

# بررسی آثار تنش سیکلی و میزان ریزدانه غیر پلاستیک بحرانی بر پتانسیل روانگرایی ماسه سیلتی در آزمایش سه محوری سیکلی

نبی اله احمدی\*<sup>۱</sup>، سینا صفرقلی تبار مرزونی<sup>۲</sup>

- ۱- عضو هیات علمی دانشکده عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  
۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،

[Nabiahmadi.501@gmail.com](mailto:Nabiahmadi.501@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۰۵

## چکیده

علت بسیاری از خرابی‌های ناشی از زلزله در نهشته‌های سست تا نیمه متراکم اشباع، روانگرایی است. بیشتر پژوهش‌ها در زمینه بررسی پتانسیل روانگرایی روی ماسه (تمیز) متمرکز بوده و پژوهش روی ماسه لای‌دار و لای محدود است. از این رو، تمامی زوایای آن به درستی شناخته نشده است، همچنین پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تاکنون اثر نسبت تنش سیکلی (Cyclic Stress Ratio) روی میزان لای بحرانی در بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه حاوی ۴۰ درصد ریزدانه و فراتر بررسی نشده است، بنابراین در این پژوهش با استفاده از آزمایش سه محوری سیکلی، تأثیر نسبت تنش سیکلی (CSR) و درصد ریزدانه غیر خمیری در فشار همه‌جانبه ثابت، بر پتانسیل روانگرایی ماسه لای‌دار بررسی شده است. همچنین در این مقاله تأثیر فشار وارد شده بر اسکلت خاک در مرحله اشباع‌سازی، بر نتایج روانگرایی بررسی شده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش ماسه ۱۶۱ و لای غیر پلاستیک فیروزکوه با ۳ ترکیب ماسه تمیز، ماسه با ۳۰ درصد لای و ماسه با ۶۰ درصد لای است. تمامی آزمایش‌ها در فشار همه‌جانبه ثابت ۱۰۰ کیلوپاسکال و دانسیته نسبی پس از تحکیم حدود ۳۲ درصد و طبق استاندارد ASTM.D-5311 انجام پذیرفته است. بر اساس نتایج حاصل شده با افزایش لای در ماسه به میزان ۳۰٪، کاهش مقاومت روانگرایی رخ داده و سپس با افزایش بیشتر لای، افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. با افزایش ریزدانه تا ۳۰ درصد، رفتار ماسه حاکم بوده و در مقدار ریزدانه‌های بیشتر از ۳۰ درصد، رفتار 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 محدود‌دهی از خاک‌های ماسه تا ماسه لای‌دار ارائه شده است. از سویی دیگر، تأثیر فشار وارد شده بر اسکلت خاک در مرحله اشباع‌سازی ( $B_{value}$ ) نمونه‌ها، روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های حاصل از آن، در ماسه با ۶۰ درصد لای، ماسه با ۳۰ درصد لای و تا حد کمتری بر روی ماسه مشهود به نظر می‌رسد.

**واژگان کلیدی:** آزمایش سه محوری تنابی، پتانسیل روانگرایی، ماسه لای دار، نسبت تنش سیکلی، ریزدانه غیر پلاستیک

## ۱- مقدمه

خرابی‌های ناشی از زلزله، پدیده‌ی روانگرایی است. آثار مخرب

ناشی از روانگرایی در سال ۱۹۶۴ هنگامی که زلزله گودفرایدی

سابقه زلزله‌های گذشته نشان داده است که علت بسیاری از

بررسی آثار تنش سیکلی و میزان ریزدانه غیر پلاستیک بحرانی بر در آلاسکا و به دنبال آن زلزله نینگاتا در ژاپن به وقوع پیوست توجه مهندسان ژئوتکنیک لرزه‌ای را به خود جلب کرد [1]. در سال‌های آغازین، بیشتر توجه پژوهشگران به بررسی این پدیده در ماسه‌های تمیز معطوف شده بود به طوری که تصور می‌شد روانگرایی تنها مختص ماسه‌ها است و خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه قابلیت تولید فشار اضافی آب حفره‌ای را ندارند. اما با گذشت زمان و وقوع زلزله‌های متعدد پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که روانگرایی در خاک‌های غیر از ماسه نیز رخ می‌دهد [1, 2]. مهم‌ترین این مشاهدات مربوط به زلزله سال ۱۹۹۳ هوکایدو نانسایی- اوکی، است. در این راستا، میورا و همکاران پدیده روانگرایی را در خاک‌های حاوی ۴۸ درصد ریزدانه گزارش نمودند [3].

