

چکیده

در این پژوهش با استفاده از آزمایش سه‌محوری تناوبی تأثیر عواملی مانند نسبت تنش سیکلی (CSR) و درصد ریزدانه غیر خمیری در فشار همه‌جانبه ثابت بر پتانسیل روانگرایی ماسه لای‌دار و لای‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این پژوهش تأثیر فشار وارده بر اسکلت خاک در مرحله اشباع‌سازی، بر نتایج روانگرایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج بیانگر آن است که با افزایش لای در ماسه به میزان ۳۰ درصد، کاهش مقاومت روانگرایی رخ داده و سپس با افزایش بیشتر لای، افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که با افزایش ریزدانه تا ۳۰ درصد، رفتار ماسه حاکم بوده و در مقدار ریزدانه‌های بیشتر از ۳۰ درصد، رفتار خاک ریزدانه و لای حاکم شده است. همین‌طور نتایج نمایانگر آن است که با تغییرات نسبت تنش سیکلی، میزان درصد ریزدانه‌هایی که به ترتیب بیشترین فشار آب حفره‌ای را ایجاد می‌کنند تغییر خواهند کرد. در همین راستا معادله منحنی روانگرایی محدوده کاملی از خاک‌ها ارائه شده است. از سویی دیگر، تأثیر فشار وارده بر اسکلت خاک در مرحله اشباع‌سازی (Bvalue) نمونه‌ها، بر روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های حاصل از آن، در لای خالص ناچیز بوده ولی در ماسه لای‌دار و تا حدودی ماسه آشکارتر به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی: تست سه‌محوری تناوبی، پتانسیل روانگرایی، ماسه لای‌دار، نسبت تنش سیکلی، ریزدانه غیر پلاستیک.

مطالعه آزمایشگاهی اثرات تنش سیکلی و ریزدانه غیر پلاستیک بر پتانسیل روانگرایی خاک غیر چسبنده

سینا صفر قلی تبار مرزونی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

میثم فدایی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، fadaee@srbiau.ac.ir

امین بهمن پور

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهدی درخشندی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱- مقدمه

می‌باشد. در این راستا، میورا و همکاران [۳] پدیده‌ی روانگرایی را در خاک‌های حاوی ۴۸ درصد ریزدانه گزارش نمودند. ایشیهارا [۴] در تحقیقات خود بیان داشت که پتانسیل روانگرایی تابع میزان ریزدانه غیر خمیری در نمونه ماسه نیست. از طرف دیگر بررسی‌های تعدادی از دیگر محققین نیز بیانگر این امر می‌باشد که با افزایش میزان لای در ماسه کاهش مقاومت روانگرایی رخ می‌دهد [۵-۶]. از جمله‌ی آنها ترونسکو و وردوگو [۵] به این نتیجه رسیدند که در تخلخل و دانسیته خشک ثابت خاک، با افزایش لای مقاومت روانگرایی ماسه کاهش می‌یابد. یامامورو و لید [۶] طی بررسی‌های خود با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد لای مقاومت استاتیکی ماسه‌ها در برابر روانگرایی کاهش می‌یابد. از سویی دیگر برخی از پژوهشگران طی

سابقه‌ی زلزله‌های گذشته نشان داده است که علت بسیاری از خرابی‌های ناشی از زلزله، پدیده‌ی روانگرایی است. اثرات مخرب ناشی از روانگرایی در سال ۱۹۶۴ هنگامی که زلزله گودفرایدی در آلاسکا و به دنبال آن زلزله نیگاتا در ژاپن به وقوع پیوست توجه مهندسان ژئوتکنیک لرزه‌ای را به خود جلب کرد [۱]. در سال‌های آگازین، بیشتر توجه متخصصین به بررسی این پدیده در ماسه‌های تمیز معطوف شده بود به‌طوری که تصور می‌شد روانگرایی تنها مختص ماسه‌هاست و خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه قابلیت تولید فشار اضافی آب حفره‌ای را ندارند؛ اما با گذشت زمان و وقوع زلزله‌های متعدد محققین به این نتیجه رسیدند که روانگرایی در خاک‌های غیر از ماسه نیز رخ می‌دهد [۱-۲]. مهم‌ترین این مشاهدات مربوط به زلزله سال ۱۹۹۳ هوکایدو نانسایی-اوکی،

بررسی تأثیر ریزدانه غیر پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه بلبسر با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و تناوبی زهکشی نشده در کنار یک سری تحلیل عددی پرداختند. در این پژوهش آزمایش سه‌محوری تناوبی در شرایط کنترل تنش با فرکانس ۱ هرتز و $CSR = 0/35$ برای فشار ۵۰ کیلوپاسکال و $CSR = 0/25$ برای فشار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است، نمونه‌ها شامل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد ریزدانه می‌باشد و از مدل‌سازی فین برای بررسی مقاومت روانگرایی ترکیب خاک‌ها استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن بوده که تعداد سیکل‌های منجر به روانگرایی در مخلوط ماسه و لای پس از افزایش درصد ریزدانه کاهش یافته است و در این شرایط عملکرد ضعیف‌تری در فشار و عملکرد بهتر در کشش مشاهده شده است و همچنین مرز تغییر رفتار نمونه‌ها در این پژوهش ۲۰ درصد ریزدانه می‌باشد و از سویی دیگر در درصد ریزدانه‌های کم، رفتار مخلوط ماسه و لای مشابه نمونه‌های ماسه تمیز است و تا زمانی که رفتار ماسه غالب باشد مدل‌سازی فین با نتایج آزمایش‌ها مطابقت خوبی دارد [۱۳]. قربانی و همکاران [۱۴] به بررسی تأثیر لای غیر پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه انزلی با استفاده از تست میز لرزه پرداختند. با توجه به نتایج، برای دانسته ۳۰ درصد، مقاومت روانگرایی در ابتدا با افزایش محتوای لای تا ۱۵ درصد، کاهش یافته و پس از آن افزایش را نشان می‌دهد با این حال برای دانسته ۶۰ درصد مقاومت روانگرایی با افزایش محتوای سیلت روند کاهش مداوم را نشان داده است [۱۴]. سوامی و همکاران [۱۵] به بررسی اثر ریزدانه غیر پلاستیک و ریزدانه با پلاستیسیته کم، از صفر تا ۴۰ درصد ریزدانه بر پتانسیل روانگرایی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش ریزدانه چه غیر پلاستیک و چه ریزدانه با پلاستیسیته کم مقاومت روانگرایی کاهش یافته است.

