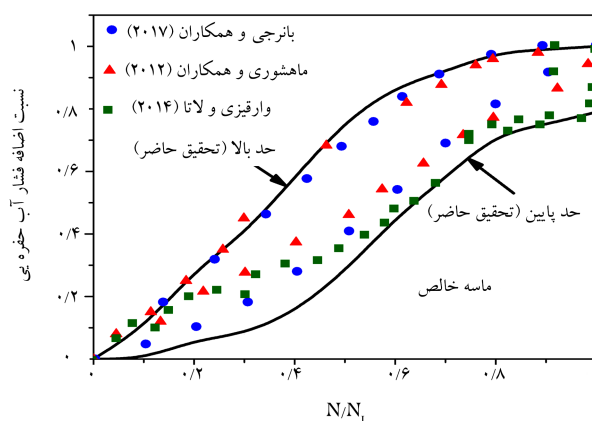
شکل ۱۷، تأثیر سربار در پتانسیل روانگرایی خاک مسلح شده با ریزشمع را نشان می دهد. نتایج به دست آمده، نشان دهنده ی تأثیر بسیار قابل توجه سربار در کاهش مقادیر r_u است؛ به طوری که در ماسه ی مسلح شده با ۲ و ۴ ریزشمع، مقدار

جدول ۶. مقادیر پارامترهای مؤثر در روانگرایی در پژوهش حاضر و در مطالعات پیشین.

مطالعات مختلف				پارامترهای مؤثر
پژوهش حاضر	وارقیزی ولاتا (۲۰۱۴)	بانرجی و همکاران (۲۰۱۷)	ماهشوری و همکاران (۲۰۱۲)	
۵°	۱۲°	۹°	۱۰.۵	طول بعد افقی در جهت لرزش (سانتی متر)
۵° و ۳۰°	۴۳ تا ۶۷	۴۸.۷	۲۵	چگالی نسبی (%)
۰/۳۲	۰/۱۵ تا ۰/۱	۰/۳۵	۰/۳	شتاب اعمال (g)
۳	۴ تا ۱	۲	۵	بسامد (هرتز)
۰/۲۱	۰/۷	۰/۳۶	۰/۲۵	قطر متوسط ذرات ماسه (میلی متر)
۳۲ و ۳۴	-	۳۲	-	زاویه اصطکاک داخلی ذرات ماسه (درجه)



شکل ۲۰. حدود تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای خاک تسلیح شده با ریزش‌های تریبی.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی حدود پیشنهادی پژوهش حاضر با مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای به دست آمده از میز لرزه در مطالعات پیشین.

با توجه به اینکه نتایج حاصل از خاک مسلح شده با ریزش تریبی، داخل حدود پیشنهادی برای ماسه‌ی خالص قرار نمی‌گیرد، حدود بالا و پایین جدیدی مطابق شکل ۲۰ برای خاک مسلح شده با در نظر گرفتن شرایط آن (در نمونه‌ی خاکی با دو چگالی ۳۰٪ و ۵۰٪ و با بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و ۰/۳۲g) پیشنهاد شده است. با عنایت به عدم ارائه‌ی حدودی جهت پیش‌بینی تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک مسلح شده با ریزش در مطالعات پیشین، نمودار پیشنهادی می‌تواند به مهندس طراح جهت تعیین ضریب اطمینان پی‌ها در مقابل پدیده‌ی روانگرایی که خاک زیر آن‌ها با ریزش‌های تریبی بهسازی شده است، کمک بسزایی ارائه کند.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با ساخت ریزش‌های تریبی با رعایت شرایط مرزی و قوانین مقیاس، همچنین برای نخستین بار با طراحی دستگاه تزریق آزمایشگاهی، اقدام به تزریق ریزش‌های تحکیمی در دستگاه میز لرزه شده است تا رفتار لرزه‌ی ریزش‌ها به صورت نزدیک به واقع بررسی شود. لذا یک سری آزمون‌های میز لرزه انجام و آثار پارامترهای: تعداد ریزش، چگالی نسبی خاک و همچنین سربار خاکی در پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی اشباع انزلی بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