ایشیهارا ۱۹۹۳ در پژوهشی بیان داشت، که پتانسیل روانگرایی تابع میزان ریزدانه غیر خمیری در نمونه ماسه نیست [4]. از طرف دیگر مطالعات تعدادی از پژوهشگران نیز بیانگر این امر است که با افزایش میزان لای در ماسه کاهش مقاومت روانگرایی رخ می‌دهد [5, 6]. از جمله آن‌ها ترونسکو و وردوگو ۱۹۸۵ به این نتیجه رسیدند که در تخلخل و دانسیته خشک ثابت خاک، با افزایش لای مقاومت روانگرایی ماسه کاهش می‌یابد [5]. یامامورو و لد ۱۹۹۷ در بررسی‌های خود با استفاده از آزمایش‌های سه محوری استاتیکی به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد لای مقاومت استاتیکی ماسه‌ها در برابر روانگرایی کاهش می‌یابد [6]. از سوی دیگر برخی از پژوهشگران هنگام بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که پتانسیل روانگرایی با افزایش لای ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [7, 8, 9, 10]. چانگ و همکاران ۱۹۸۲ در پژوهشی 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 [7]. کوستر ۱۹۹۴ 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 [8]. پولیتو و مارتین ۲۰۰۱ این مرز تغییر رفتار را تا ۳۵ درصد در نظر گرفته‌اند و به این نتیجه رسید که با افزایش لای تا ۳۵ درصد مقاومت روانگرایی کاهش و پس از آن به آرامی افزایش می‌یابد [9].

نبی اله احمدی و سینا صفرقلی تبار مرزونی ۲۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد لای از ۱۰ درصد به ۵۰ درصد، مقاومت روانگرایی ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند [10].

ماهشواری و پاتل ۲۰۱۰ 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 برای تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای را افزایش داده و همچنین برای یک سطح خاص از تحریک زلزله (CSR)، میزان تولید فشار آب حفره‌ای ماکزیمم به محتوای لای بستگی داشته است. بنابراین مقدار لای بحرانی برای تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای بسته به میزان شتاب متفاوت است [11]. آکیلا و همکاران ۲۰۱۹ نیز به بررسی خاک ماسه لای‌دار با درصد‌های مختلف ریزدانه و  $Dr=50\%$  با استفاده از آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و سیکلی پرداختند. نتایج آزمایش‌های سه محوری استاتیکی آن‌ها نشان داد که ریزدانه غیرپلاستیک تأثیر قابل توجهی در رفتار ماسه تمیز داشته و با افزایش ریزدانه تمایل به انقباض کاهش می‌یابد. همچنین نتایج سه محوری سیکلی نشان داده است که با افزایش محتوای ریزدانه نرخ تولید اضافه فشار آب حفره‌ای و کرنش محوری تحت بار سیکلی افزایش یافته و همچنین پتانسیل روانگرایی هم افزایش یافته است [12]. چوبستی و همکاران ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر ریزدانه غیر پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه بابلسر با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سیکلی زهکشی نشده در کنار یک سری تحلیل عددی پرداختند. در این پژوهش آزمایش سه محوری سیکلی در شرایط کنترل تنش با فرکانس ۱ هرتز و  $CSR=0.35$  برای فشار ۵۰ کیلو پاسکال و  $CSR=0.25$  برای فشار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است، نمونه‌ها شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد ریزدانه است، ضمناً از مدل‌سازی فین برای بررسی مقاومت روانگرایی ترکیب خاک‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داده است 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، همچنین مرز تغییر رفتار نمونه‌ها در این پژوهش، ۲۰ درصد ریزدانه است و از سوی دیگر در درصد ریزدانه‌های کم، رفتار مخلوط ماسه و لای مشابه نمونه‌های ماسه تمیز است و تا زمانی که رفتار ماسه

استفاده شده است که مشخصات آن به ترتیب در جدول ۱ و ۲ و همچنین شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Property	Notation	Value
Soil type	SP	-
Specific gravity	$G_s$	2.61
Maximum dry density	$\gamma_{max}$	17.5 kN/m <sup>3</sup>
Minimum dry density	$\gamma_{min}$	14.9 kN/m <sup>3</sup>
Maximum void ratio	$e_{max}$	0.751
Minimum void ratio	$e_{min}$	0.49

Table 1. properties of sand

جدول ۲. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی لای

Property	Notation	Value
Soil type	M	non-plastic silt
Specific gravity	$G_s$	2.51
Maximum dry density	$\gamma_{max}$	14.8 kN/m <sup>3</sup>
Minimum dry density	$\gamma_{min}$	11.58 kN/m <sup>3</sup>