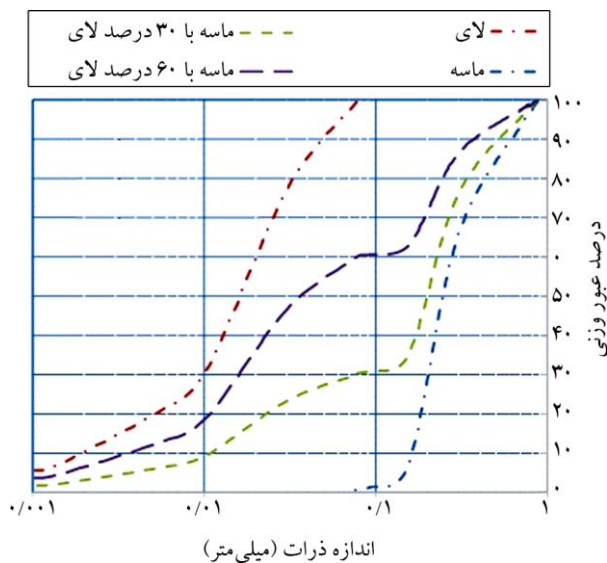
بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تاکنون اثر CSR بر روی میزان لای بحرانی در بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه با ۴۰ درصد ریزدانه تا ۱۰۰ درصد لای خالص مورد بررسی قرار نگرفته است. به عبارتی اثر توأمان CSR و مقادیر ریزدانه

بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که پتانسیل روانگرایی با افزایش لای ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۷-۱۰]. چانگ و همکاران [۷] طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در یک نسبت تخلخل ثابت با افزایش ریزدانه تا ۱۰ درصد پتانسیل روانگرایی کمی افزایش (مقاومت روانگرایی کاهش) و پس از آن کاهش می‌یابد. کوستر [۸] طی پژوهش خود بیان نمود که در یک نسبت تخلخل ثابت با افزایش درصد ریزدانه تا ۲۰ درصد نخست مقاومت روانگرایی کم و با افزایش بیشتر ریزدانه مقاومت روانگرایی افزایش می‌یابد. پولیتو و مارتین [۹] این مرز تغییر رفتار را تا ۳۵ درصد در نظر گرفته‌اند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش لای تا ۳۵ درصد مقاومت روانگرایی کاهش و پس از آن به آرامی افزایش می‌یابد. در نهایت، امینی و کی [۱۰] به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد لای از ۱۰ درصد به ۵۰ درصد، مقاومت روانگرایی ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

ماهسواری و پاتل [۱۱] به بررسی اثر میزان لای بر پتانسیل روانگرایی ماسه سولانی تحت شتاب‌های مختلف زلزله پرداختند و مشاهده نمودند که افزایش مقدار لای، تعداد سیکل‌های مورد نیاز جهت تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای را افزایش داده و همچنین برای یک سطح خاص از تحریک زلزله، نسبت تنش سیکلی (CSR)^۱، میزان تولید فشار آب حفره‌ای ماکزیمم به محتوای لای بستگی داشته است؛ بنابراین مقدار لای بحرانی جهت تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای بسته به میزان شتاب متفاوت است. آکیلا و همکاران [۱۲] نیز به بررسی خاک ماسه لای‌دار با درصد‌های مختلف ریزدانه و $Dr = 50\%$ با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و تناوبی پرداختند. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی در تحقیق آنها نشان داد که ریزدانه غیر پلاستیک تأثیر قابل توجهی در رفتار ماسه تمیز داشته و با افزایش ریزدانه تمایل به انقباض کاهش می‌یابد. همچنین نتایج سه‌محوری تناوبی نشان داده است که با افزایش محتوای ریزدانه نرخ تولید اضافه فشار آب حفره‌ای و کرنش محوری تحت بار تناوبی افزایش یافته و همچنین قابلیت و پتانسیل روانگرایی هم افزایش یافته است. چوبستی و همکاران [۱۳] به

جدول (۲): مشخصات لای.

شماره	مشخصات	نماد	مقدار
۱	نوع خاک	M	لای غیر پلاستیک
۲	چگالی دانه‌ها	Gs	۲/۵۱
۳	وزن مخصوص خشک ماکزیمم	γ_{max}	۱۴/۸ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۴	وزن مخصوص خشک مینیمم	γ_{min}	۱۱/۵۸ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش.

۲-۲- دستگاه آزمایش

در این پژوهش جهت بررسی‌های آزمایشگاهی از دستگاه سه‌محوری تناوبی موجود در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران استفاده شده است. شمای کلی دستگاه آزمایش سه‌محوری تناوبی و نمونه‌ای که مورد تست قرار گرفته در شکل (۲) نشان داده می‌شود.

۲-۳- مراحل تهیه و آزمایش نمونه

در این پژوهش آزمایش سه‌محوری تناوبی بر اساس ASTM D5311 انجام شده است [۱۶] و همچنین از روش تراکم مرطوب^۴ جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. چهار نوع خاک مورد استفاده در این پژوهش با درصد وزنی که در ادامه به آن پرداخته می‌شود تهیه شده است.

- ماسه خالص یا تمیز: S

غیر پلاستیک بر روانگرایی، در درصد ریزدانه‌های بالا به خصوص لای خالص تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است و از طرفی نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین بر روی پتانسیل روانگرایی ماسه تا ماسه لای دار با ۴۰ درصد ریزدانه دارای اختلاف بوده و تاکنون همسویی مناسبی نداشته است. بنابراین ضرورت بررسی جامع در این زمینه مورد نظر قرار گرفته است. لذا در این پژوهش با انجام آزمایش سه‌محوری تناوبی به بررسی اثر CSR و مقدار ریزدانه غیرپلاستیک بر پتانسیل روانگرایی پرداخته شده است. در این راستا محدوده کاملی از خاک ماسه خالص تا لای خالص مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق، با تکرار تعدادی تست با شرایط کلی مشابه و گام‌های اعمال، فشار سلول (CP)^۲ و فشار درون نمونه (BBP)^۳ متفاوت، تصمیم بر بررسی اثر گام‌های اعمال فشار در مرحله اشباع‌سازی (B_{value}) خاک ماسه‌ای تا لای، بر پتانسیل روانگرایی و کرنش‌های حاصل از آن می‌باشد که تا پیش از این مورد بررسی قرار نگرفته بود.

لازم به توضیح است که جهت مختصرسازی عناوین، از این پس در این مقاله، فشار سلول^۴ و فشار داخل نمونه^۵ به اختصار به ترتیب CP و BBP بیان می‌شود.

۲- روش انجام آزمایش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و لای غیر پلاستیک استفاده شده است که مشخصات آن به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) و همچنین شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه.

شماره	مشخصات	نماد	مقدار
۱	نوع خاک	SP	-
۲	چگالی دانه‌ها	Gs	۲/۶۱
۳	وزن مخصوص خشک ماکزیمم	γ_{max}	۱۶/۵ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۴	وزن مخصوص خشک مینیمم	γ_{min}	۱۳/۷ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)



شکل (۲): شمای کلی دستگاه آزمایش سه‌محوری تناوبی و نمونه آزمایش.

دانشیته بیان شده در جدول (۳) دانشیته پس از تحکیم بوده و تقریبی می‌باشد.

- ۷۰ درصد ماسه به‌علاوه ۳۰ درصد لای: S7M3
- ۴۰ درصد ماسه به‌علاوه ۶۰ درصد لای: M6S4
- ۱۰۰ درصد لای خالص: M

جدول (۳): برنامه آزمایش.