- با افزایش چگالی نسبی خاک (از ۳۰٪ به ۵۰٪)، به دلیل کاهش تخلخل خاک (دور شدن از تخلخل بحرانی) و افزایش تنش مؤثر، فشار آب اضافی ایجاد می‌شود

سیکلیک باشد. همچنین تنش محصورکننده در پژوهش حاضر، در حدود ۰/۲ تنش محصورکننده‌ی آزمایش‌های سه‌محوری یا برش ساده‌ی سیکلیک است. بنابراین، عدم تطبیق ذکر شده کامل می‌تواند ناشی از تفاوت مقیاس در دو آزمایش باشد، در واقع هر کدام از آزمایش‌ها بیانگر شرایط واقعی با توجه به مقیاس‌های خودشان هستند. این موضوع می‌تواند در مطالعات آینده در خاکی با چگالی‌های بالاتر و با شتاب‌ها و بسامدهای مختلف ارزیابی بیشتری شود.

در شکل ۱۹، حدود پیشنهادی در پژوهش حاضر برای ماسه‌ی مسلح نشده با نتایج مطالعات پیشین در دستگاه میز لرزه، [۳۳، ۳۲، ۲۹] مقایسه شده است که با توجه به تفاوت در برخی از پارامترهای مؤثر در روانگرایی (جدول ۶) مشاهده می‌شود که حدود پیشنهادی $(N/N_L - r_u)$ پژوهش حاضر، تقریباً نتایج میز لرزه‌ی مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد، ولی کاملاً منطبق نیستند. لذا چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج پژوهش‌های پیشین در محدوده‌ی حد بالا و پایین آزمون‌های پژوهش حاضر قرار گرفته‌اند، ولی لزوماً داده‌های حاصل، منطبق نیستند. دلیل نزدیک بودن مقادیر نیز احتمالاً تنش محصورکننده‌ی تقریباً نزدیک و کم در آزمایش‌های میز لرزه و نوع خاک است. بنابراین علی‌رغم تعداد پایین آزمون‌ها با توجه به قرار گرفتن محدوده‌های مطالعات پیشین در محدوده‌ی پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن شرایط آن (در نمونه‌ی خاکی با دو چگالی ۳۰٪ و ۵۰٪ و با بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و ۰/۳۲g) محدوده‌ی ذکر شده قابل استناد است. همچنین می‌توان بیان کرد که با رعایت شرایط مقیاس و استفاده از مرزهای جاذب در پژوهش حاضر، به طور قابل قبولی اثر کوچک مقیاس بودن محفظه‌ی صلب از بین رفته است.