Table 2. properties of silt

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش

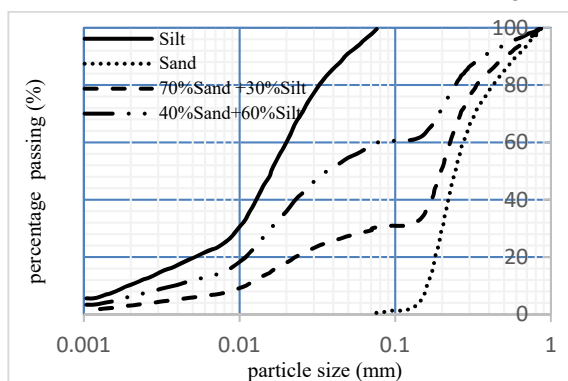


fig. 1. Soil granulation curve used in this study

غالب باشد مدل‌سازی فین با نتایج آزمایش‌ها هماهنگی خوبی دارد [13]. قربانی و همکاران ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر لای غیر پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه انزلی با استفاده از آزمایش میز لرزه پرداختند. با توجه به نتایج، برای دانسیته 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 دانسیته ۶۰ درصد، مقاومت روانگرایی با افزایش محتوای سیلت روند کاهش مداوم را نشان داده است [14]. سوامی و همکاران ۲۰۲۰ 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 [15].

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تاکنون بررسی اثر CSR روی میزان لای بحرانی، در بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه با ۴۰ درصد ریزدانه و فراتر پرداخته نشده است. به عبارتی اثر توأمان CSR و مقادیر ریزدانه غیر پلاستیک بر روانگرایی، در درصد ریزدانه‌های بالا تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و از طرفی نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین 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 توجه قرار گرفته است. پس در این پژوهش با انجام آزمایش سه محوری سیکلی به بررسی اثر CSR و مقدار ریزدانه غیر پلاستیک بر پتانسیل روانگرایی پرداخته شده است. در این راستا محدوده از خاک ماسه خالص تا ماسه با ۶۰ درصد لای استفاده شده است. همچنین در این پژوهش، با تکرار تعدادی آزمایش با شرایط کلی مشابه و گام‌های اعمال، فشار سلول (CP) و فشار درون نمونه (BBP) متفاوت، بررسی اثر گام‌های اعمال فشار در مرحله اشباع سازی ( $B_{value}$ ) خاک ماسه‌ای تا ماسه لای‌دار، بر پتانسیل روانگرایی و کرنش‌های حاصل انجام شد که تا پیش از این مورد بررسی قرار نگرفته بود.

## ۲-۲- دستگاه آزمایش

در این پژوهش برای بررسی‌های آزمایشگاهی از دستگاه سه محوری سیکلی استفاده شده است. در شکل (۲) به ترتیب شمای

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و لای غیر پلاستیک

بررسی آثار تنش سیکلی و میزان ریزدانه غیر پلاستیک بحرانی بر کلی دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی و یک نمونه که مورد آزمایش قرار گرفته است، نشان داده شده است.

نبی اله احمدی و سینا صفرقلی تبار مرزونی

۱- ماسه خالص یا تمیز: S

۲- ۷۰ درصد ماسه به علاوه ۳۰ درصد لای: S7M3

۳- ۴۰ درصد ماسه به علاوه ۶۰ درصد لای: M6S4

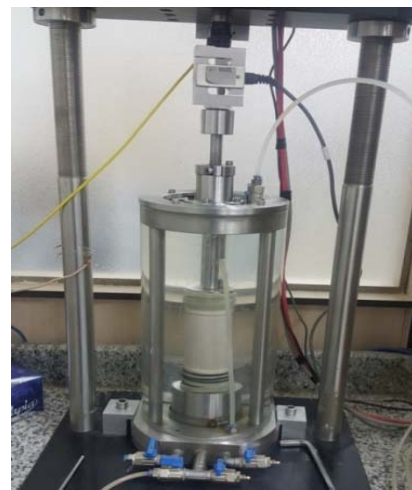
در ادامه سه نوع خاک فوق با نام اختصاری مذکور بیان خواهد شد و  $B_{value}$  با عبارت نسبت اشباع بیان می‌شود.