فرکانس	Dr (درصد)	CSR			فشار همه‌جانبه (فشار تحکیمی)	نوع خاک
		۰/۱	۰/۱۵	۰/۲		
۰/۱	۳۲	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۱۰۰	ماسه تمیز: S
۰/۱	۳۲	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۱۰۰	۷۰ درصد ماسه با ۳۰ درصد لای: M7S3
۰/۱	۳۲	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۱۰۰	۴۰ درصد ماسه با ۶۰ درصد لای: M6S4
۰/۱	۳۲	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۱۰۰	لای غیرپلاستیک: M

ضمناً هر کدام از سه تست زیر جهت بررسی تأثیر فشار بر اسکلت خاک در مرحله اشباع‌سازی بر روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های حاصله از آن، سه بار با گام‌های متفاوت و CP و BBP متفاوت جهت رسیدن به نسبت اشباع ۹۵ درصد تکرار شده‌اند. ۱- ماسه با $CSR = 0.2$ ؛ ۲- ماسه با ۳۰ درصد لای $CSR = 0.2$ و ۳- لای خالص $CSR = 0.2$

تکرار آزمایش‌های فوق به این صورت است که در تست اول گام‌های اعمال CP و BBP جهت رسیدن به نسبت اشباع ۹۵ درصد را ۳۰ کیلوپاسکال و با فاصله زمانی هر گام ۱۵ دقیقه و در تکرار دوم ۴۵ کیلوپاسکال، با فاصله زمانی هر گام ۱۰ دقیقه و در تکرار سوم ۶۰ کیلوپاسکال، با فاصله زمانی هر گام ۵ دقیقه انجام شده‌اند. در نتیجه در CP و BBP های متفاوت به شرح جدول (۴) به نسبت اشباع ۹۵ درصد رسیده‌اند. در ادامه به بررسی تأثیر این موضوع بر اسکلت خاک و تأثیر آن بر نتایج روانگرایی پرداخته می‌شود.

در ادامه این پژوهش چهار نوع خاک فوق با نام اختصاری مذکور و (B_{value}) با عبارت نسبت اشباع بیان می‌شود. نمونه‌ها با ابعادی به قطر ۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و با استفاده از روش تراکم مرطوب با دانشیته ۳۰ درصد ($Dr = 30$) تهیه شده است. در این مرحله بعد از بستن و آماده‌سازی سلول و پر نمودن اطراف نمونه با آب، فشار همه‌جانبه حدود ۱۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده است. در گام بعدی با عبور گاز مونواکسید کربن از نمونه قابلیت اشباع‌پذیری نمونه را افزایش و در ادامه آب مقطر و کیوم شده از نمونه عبور داده شده است. در مرحله بعد جهت اشباع‌سازی کامل نمونه و دستیابی به درصد اشباع بالای ۹۵٪، جهت روانگرایی نمونه، اقدام به افزایش فشار سلول (فشار همه‌جانبه) و همچنین فشار داخل نمونه شده است. این روند در گام‌های مختلف تکرار شده تا نمونه به نسبت اشباع ۹۵٪ برسد. در گام بعد با توجه به فشار همه‌جانبه مورد نظر که ۱۰۰ کیلوپاسکال است اقدام به تحکیم نمونه شده است و جهت یکنواخت بودن فشار تحکیم در تمامی قسمت‌های نمونه، تحکیم ایزوتروپیک انجام شده است. گام بعدی مرحله بارگذاری می‌باشد. در این مرحله جهت اجرای تست سه‌محوری تناوبی و روانگرا شدن نمونه، شیر زهکشی نمونه بسته شده است تا هنگام بارگذاری، آب از نمونه خارج نشده و فشار آب حفره‌ای مستهلک نشود. لازم به ذکر است بارگذاری از نوع کنترل تنش^۵ و به صورت تناوبی و تحت سه $CSR = 0.2$ ، 0.15 و 0.1 می‌باشد. در این مطالعه برنامه آزمایش‌ها بر اساس جدول (۳) تنظیم شده است.

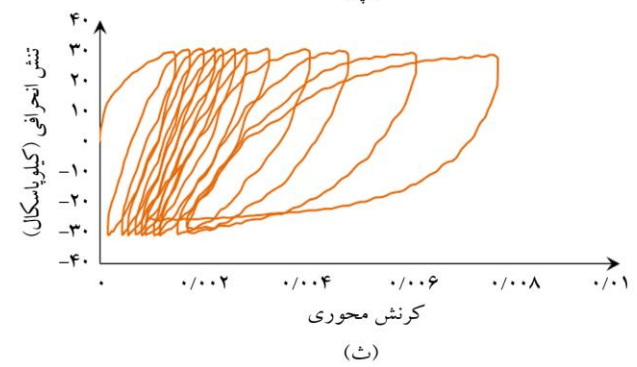
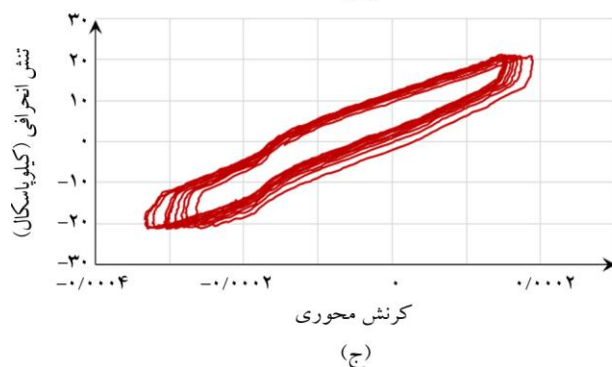
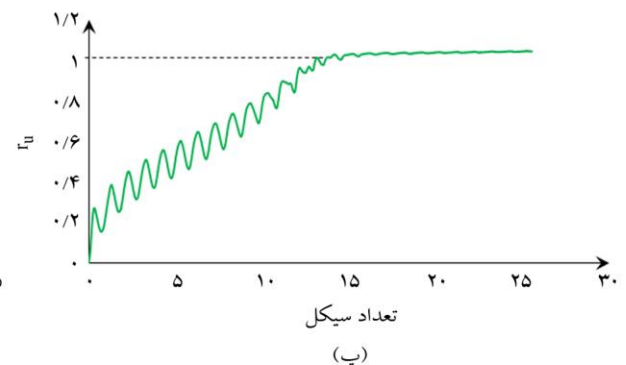
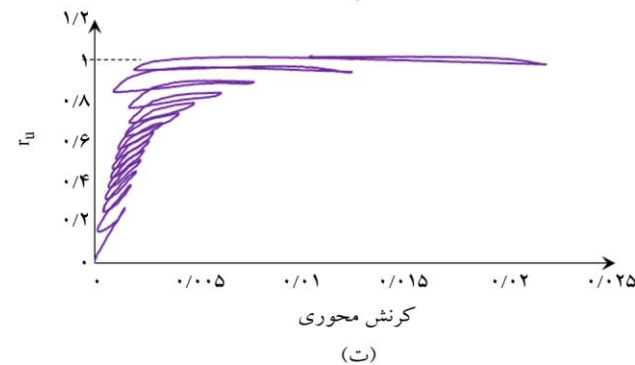
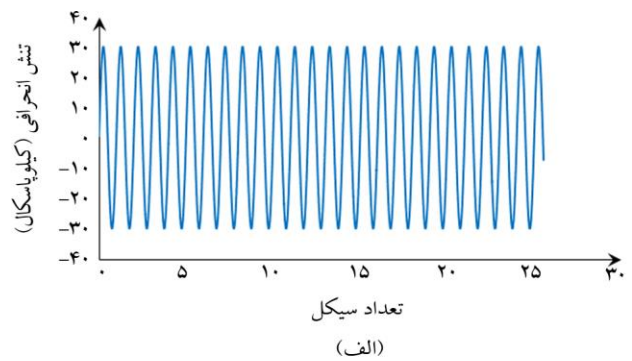
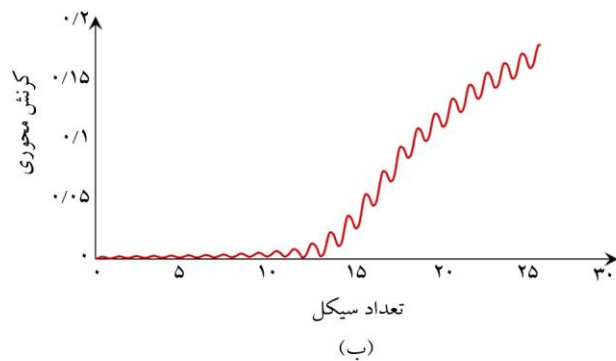
۳- تفسیر نتایج