- مقایسه‌ی حدود بالا و پایین پیشنهادی پژوهش حاضر در ماسه‌ی خالص (در نمونه‌ی خاکی با دو چگالی ۳۰٪ و ۵۰٪ و با بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و ۳۲g) با حدود پیشنهادی لی و آلبایزا (۱۹۷۴) و همچنین دی آلبا و همکاران (۱۹۷۵)^[۳۱،۳۰] نشان داد که حدود پیشنهادی در مطالعات پیشین به دلیل شتاب بالای اعمالی در میز لرزه و همچنین تنش محصورکننده‌ی کمتر آزمایش‌های میز لرزه و یا به بیان دیگر تفاوت در مقیاس آزمایش‌ها، تطابق کاملی در مقادیر r_u بر حسب N/N_L با هم ندارند.
- با استفاده از نتایج به‌دست آمده‌ی حدود بالا و پایین جدیدی جهت پیش‌بینی مقادیر $(N/N_L - r_u)$ در ماسه‌ی خالص با در نظر گرفتن شرایط آن (در نمونه‌ی خاکی با دو چگالی ۳۰٪ و ۵۰٪ و با بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و ۳۲g) ارائه شده است.
- حدود بالا و پایین جدیدی جهت پیش‌بینی $(N/N_{peak} - r_u)$ در محدوده‌ی خاک (با دو چگالی ۳۰٪ و ۵۰٪) مسلح شده با ریزشمع تحت بسامد و شتاب هارمونیک اعمالی به ترتیب ۳ هرتز و ۳۲g ارائه شده است.
- نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بهسازی خاک‌های مستعد روانگرایی به کمک روش‌هایی مانند: ریزشمع‌های تزریقی، متراکم‌سازی خاک، قرار دادن سربارهای خاکی و یا ترکیبی از آن‌ها می‌تواند خسارت‌های ناشی از پدیده‌ی روانگرایی را به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش دهد.
- و مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ی کاهش می‌یابد، به‌طوری که مقادیر $r_{u,max}$ حدود ۲۰٪ کاهش یافتند.
- تعداد سیکل موردنیاز جهت رسیدن به $r_{u,max}$ با افزایش چگالی نسبی خاک افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت خاک در برابر روانگرایی است.
- یک ریزشمع تزریقی، تأثیر ناچیزی در کاهش تولید فشار آب و همچنین کاهش پتانسیل روانگرایی دارد که همخوانی قابل توجهی با مطالعات پیشین دارد.
- مقادیر $r_{u,max}$ با افزایش تعداد ریزشمع به ۲ و ۴ عدد، به طور میانگین به ترتیب ۲۲٪ و ۴۰٪ کاهش یافت، که ناشی از تراکم موضعی در خاک اطراف ریزشمع و به خصوص محدودیت در برابر ایجاد فشار آب در ناحیه‌ی ماسه‌ی تزریقی اطراف ریزشمع است.
- تعداد سیکل موردنیاز جهت رسیدن به $r_{u,max}$ در خاک مسلح شده با ۲ و ۴ ریزشمع در چگالی نسبی ۳۰٪ به ترتیب ۵۱٪ و ۷۴٪ افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه مقاومت خاک در برابر روانگرایی پس از تسلیح است.
- با قرار دادن سربار سنگی خشک بر روی لایه‌ی ماسه‌ی اشباع مسلح شده و مسلح نشده، مقادیر $r_{u,max}$ به‌طور قابل توجهی کاهش و تعداد سیکل بیشینه‌ی موردنیاز جهت رسیدن به $r_{u,max}$ افزایش یافتند.

پانویس‌ها

1. grouted micropile
2. McManus
3. surcharge
4. lower and upper bound
5. linear variable differential transformer
6. accelerometer
7. pore pressure transformer
8. moist tamping
9. dry deposition
10. water sedimentation

منابع (References)

1. Kramer, S.L. "Geotechnical earthquake engineering", Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall (1996).
2. Huang, Y. and Yu, M. "Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century", *Natural Hazards*, **65**(3), pp. 2375-2384 (2013).
3. Yegian, M.K., Ghahraman, V.G., Nogole-Sadat, M.A. and et al. "Liquefaction during the 1990 Manjil, Iran, earthquake, I: Case history data", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**(1), pp. 66-82 (1995).
4. Schaefer, V.R., Abramson, L.W., Drumheller, J.C. and et al. "Ground improvement, ground reinforcement and ground treatment: Developments 1987-1997", *Sessions of Geo-Logan '97 Conference*, pp. 616-622 (1997).
5. Adalier, K., Elgamal, A.W. and Martin, G.R. "Foundation liquefaction countermeasures for earth embankments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(6), pp. 500-517 (1998).
6. Sadrekarimi, A. and Ghalandarzadeh, A. "Evaluation of gravel drains and compacted sand piles in mitigating liquefaction", *Ground Improvement*, **9**(3), pp. 91-104 (2005).
7. Sangari, A.H. and Marandi, S.M. "Laboratory studies on the effect of vertical gravel column drains on liquefaction potential", *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, **24**(3), pp. 209-225 (2011).
8. Ghorbani, A. and Jahanpour, R. "The lateral behaviour of single 2nd International Conference piles in liquefiable soils", *In on Civil Engineering and Building Materials (CEBM)*, CRC Press, Hong Kong, pp. 447-450 (2012).
9. Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., Karimi, M. and et al. "Stabilization of problematic silty sands *Baltic Journal of Road & Bridge using microsilica and lime*", *Engineering*, **10**(1), pp. 61-70 (2015).
10. FHWA NHI (Federal Highway Administration-National Highway Institute), "Micropile design and construction-Reference manual", FHWA NHI-05-039, U.S. Dept. of Transportation, McLean, VA, pp. 1-436 (2005).
11. Tsukada, Y., Miura, K., Tsukubokawa, Y. and et al. "Mechanism of bearing capacity of spread footings re-