نمونه‌ها با ابعادی به قطر ۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و با استفاده از روش تراکم مرطوب با دانسیته 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 کیلو پاسکال به نمونه اعمال شده است. در گام بعدی با عبور گاز مونواکسید کربن از نمونه قابلیت اشباع‌پذیری نمونه را افزایش داده و در ادامه آب مقطر و کیوم شده از نمونه عبور داده شده است. در مرحله بعد برای اشباع‌سازی کامل نمونه و دستیابی به درصد اشباع بالای ۹۵ درصد، برای 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 درصد برسد. در گام بعدی با توجه به فشار همه‌جانبه مورد نظر که ۱۰۰ کیلو پاسکال است اقدام به تحکیم نمونه شده و برای یکنواخت بودن فشار تحکیم در تمامی قسمت‌های نمونه، تحکیم ایزوتروپیک انجام شده است. گام بعدی مرحله بارگذاری است. در این مرحله برای اجرای آزمایش سه محوری سیکلی CU 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 ۱ و به صورت سیکلی و تحت سه CSR، ۰٫۲، ۰٫۱۵، ۰٫۱ و ۰٫۰۱ است. در این مطالعه با توجه به مشکلات بسیار زیادی و سختی که در تهیه، اشباع‌سازی و فرآیند آزمایش سه محوری سیکلی روی نمونه‌های خاک حاوی ریزدانه است برنامه آزمایش‌ها بر اساس جدول ۳ تنظیم شد. لازم به توضیح است که برای مختصر سازی عناوین، از این پس در این مقاله، فشار سلول ۳ و فشار داخل نمونه ۴ به اختصار به ترتیب CP و BBP بیان می‌شود. ضمناً هر کدام از ۳ آزمایش زیر برای

شکل ۲. الف. شمای کلی دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی ب. نمونه آزمایش.



(الف)



(ب)

fig. 2. a. Cyclic triaxial test apparatus, b. test sample.

### ۲-۳- مراحل تهیه و آزمایش نمونه

در این پژوهش آزمایش سه محوری سیکلی بر اساس ASTM-D5311 انجام شده است [16]، همچنین از روش تراکم مرطوب (Wet Tamping) برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. سه نوع خاک مورد استفاده در این پژوهش با درصد وزنی که در ادامه به آن پرداخته می‌شود تهیه شده است.

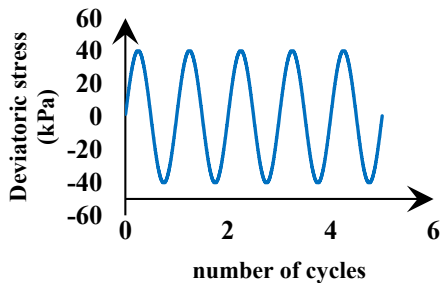
$$B_{value} = 0.95$$

**Table 4.** Pressure increment time-steps to saturation

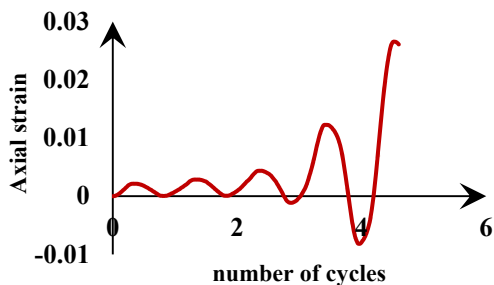
### ۳- تفسیر نتایج

در شکل (۳) نتایج حاصل از انجام آزمایش سه محوری سیکلی CU روی نمونه ماسه با ۶۰ درصد لای (M6S4) در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال و دانسیته ۳۰ درصد و CSR=0.2 ارائه شده است.

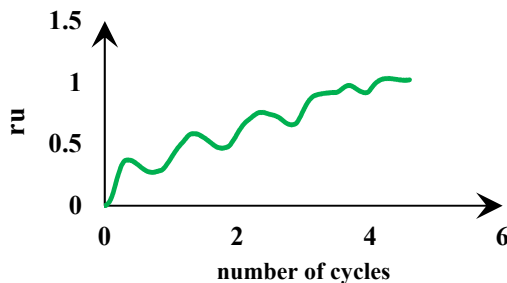
شکل ۳. آزمایش سه محوری سیکلی در ماسه با ۶۰ درصد لای تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال و  $D_r=30\%$  و CSR=0.2: (الف) تنش انحرافی بر حسب تعداد سیکل، (ب) کرنش محوری بر حسب تعداد سیکل، (پ)  $r_u$  بر حسب تعداد سیکل، (ت)  $r_u$  بر حسب کرنش محوری



الف



ب



پ

بررسی تأثیر فشار بر اسکلت خاک در مرحله اشباع سازی بر روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های به دست آمده از آن، ۳ بار با گام‌های متفاوت و CP و BBP متفاوت برای رسیدن به نسبت اشباع ۹۵ درصد تکرار شده‌اند.

۱- ماسه با CSR=0.2

۲- ماسه با ۳۰ درصد لای و CSR=0.2

۳- ماسه با ۶۰ درصد لای و CSR=0.2

تکرار آزمایش‌های فوق به این صورت است که در آزمایش اول گام‌های اعمال CP و BBP برای رسیدن به نسبت اشباع ۹۵ درصد را ۳۰ کیلو پاسکال و با فاصله زمانی هر گام ۱۵ دقیقه و در تکرار دوم ۴۵ کیلو پاسکال، با فاصله زمانی هر گام ۱۰ دقیقه و در تکرار سوم ۶۰ کیلو پاسکال، 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.