تناوبی CU بر روی نمونه لای خالص در فشار همه‌جانبه

در شکل (۳) نتایج حاصل از انجام آزمایش سه‌محوری ۱۰۰ کیلوپاسکال و دانسیته ۳۰ درصد ارائه شده است.

جدول (۴): گام‌های افزایش فشار جهت اشباع‌سازی نمونه.

۶۰ کیلوپاسکال		۴۵ کیلوپاسکال		۳۰ کیلوپاسکال		گام‌های افزایش فشار جهت اشباع شدن
BBP	CP	BBP	CP	BBP	CP	
۳۵	۴۵	۳۵	۴۵	۳۵	۴۵	گام اول
۹۵	۱۰۵	۸۰	۹۰	۶۵	۷۵	گام دوم
۱۵۵	۱۶۵	۱۲۵	۱۳۵	۹۵	۱۰۵	گام سوم
۲۱۵	۲۲۵	۱۷۰	۱۸۰	۱۲۵	۱۳۵	گام چهارم
۲۷۵	۲۸۵	۲۱۵	۲۲۵	۱۵۵	۱۶۵	گام پنجم
۳۳۵	۳۴۵	۲۶۰	۲۷۰	۱۸۵	۱۹۵	گام ششم
۳۹۵	۴۰۵	۳۰۵	۳۱۵	۲۱۵	۲۲۵	گام آخر $B_{value} = 0.95$



شکل (۳): تست سه‌محوری تناوبی در لای تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال و $Dr = 30\%$: (الف) تنش انحرافی بر حسب تعداد سیکل تحت $CSR = 0.15$ ، (ب) کرنش محوری بر حسب تعداد سیکل تحت $CSR = 0.15$ ، (پ) r_u بر حسب تعداد سیکل تحت $CSR = 0.15$ ، (ت) r_u بر حسب کرنش محوری تحت $CSR = 0.15$ ، (ث) تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری تحت $CSR = 0.15$ و (ج) تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری تحت $CSR = 0.1$.

شکل (۴) نشان دهنده‌ی نمودار CSR بر حسب تعداد سیکل‌های مورد نیاز روانگرایی برای بازه‌ی کاملی از خاک‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشخص است در $CSR = 0/2$ ، S بعد ۴ سیکل، $S7M3$ بعد ۲ سیکل، $M6S4$ بعد ۴ سیکل و M بعد ۳ سیکل روانگرا شده است. در $CSR = 0/15$ ، $M6S4$ و M به ترتیب در ۱۲ و ۱۳ سیکل روانگرا شده‌اند، بنابراین اولاً با افزایش لای به ماسه خالص (S) پتانسیل روانگرایی تا مرز ۳۰ درصد افزایش یافته و سپس پتانسیل کاهش می‌یابد، همچنین نتایج نشان داده است که $M6S4$ و M تقریباً دارای پتانسیل روانگرایی یکسانی می‌باشند. این در حالی است که در $CSR = 0/2$ مقاومت روانگرایی M کمتر از $M6S4$ می‌باشد ولی در $CSR = 0/15$ این امر معکوس بوده و مقاومت روانگرایی M بیشتر از $M6S4$ می‌باشد.

در جدول (۵) معادله برازش داده شده برای هر یک از منحنی‌های روانگرایی ارائه شده در شکل (۵) مربوط به انواع خاک‌های مختلف ارائه شده است. با استفاده از این معادلات ارائه شده با تقریب مناسبی می‌توان در محدوده CSR های مورد بررسی در این پژوهش، به تعداد سیکل مورد نیاز روانگرایی دست یافت.

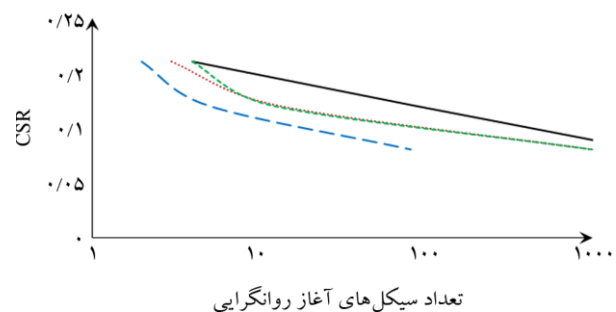
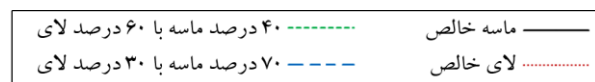
جدول (۵): معادله برازش داده شده منحنی روانگرایی محدوده کاملی از خاک‌ها.

نوع خاک	معادله منحنی روانگرایی	ضریب همبستگی
ماسه خالص	$y = 0.2377x^{-0.112}$	$R^2 = 0.9922$
ماسه با ۳۰ درصد لای	$y = 0.2142x^{-0.177}$	$R^2 = 0.9655$
ماسه با ۶۰ درصد لای	$y = 0.2187x^{-0.116}$	$R^2 = 0.9677$
لای خالص	$y = 0.2151x^{-0.113}$	$R^2 = 0.9677$

مقادیر همبستگی قابل قبول معادلات فوق که به صورت توانی ارائه شده‌اند، بیانگر دقت بالای برازش‌های فوق می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از این معادلات که مربوط به منحنی روانگرایی هر یک از خاک‌های مذکور می‌باشد، می‌توان برای محدوده CSR های مورد بررسی در این پژوهش، تخمین مناسبی از تعداد سیکل‌های لازم جهت رخداد روانگرایی ($r_{ii} = 1$) ارائه شود.