- inforced with micropiles", *Soils and Foundations*, **46**(3), pp. 367-376 (2006).
12. Esmaeili, M, Nik MG, Khayyer F. "Experimental and numerical study of micropiles to reinforce high railway embankments", *International Journal of Geomechanics*, **13**(6), pp. 729-744 (2012).
13. Ousta, R. and Shahrou, I. "Three-dimensional analysis of the seismic behaviour of micropiles used in the reinforcement of saturated soil", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **25**(2), pp. 183-196 (2001).
14. Isam, S., Hassan, A. and Mhamed, S. "3D elasto-plastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles", *Computers and Geotechnics*, **39**, pp. 1-7 (2012).
15. Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H. and Ghamari, E. "3D finite element analysis of seismic soil- micropile-structure interaction", *2nd International Conference on Civil Engineering and Building Materials (CEBM)*, pp. 265-9 (2012).
16. Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., Ghamari, E. and et al. "Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **58**, pp. 21-36 (2014).
17. Abdollahi, K. and Mortezaei, A. "A new expression for determining the bending stiffness of circular micropile groups", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **77**, pp. 58-70 (2015).
18. Shahrou, I. and Juran, I. "Seismic behaviour of micropile systems", *Ground Improvement*, **8**(3), pp. 109-120 (2004).
19. Mitrani, H. and Madabhushi, S.P.G. "Centrifuge tests investigating inclined grout micro-piles as a method of liquefaction remediation for existing buildings", In *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 1-12 (2005).
20. McManus, K.J., Turner, J.P. and Charton, G. "Inclined reinforcement to prevent soil liquefaction", In *Proceedings Technical Conf. New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Wairakei, New Zealand , pp. 41-51 (2005).
21. Hasani, M. "Investiagtion on the effect of dynamic force-son pore pressure variation and displacement of Anzal-isand with quick tank", M.Sc Thesis, The University of Guilan, Guilan, Iran (2009).
22. Lombardi, D., Bhattacharya, S., Scarpa, F. and et al. "Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **69**, pp. 46-56 (2015).
23. Abendroth, R.E. and Greimann, L.F. "Pile behavior established from model tests", *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**(4), pp. 571-587 (1990).
24. Wood DM. "Geotechnical modelling", CRC Press (2014).
25. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete", ACI 318R-05, USA, American Concrete Institute (2005).
26. Ishihara, K. "Soil behaviour in earthquake geotechnics", Clarendon Press, pp. 338-340 (1996).
27. Ahmadi, H., Eslami, A. and Arabani, M. "Experimental study on the settlement of marine deposits of Anzali under cyclic loading by laminar box apparatus", *Marine Georesources & Geotechnology*, **35**(3), pp. 330-8 (2017).
28. Ueng, T.S., Wu, C.W., Cheng, H.W. and et al. "Settlements of saturated clean sand deposits in shaking table tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(1), pp. 50-60 (2010).
29. Varghese, R.M. and Latha, G.M. "Shaking table studies on the conditions of sand liquefaction", In *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, pp. 1244-1253 (2014).
30. Lee, K.L. and Albaisa, A. "Earthquake induced settlements in saturated sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **100**(4), pp. 387-406 (1974).
31. De Alba, P., Chan, C.K. and Seed, H.B. "Determination of soil liquefaction characteristics by large-scale laboratory tests", *Earthquake Engineering Research Center*, University of California (1975).
32. Maheshwari, B.K., Singh, H.P. and Saran, S. "Effects of reinforcement on liquefaction resistance of solani sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(7), pp. 831-840 (2012).
33. Banerjee, R., Konai, S., Sengupta, A. and et al. "Shake table tests and numerical modeling of liquefaction of Kasai river sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**(4), pp. 1327-1340 (2017).