جدول ۳. برنامه آزمایش

$D_r$ (%)	CSR	Confining pressure	Soil type	
32	0.15	0.2	100	clean sand: S
32	0.15	0.2	100	70% sand with 30% silt: S7M3
32	0.15	0.2	100	40% sand with 60% silt: M6S4

**Table 3.** Test program

مقادیر دانسیته پس از تحکیم برای هر آزمایش محاسبه شده است و با توجه به آنکه مقادیر متفاوت بوده به طور میانگین ۳۲ درصد در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۴. گام‌های افزایش فشار برای اشباع سازی نمونه

Steps of pressure increase to saturation	30 kPa		45 kPa		60 kPa	
	CP	BBP	CP	BBP	CP	BBP
Step1	45	35	45	35	45	35
Step2	75	65	90	80	105	95
Step3	105	95	135	125	165	155
Step4	135	125	180	170	225	215
Step5	165	155	225	215	285	275
Step6	195	185	270	260	345	335
Last step	225	215	315	305	405	395

که مشخص است در  $CSR=0.2$ ،  $S$  بعد ۴ سیکل،  $S7M3$  بعد ۲ سیکل و  $M6S4$  بعد ۴ سیکل روانگرا شده است. در  $CSR=0.15$ ،  $S7M3$  بعد ۵ سیکل و  $M6S4$  بعد ۱۲ 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.

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.

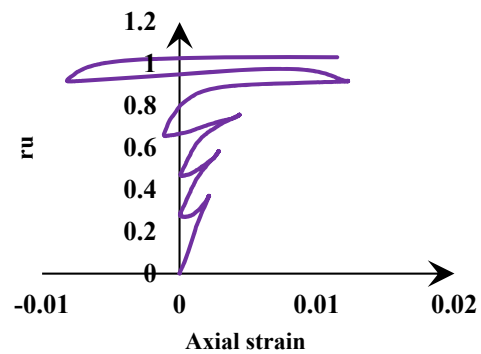
جدول ۵. معادله برازش داده شده منحنی روانگرایی محدوده کاملی از خاک‌ها

1	Soil type
2	clean sand: S
5	70% sand with 30% silt: S7M3
7	40% sand with 60% silt: M6S4

Table 5. The trends obtained for liquified soils in the form of second order equations

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

در شکل (۵) تأثیر میزان ریزدانه بر تغییرات کرنش محوری نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است نمونه  $S7M3$  در تعداد سیکل‌های کمتر، 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) است که در  $CSR=0.2$  به ترتیب در  $S7M3$ ،  $M6S4$  و  $S$  رخ می‌دهد. در شکل‌های (۶ و ۷) نیز تأثیر  $CSR$  روی  $r_u$  نشان داده شده است. مقایسه دو شکل (۶ و ۷) نشان می‌دهد که با افزایش لای



ت

fig 3. Undrained cyclic triaxial testing on M6S4 at a confining pressure of 100 kPa,  $D_r=30\%$ , and  $CSR=0.2$ : (a) deviatoric stress vs. number of cycles; (b) axial strain vs. cycles; (c)  $r_u$  vs. number of cycles; (d)  $r_u$  vs. axial strain;

شکل (۳ الف) تنش انحرافی بر حسب بار سیکلی را نشان می‌دهد که معادل تنش انحرافی برابر با  $CSR=0.2$  است. شکل (۳ ب) کرنش محوری بر حسب سیکل است و همان‌طور که از شکل نمایان است سیکل ۴ام نقطه شروع افزایش تغییر شکل‌ها یا به عبارتی زمان آغاز روانگرایی می‌باشد. به همین ترتیب شکل (۳ پ) نشان دهنده تغییرات  $r_u$  بر حسب سیکل است. همان‌گونه که مشخص است در سیکل ۴ام  $r_u$  به مقدار یک رسیده است که نشانگر آغاز روانگرایی خاک مورد نظر است. تغییرات  $r_u$  بر حسب کرنش محوری نیز در شکل (۳ ت) نشان داده شده است که با رسیدن  $r_u$  به یک (۱)، کرنش محوری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

شکل ۴. تغییرات  $CSR$  بر حسب سیکل‌های آغاز روانگرایی

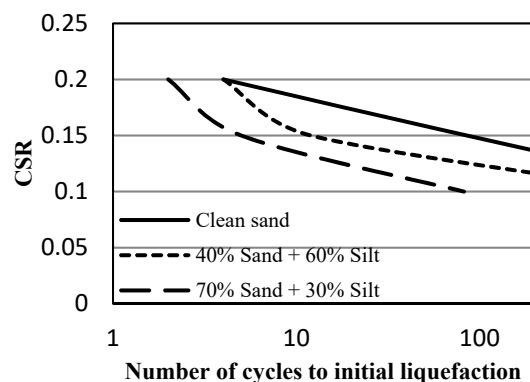


fig. 4. CSR vs. number of cycles to liquefaction.