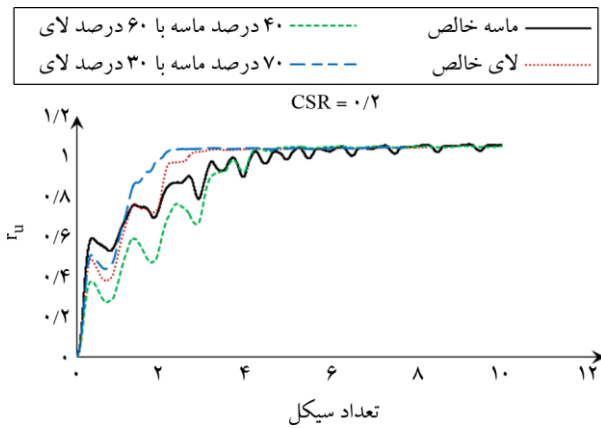
شکل (۳-الف) تنش انحرافی بر حسب بار تناوبی را نشان می‌دهد که معادل تنش انحرافی برابر با $CSR = 0/15$ می‌باشد. شکل (۳-ب) کرنش محوری بر حسب سیکل می‌باشد و همان‌طور که از شکل نمایان است سیکل ۱۱۳ نقطه شروع افزایش تغییر شکل‌ها یا به عبارتی زمان آغاز روانگرایی می‌باشد. به همین ترتیب شکل (۳-پ) نشان دهنده‌ی تغییرات r_{ii} بر حسب سیکل می‌باشد. همان‌طور که مشخص است در سیکل ۱۱۳ r_{ii} به مقدار یک رسیده است که نشانگر آغاز روانگرایی خاک مورد نظر است. تغییرات r_{ii} بر حسب کرنش محوری نیز در شکل (۳-ت) نشان داده شده است که با رسیدن r_{ii} به یک (۱)، کرنش محوری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. شکل (۳-ث) نیز بیانگر همان لوپ هیستریزس تنش کرنش می‌باشد که با آغاز روانگرایی کرنش‌ها افزایش یافته و لوپ خوابیده‌تر شده است. در نتیجه می‌توان گفت که مقدار سختی خاک کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج این آزمایش با مشاهدات ارائه شده توسط آکیلا و همکاران [۱۲] همخوانی قابل قبولی داشته است.

نتایج تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری حاصل از آزمایش بر روی نمونه لای خالص تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال با دانسیته نسبی ۳۰ درصد و $CSR = 0/1$ در شکل (۳-ج) نشان داده شده است. در واقع این نمودار بیانگر همان لوپ هیستریزس بوده و به دلیل اینکه نمونه تحت CSR پایین قرار داشته است در تعداد سیکل‌های محدود شرایط خوابیده شدن لوپ‌ها و آغاز روانگرایی رخ نداده است. در شکل (۴) نمودار تغییرات CSR بر حسب سیکل‌های آغاز روانگرایی نشان داده شده است.

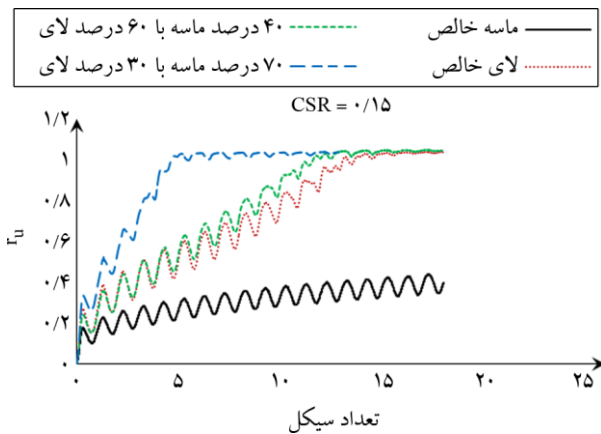


شکل (۴): تغییرات CSR بر حسب سیکل‌های آغاز روانگرایی.

از طرفی دیگر در هر دو شکل و هر دو CSR، سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای مربوط به S7M3 می‌باشد. این در حالی است که رفتار ۳ تیپ خاک دیگر در اثر تغییر CSR متفاوت بوده است. در $CSR = 0.2$ پس از S7M3، M، S و M6S4 به ترتیب سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای را تجربه کردند این در حالی است که در $CSR = 0.15$ بعد از S7M3، M6S4، M و S به ترتیب سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای را داشتند که این امر نشان‌دهنده تأثیر CSR بر مقاومت روانگرایی خاک‌ها می‌باشد.



شکل (۸): تأثیر میزان ریزدانه بر r_u در $CSR = 0.2$.

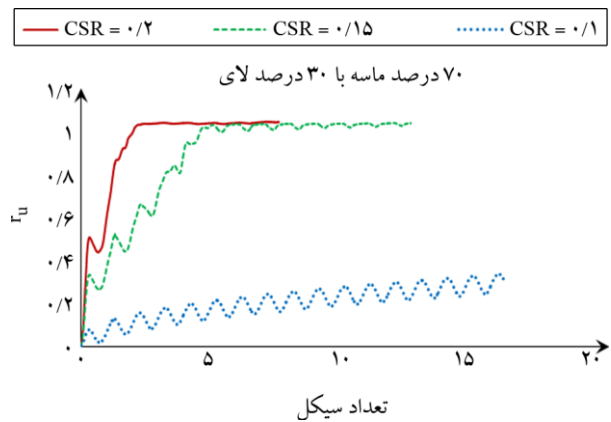


شکل (۹): تأثیر میزان ریزدانه بر r_u در $CSR = 0.15$.

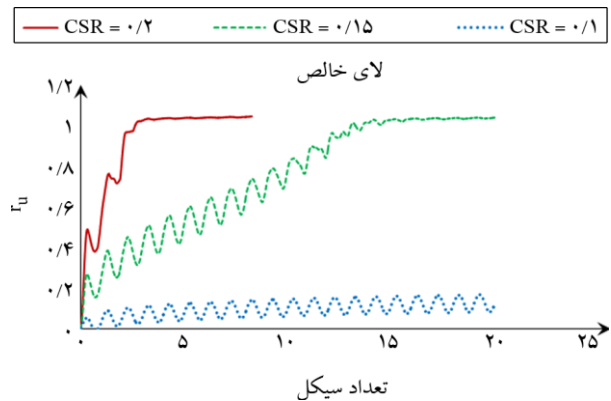
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تأثیر CSR بر تغییرات r_u بر حسب کرنش محوری نمایش داده شده است. مقایسه دو شکل (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش لای از S7M3 تا M در CSRهای مختلف جهت رسیدن نمونه به $r_u = 1$ نمونه دارای لای بیشتر،

در شکل (۵) تأثیر میزان ریزدانه بر تغییرات کرنش محوری نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است نمونه S7M3 و M کرنش محوری بیشتری را نسبت به S و M6S4 نشان می‌دهند. همچنین روند رو به رشد کرنش محوری در شکل (۵) مشابه افزایش r_u در شکل (۴) می‌باشد که در $CSR = 0.2$ به ترتیب در S7M3، M، M6S4، S رخ می‌دهد. در شکل‌های (۶) و (۷) نیز تأثیر CSR بر روی r_u نشان داده شده است. مقایسه دو شکل (۶) و (۷) نشان می‌دهد که با افزایش لای از S7M3 تا M اختلاف بین نمودارهای r_u در CSRهای مختلف افزایش یافته است.