شکل (۴) نشان دهنده نمودار  $CSR$  بر حسب تعداد سیکل‌های مورد نیاز روانگرایی برای بازه کاملی از خاک‌ها است. همان‌گونه



از S7M3 تا M6S4 اختلاف بین نمودارهای  $r_u$  در CSRهای مختلف افزایش یافته است. شکل ۵. تأثیر میزان ریزدانه بر کرنش محوری در CSR=0.2

از S7M3 تا M6S4 به یکدیگر نزدیک هستند. این در حالی است که در CSR=0.15 نمودارها از یکدیگر فاصله می‌گیرند. از طرفی دیگر در هر دو شکل و هر دو CSR، سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای مربوط به S7M3 است. این در حالی است که رفتار دو خاک دیگر در اثر تغییر CSR متفاوت بوده است. در CSR=0.2 پس از S7M3 و M6S4 به ترتیب سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای را تجربه کردند در حالی که در CSR=0.15 بعد از S7M3 و M6S4، S به ترتیب سریع‌ترین افزایش فشار آب حفره‌ای را داشتند که این امر نشان دهنده تأثیر CSR بر مقاومت روانگرایی خاک‌ها است.

شکل ۶. تأثیر CSR بر  $r_u$  در خاک S7M3

fig. 5. Effect of fines content on axial strain at CSR = 0.2

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

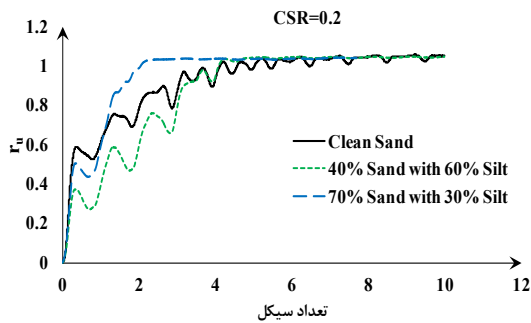


fig. 8. Effect of fines content on  $r_u$  at CSR = 0.2

شکل ۷. تأثیر CSR بر  $r_u$  در خاک M6S4

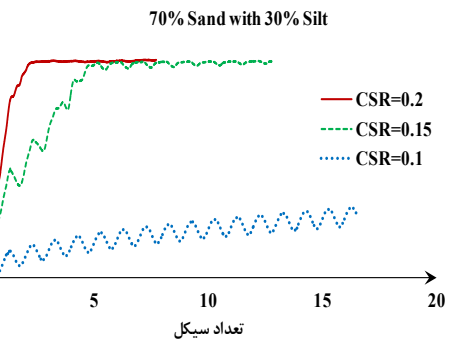


fig. 6. Effect of CSR on  $r_u$  on S7M3

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

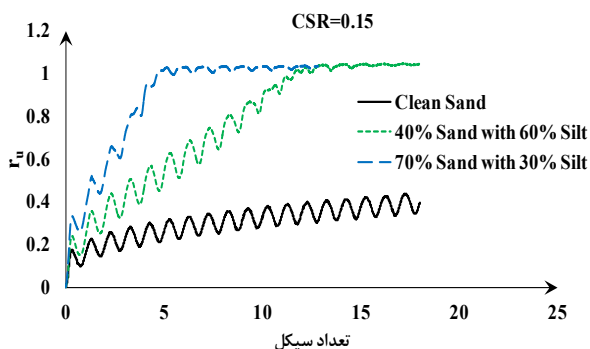


fig. 9. Effect of fines content on  $r_u$  at CSR = 0.15.

شکل ۱۰. تأثیر CSR بر  $r_u$  در خاک S7M3

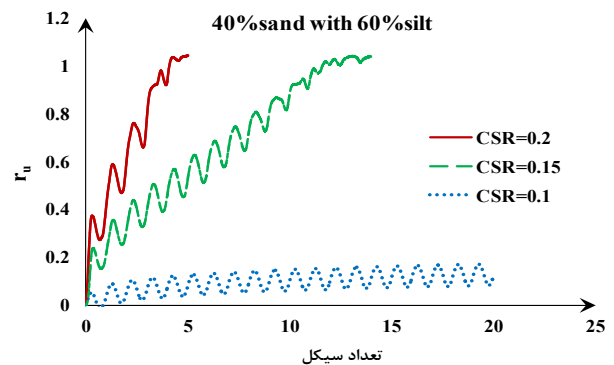


fig. 7. Effect of CSR on  $r_u$  on M6S4

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)

تأثیر مقادیر ریزدانه روی  $r_u$  در شکل‌های (۸ و ۹) بررسی شده است. مقایسه این دو شکل تأثیر مشهود CSR بر رفتار روانگرایی خاک‌ها را نشان داده است. از این رو مشخص است که در

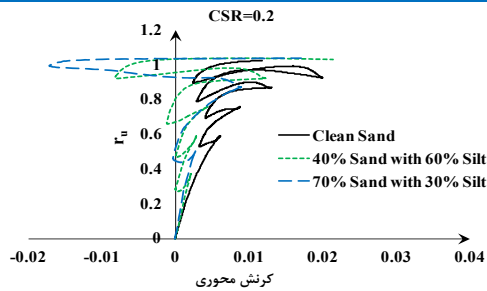


fig. 12. Effect of fines content on  $r_u$  vs. axial strain at CSR = 0.2

شکل ۱۳: تأثیر میزان ریزدانه در CSR=0.15 بر تغییرات  $r_u$  بر حسب

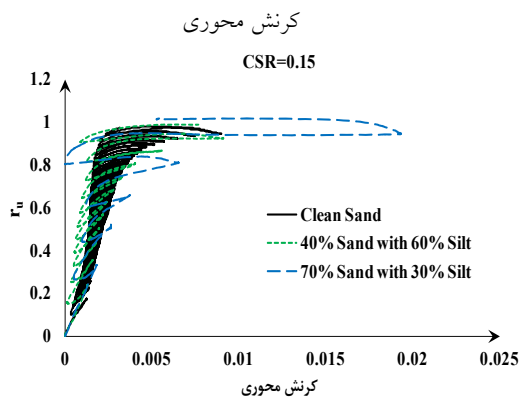


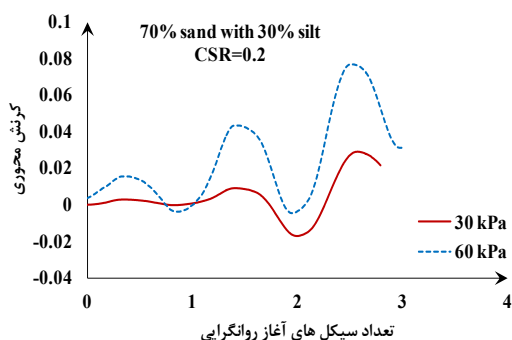
fig. 13. Effect of fines content on  $r_u$  vs. axial strain at CSR = 0.15.

۳-۱- بررسی مرحله اشباع سازی  $B_{value}$  در آزمایش سه

### محوری سیکلی

در شکل (۱۴) نمودار کرنش محوری بر حسب سیکل برای دو نمونه S7M3 تحت CSR=0.2 و شرایط کلی مشابه، با این تفاوت که یک بار گام‌های افزایش فشار، CP و BBP، ۳۰ و بار دوم ۶۰، برای دستیابی به اشباع سازی نمونه بالای ۹۵ درصد ( $B_{value} = 0.95$ ) ارائه شده است.

شکل ۱۴: تأثیر گام‌های اعمال فشار مرحله اشباع سازی بر کرنش محوری در خاک S7M3



(۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش لای از S7M3 تا M6S4 در CSRهای مختلف برای رسیدن نمونه به ( $r_u = 1$ ) نمونه دارای لای بیشتر، کرنش کمتری را تجربه می‌کند و همچنین در M6S4 در CSR=0.1 با اعمال تعداد سیکل‌های زیاد بر نمونه تغییرات ناچیزی در کرنش و افزایش در فشار آب حفره‌ای رخ داده است. شکل ۱۰: تأثیر CSR بر تغییرات  $r_u$  بر حسب کرنش محوری در S7M3