تأثیر مقادیر ریزدانه بر روی r_u در شکل‌های (۸) و (۹) مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه این دو شکل تأثیر مشهود CSR بر رفتار روانگرایی خاک‌ها را نشان داده است. از این رو مشخص است که در $CSR = 0.2$ نمودارهای r_u بر حسب سیکل برای چهار نوع خاک به یکدیگر نزدیک می‌باشد. این در حالی است که در $CSR = 0.15$ نمودارها از یکدیگر فاصله می‌گیرند.

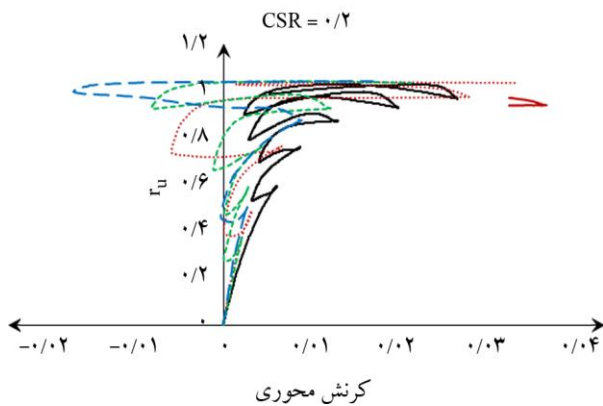


شکل (۶): تأثیر CSR بر r_u در خاک S7M3.



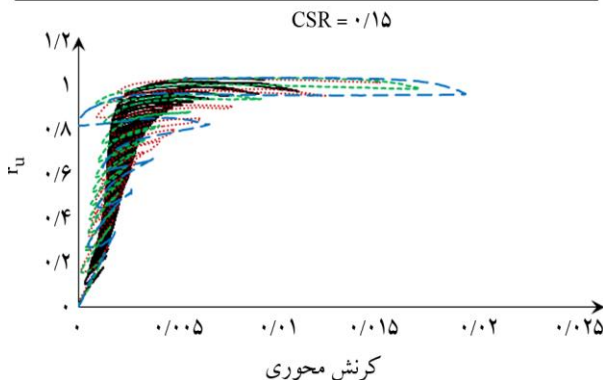
شکل (۷): تأثیر CSR بر r_u در خاک M.

ماسه خالص ——— ماسه با ۴۰ درصد لای
 لای خالص لای با ۳۰ درصد ماسه

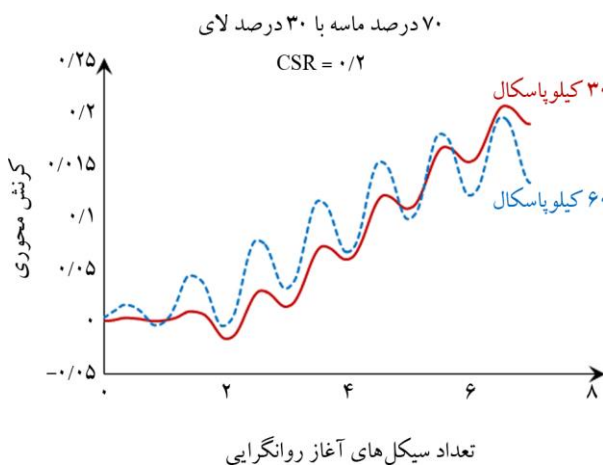


شکل (۱۲): تأثیر میزان ریزدانه در $CSR = 0.2$ بر تغییرات τ_u بر حسب کرنش محوری.

ماسه خالص ——— ماسه با ۴۰ درصد لای
 لای خالص لای با ۳۰ درصد ماسه

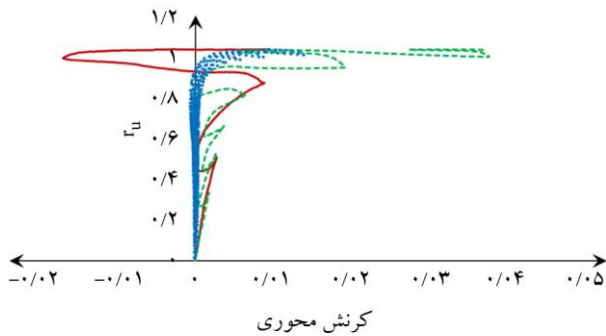


شکل (۱۳): تأثیر میزان ریزدانه در $CSR = 0.15$ بر تغییرات τ_u بر حسب کرنش محوری.



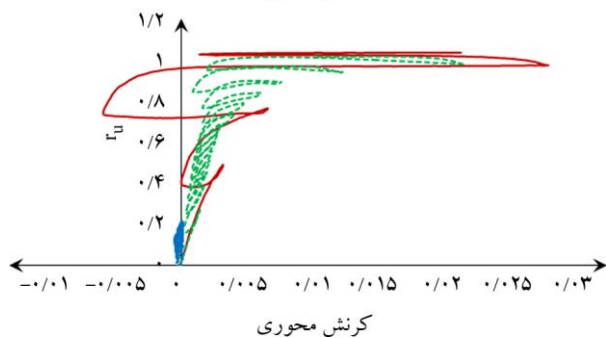
شکل (۱۴): تأثیر گام‌های اعمال فشار مرحله اشباع‌سازی بر کرنش محوری در خاک S7M3.

$CSR = 0.2$ ——— $CSR = 0.15$ $CSR = 0.1$



شکل (۱۰): تأثیر CSR بر تغییرات τ_u بر حسب کرنش محوری در S7M3.

$CSR = 0.2$ ——— $CSR = 0.15$ $CSR = 0.1$



شکل (۱۱): تأثیر CSR بر تغییرات τ_u بر حسب کرنش محوری در M.

کرنش کمتری را تجربه می‌کنند و همچنین در لای خالص در $CSR = 0.1$ با اعمال تعداد سیکل‌های زیاد بر نمونه تغییرات ناچیزی در کرنش و افزایش در فشار آب حفره‌ای رخ داده است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تأثیر میزان ریزدانه بر تغییرات τ_u بر حسب کرنش محوری نشان داده شده است. مقایسه دو شکل (۱۲) و (۱۳) بیانگر آن است که نمونه‌ها در $CSR = 0.2$ کرنش بیشتری را نسبت به $CSR = 0.15$ در مسیر رسیدن به $\tau_u = 1$ تجربه می‌کنند و همچنین مسیر کرنش طی شده چهار نوع خاک جهت رسیدن به $\tau_u = 1$ در $CSR = 0.15$ یکنواخت‌تر از $CSR = 0.2$ است.

۳-۱- بررسی مرحله اشباع‌سازی B_{value} در تست سه‌محوری تناوبی

در شکل (۱۴) نمودار کرنش محوری بر حسب سیکل برای دو نمونه S7M3 تحت $CSR = 0.2$ و شرایط کلی مشابه و با

۳۰ درصد سبب تغییر رفتار خاک شده و خاک رفتار ریزدانه به خود گرفته و پتانسیل روانگرایی کاهش می‌یابد. در مقایسه با پیشینه ارائه شده، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج ارائه شده توسط کوستر [۸] که مرز تغییر رفتار را به میزان ۲۰ درصد لای و همچنین پولیتو و مارتین [۹] که این مرز را ۳۵ درصد لای بیان نموده‌اند همخوانی دارد. لازم به ذکر است که در مجموعه آزمایش‌ها، وضعیت بین ۳۰ تا ۶۰ درصد لای در نظر گرفته نشده است.

در پژوهش‌های پیشین ماهشوری و پاتل [۱۱] بیان نمودند که میزان لای بحرانی جهت تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای بسته به میزان CSR متفاوت است و همچنین آکیلا و همکاران [۱۲] با بررسی خاک ماسه لای‌دار تا ۴۰ درصد لای به این نتیجه رسیدند که با افزایش محتوای ریزدانه نرخ تولید اضافه فشار آب حفره‌ای و کرنش محوری تحت بار تناوبی افزایش یافته است، در مقایسه با نتایج این پژوهش و با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) اولاً تأثیر CSR بر رفتار تولید فشار آب حفره‌ای مشهود بوده و همچنین با توجه به شکل (۹) مشخص است که از S تا S7M3 با افزایش محتوای ریزدانه نرخ تولید فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و با افزایش بیشتر محتوای ریزدانه فراتر از ۳۰ درصد، کاهش نسبی مشاهده می‌شود.

و همچنین از مشاهده شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمایان است که مسیر کرنشی طی شده توسط چهار نوع خاک جهت رسیدن به $I_{II} = 1$ تقریباً یکسان می‌باشد و همچنین در نمونه S تا S7M3 با افزایش محتوای ریزدانه نرخ تولید فشار آب حفره‌ای بر حسب کرنش محوری اندکی افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر محتوای ریزدانه نرخ تولید فشار آب حفره‌ای بر حسب کرنش محوری اندکی کاهش یافته است.

در پژوهش‌های دیگری که توسط چوبستی و همکاران [۱۳]، قربانی و همکاران [۱۴] و سوامی و همکاران [۱۵] انجام شده است به گونه‌ای نتایج حاصله با نتایج این پژوهش همخوانی داشته و بیانگر آن می‌باشند که با افزایش ریزدانه تا یک مرز مشخص، مقاومت روانگرایی نمونه‌ها کاهش یافته است ولی مرز تغییر

این تفاوت که یک‌بار گام‌های افزایش فشار، CP و BBP، ۳۰ و بار دوم ۶۰، جهت دستیابی به اشباع‌سازی نمونه بالای ۹۵ درصد ($B_{value} = 0.95$) ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است نمونه‌ای که تحت گام‌های فشار ۶۰ کیلوپاسکال و حدود فشار نهایی $CP = 405$ و $BBP = 395$ اشباع شده است، به نظر می‌رسد به علت فشار بالاتر در مرحله اشباع‌سازی، فشار بر اسکلت خاک بیشتر بوده که این امر سبب برهم خوردن ساختار و چیدمان اسکلت S7M3 شده است؛ به طوری که در ابتدای بارگذاری کرنش بیشتری را نسبت به نمونه‌ای که در مرحله اشباع‌سازی تحت گام‌های فشار ۳۰ کیلوپاسکال و $CP = 225$ و $BBP = 215$ اشباع شده، تجربه کرده است. تأثیر این موضوع بر روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های حاصل از آن در نمونه‌های ماسه مشهود است ولی این در حالی است که در لای خالص تأثیر آن ناچیز بوده است.

۴- بحث و بررسی

همان‌طور که در پیشینه تحقیق بیان شد برخی محققین معتقد بودند که میزان لای تأثیری بر پتانسیل روانگرایی ندارد و برخی دیگر معتقد بودند که با افزایش میزان لای کاهش مقاومت روانگرایی رخ می‌دهد و همچنین بیشتر پژوهش‌ها به این نتیجه دست یافتند که افزایش میزان لای تا یک مرز و حدی سبب افزایش پتانسیل روانگرایی (کاهش مقاومت روانگرایی) و بعد از آن سبب کاهش پتانسیل روانگرایی می‌شود که نتایج حاصل از این پژوهش هم این امر را نشان داده است.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش مرز تغییر رفتار به میزان ۳۰ درصد لای بوده است، زیرا هر چه از ماسه خالص به سمت ماسه با ۳۰ درصد لای پیش رفته شود به دلیل قرارگیری ذرات ریز لای در بین ذرات درشت‌دانه‌تر ماسه سبب پر شدن فضای خالی بین ماسه‌ها شده و این امر موجب می‌شود توان زهکشی خاک در هنگام ارتعاشات ناشی از زلزله یا بارگذاری تناوبی کاهش یابد؛ بنابراین پتانسیل روانگرایی در این شرایط افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر لای فراتر از

می‌کنند. از سویی دیگر چهار نمونه حاوی مقادیر مختلف لای رفتار کرنشی متفاوتی را در مقادیر مختلف CSR نشان داده‌اند. به این صورت که مسیر کرنش طی شده چهار نوع خاک جهت رسیدن به $\tau_{II} = 1$ در $CSR = 0.15$ یکنواخت‌تر از $CSR = 0.2$ است.

با توجه به نتایج حاصل از تست‌های صورت پذیرفته تحت شرایط متفاوتی از گام‌های اعمال فشار CP و BBP جهت اشباع‌سازی نمونه یا به عبارتی دستیابی به نسبت اشباع ۹۵ درصد، نتایج بیانگر آن بوده که تأثیر تغییر گام‌های فشار بر روی نتایج لای خالص ناچیز بوده و این در حالی است که تأثیر تغییر گام‌های فشار در نتایج ماسه لای‌دار و تا حد کمتری بر روی ماسه مشهود به نظر می‌رسد

مراجع

1. Polito, C.P. (1999) *The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soil*. Ph.D. Thesis, University Libraries, Virginia Polytechnic Institute and State University.
2. Ghahremani, M., Ghalandarzadeh, A., and Moradi, M. (2006) Effect of plastic fines on cyclic resistance of saturated sands. *J. Seismology and Earthquake Eng.*, **8**(2), 71-80 (in Persian).
3. Miura, S., Kawamura, S., and Yagi, K. (1995) Liquefaction damage of sandy and volcanic grounds in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake. *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engr. and Soil Dynamics*. St. Louis, Missouri, **1**, 193-196.
4. Ishihara, K. (1993) Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, **43**(3), 351-415.
5. Tronco, J.H. and Verdugo, R. (1985) Silt content and dynamic behavior of tailing sands. *Proceedings, Twelfth International Conference on Soil Mech. and Found. Eng.* San Francisco, USA, 1311-1314.
6. Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1997) Effect of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, 918-928.
7. Chang, N.Y., Yeh, S.T., and Kaufman, L.P. (1982) Liquefaction potential of clean and silty sands.

رفتار نمونه‌ها متفاوت می‌باشد و همچنین تغییرات منحنی τ_{II} بر حسب سیکل در پژوهش ارائه شده توسط سوامی و همکاران [۱۵] که فقط تا ۴۰ درصد ریزدانه را مورد بررسی قرار دادند با رفتار نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش (شکل ۸) تا مرز ۳۰ درصد ریزدانه همخوانی دارد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از ماسه ۱۶۱ و لای غیر پلاستیک فیروزکوه به بررسی تأثیر توأمان نسبت تنش سیکلی (CSR) و درصد ریزدانه غیر خمیری در فشار همه‌جانبه ثابت بر روی روانگرایی ماسه لای‌دار و لای با استفاده از آزمایش سه‌محوری تناوبی پرداخته شده است.

با بررسی بر روی چهار نوع خاک شامل ماسه، ماسه با ۳۰ درصد لای، ماسه با ۶۰ درصد لای و لای خالص مشاهده شده که با افزایش لای در ماسه ابتدا با افزایش لای به میزان ۳۰ درصد، کاهش مقاومت روانگرایی و سپس افزایش مقاومت روانگرایی تا خاک ماسه با ۶۰ درصد لای مشاهده شده است. سپس با افزایش بیشتر لای تا رسیدن به لای خالص تقریباً رفتار یکنواختی به دست آمده است، زیرا هر چه از ماسه خالص به سمت ماسه با ۳۰ درصد لای پیشروی شود به دلیل قرارگیری ذرات ریز لای در بین ذرات درشت‌دانه تر ماسه سبب پر شدن فضای خالی بین ماسه‌ها شده و این امر موجب می‌شود توان زهکشی خاک در هنگام ارتعاشات ناشی از زلزله یا بارگذاری تناوبی کاهش یابد؛ بنابراین پتانسیل روانگرایی در این شرایط افزایش می‌یابد ولی همچنان تا مرز ۳۰ درصد ریزدانه رفتار مشابه ماسه حاکم است و سپس با افزایش بیشتر لای فراتر از ۳۰ درصد سبب تغییر رفتار خاک می‌گردد و خاک رفتار ریزدانه به خود گرفته که سبب کاهش پتانسیل روانگرایی می‌گردد.

از سویی دیگر تأثیر CSR بر رفتار روانگرایی تمامی نمونه‌های خاک در این پژوهش مشهود بوده است؛ به طوری که با تغییرات نسبت تنش تناوبی میزان درصد ریزدانه‌هایی که به ترتیب بیشترین فشار آب حفره‌ای را ایجاد می‌کنند، تغییر

Bottom Back Pressure (BBP)
Wet Tamping
Force Control

۳- فشار داخل نمونه
۴- تراکم مرطوب
۵- کنترل تنش

Proc. of the Third International Earthquake Microzonation Conference. Seattle, USA, **2**, 1017-1032.

8. Koester, J.P. (1994) The influence of fine type and content on cyclic strength. *Ground Failures under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication, ASCE*, **44**, 17-33.
9. Polito, C.P. and Martin, J.R. (2001) The effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engr.*, 408-15.
10. Amini, F. and Qi, G.Z. (2000) Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engr.*, March, 208-17.
11. Maheshwari, B.K. and Patel, A.K. (2010) Effects of non-plastic silts on liquefaction potential of solani sand. *Geotech Geol Eng.*, **28**, 559-566, DOI 10.1007/s10706-010-9310-z.
12. Akhila, M., Rangaswamy, K., and Sankar, N. (2019) Effect of non-plastic fines on undrained response of fine sand. *International Journal of GEOMATE*, **16**(54), 170-175.
13. Choobbasti, A.J., Selataneh, H., and petanlar, M.K. (2020) Effect of fines on liquefaction resistance of sand. *Innovatlve Infrastructure Solutions*, **5**(87), <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00338-3>.
14. Ghorbani, A., Eslami, A., and Moghadam, M.N. (2020) Effect of non-plastic silt on liquefaction susceptibility of marine sand by transparent laminar shear box in shaking table. *International Journal of Geotechnical Eng.*, **14**(5), 514-526, <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1712532>.
15. Swamy, K.R., Akhila, M., and Sankar, N. (2020) Effects of fines content and plasticity on liquefaction resistance of sands. *Proc. Institution of Civil Engineers - Geotechnical Eng.*, doi: 10.1680/jgeen.19.00270.
16. ASTM D5311 (2013) Standard Test Method for Load Controolled Cyclic Triaxial Strength of Soil.

واژه‌نامه

Cyclic Stress Ratio ۱- نسبت تنش سیکلی
Cell Pressure (CP) ۲- فشار سلول

Laboratory Study of the Effects of Cyclic Stress Ratio and Non-Plastic Fine Content on the Liquefaction Potential of Non-Cohesive Soil

Sina Safargholitabar Marzuni¹, Meysam Fadaee^{2*}, Amin Bahmanpour³, and Mehdi Derakhshandi⁴

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: fadaee@srbiau.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Liquefaction is the primary cause of most earthquake-induced damages in saturated loose and medium-dense deposits. The literature on liquefaction potential has mainly focused on clean sand, and it has been assumed that liquefaction can take place only in sand, and fine- or coarse-grained soils cannot generate water-pore overpressure. However, after the occurrence of multiple earthquakes, it was found that non-plastic fine soils also have a significant liquefaction potential in addition to sands. A review of earlier literature showed no study on the effect of the cyclic stress ratio (CSR) on the critical silt content in the study of the liquefaction potential of sand with a fines content of equal to greater than 40% to 100% pure silt content. In other words, the mutual effects of CSR and non-plastic fine aggregates on liquefaction potential of sands with high fine aggregate content, especially pure silt, has not been studied up to this moment. Moreover, discrepancies exist between the results reported on the liquefaction potential of sand and silty sand containing 40% fines. This study investigates the effects of CSR and non-plastic fines on the liquefaction potential of silt and silty sand at a constant confining pressure through undrained cyclic triaxial tests. The test was repeated under the same conditions and steps at different cell pressures (CP) and bottom back pressures (BBP) to investigate the effects of pressure application steps in the saturation phase (Bvalue) of different soil types, from sand to slit, on the liquefaction potential and resulting strains, which had not been investigated before.

The cyclic triaxial test was performed on non-plastic slit and Firuzkuh sand 161 according to ASTM D5311. The specimens with a diameter of 5 cm, a height of 10 cm, and a density (D_r) of 30% were prepared by wet tamping

According to the results, the liquefaction resistance of sand decreased as the silt content increased up to 30% and then increased when the silt content increased to 60%. A relatively uniform behavior was observed when the slit content increased to 100% (pure slit); because, when the slit content of clean sand is increased to 30%, the fine slit particles fill the empty space between the coarse-grained sand particles, leading to a decrease in the soil drainage capacity during earthquake-induced vibrations or cyclic loading. Therefore, the liquefaction potential increased under these conditions; but the sand behavior was dominant until the particle content was increased to 30%. The soil behavior changed when the slit content exceeded 30%, and the fine-grained soil behavior was observed, declining the liquefaction potential. On the other hand, the CSR affected the liquefaction behavior of all soil specimens so that the fines content generating the maximum pore-water pressure (PWP) varied by increasing the CSR. The liquefaction curves were presented for different soil types. Four specimens with different silt contents showed different strain behaviors at different CSRs so that the strain path taken by the four soil types to reach $r_u = 1$ is more uniform at $CSR = 0.15$ than $CSR = 0.2$. The effect of pressure applied to the soil structure in the saturation phase (Bvalue) on the liquefaction results and respective strains was insignificant for pure slit; but more tangible in silty sand and sand.

Keywords: Cyclic Triaxial Testing, Liquefaction Potential, Silty Sand, Cyclic Stress Ratio, Non-Plastic Fines Content.