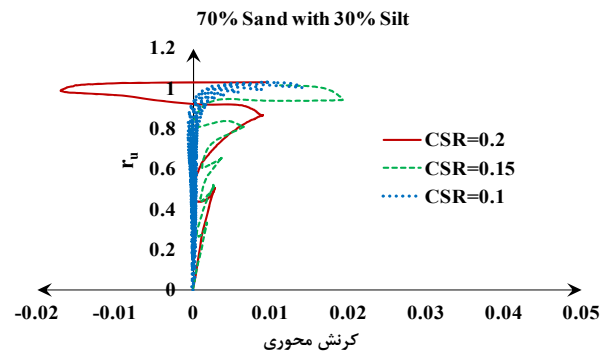


fig. 10. Effect of CSR on  $r_u$  vs. axial strain in S7M3

شکل ۱۱: تأثیر CSR بر تغییرات  $r_u$  بر حسب کرنش محوری در M

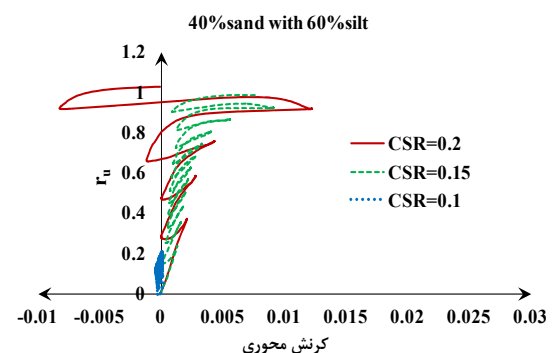


fig. 11. Effect of CSR on  $r_u$  vs. axial strain in M6S4

در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) تأثیر میزان ریزدانه بر تغییرات  $r_u$  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 ( $r_u = 1$ ) تجربه می‌کنند و همچنین مسیر کرنش طی شده ۳ نوع خاک برای رسیدن به ( $r_u = 1$ ) در CSR=0.15 یکنواخت تر از CSR=0.2 است.

شکل ۱۲: تأثیر میزان ریزدانه در CSR=0.2 بر تغییرات  $r_u$  بر حسب کرنش محوری



۲۰ درصد لای و همچنین پولیتو و مارتین ۲۰۰۱ که این مرز را ۳۵ درصد لای بیان نموده‌اند هم‌خوانی دارد.

در پژوهش‌های پیشین ماهشوری و پاتل ۲۰۱۰ بیان نمود که میزان لای بحرانی برای تولید ماکزیمم فشار آب حفره‌ای بسته به میزان CSR متفاوت است [11] و همچنین آکیلا و همکاران ۲۰۱۹ 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 سیکلی افزایش یافته است [12]. در مقایسه با نتایج این پژوهش و با توجه به شکل 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.

همچنین از مشاهده شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نمایان است که مسیر کرنشی طی شده توسط ۳ نوع خاک برای رسیدن به  $\tau_u = 1$  تقریباً یکسان است 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 ۲۰۲۰، قربانی و همکاران ۲۰۲۰ و سوامی و همکاران ۲۰۲۰ انجام شده است به گونه‌ای نتایج به دست آمده 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 رفتار نمونه‌ها متفاوت است همچنین تغییرات منحنی  $\tau_u$  بر حسب سیکل در پژوهش ارائه شده توسط سوامی و همکاران ۲۰۲۰ 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- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از ماسه ۱۶۱ و لای غیر پلاستیک فیروزکوه

fig. 14. Effect of pressure increase on axial strain in S7M3.

همان‌گونه که از شکل (۱۴) مشخص است نمونه‌ای که تحت گام‌های فشار 60Kpa 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 کیلو پاسکال و CP=225 و BBP=215 اشباع شده، تجربه کرده است. تأثیر این موضوع روی نتایج روانگرایی و کرنش‌های حاصل از آن در نمونه‌های ماسه مشهود است ولی این در حالی است که در ماسه لای دار تأثیر آن ناچیز بوده است.

## ۴- بحث و بررسی

همان‌طور که در پیشینه این پژوهش بیان شد برخی پژوهشگران 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 است، زیرا هر چه از ماسه خالص به سمت ماسه با ۳۰ درصد لای پیش می‌رویم، 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 سیکلی کاهش یابد. بنابراین پتانسیل روانگرایی در این شرایط افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر لای فراتر از 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 ۱۹۹۴ که مرز تغییر رفتار را به میزان

با ۳۰ درصد لای در سه سیکل ابتدایی بارگذاری، کرنش محوری حاصل شده تحت بارگذاری یکسان، در نمونه‌ای که با گام‌های اعمال فشار ۶۰ کیلوپاسکال اشباع شده بود تقریباً ۳ برابر بیشتر از نمونه‌ای بوده که با گام‌های اعمال فشار ۳۰ کیلو پاسکال اشباع شده است.

## ۶- مراجع

- [1] Polito C.P. 1999 The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandt soil. PhD 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. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 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] Tronsco 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. *Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference*. Seattle, USA, 2, 1017-32.
- [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*

بررسی آثار تنش سیکلی و میزان ریزدانه غیر پلاستیک بحرانی بر به بررسی تأثیر توأمان نسبت تنش سیکلی (CSR) و درصد ریزدانه غیر خمیری در فشار همه‌جانبه ثابت روی روانگرایی ماسه لای‌دار با استفاده از آزمایش سه محوری سیکلی پرداخته شده است.

با بررسی روی ۳ نوع خاک شامل ماسه، ماسه با ۳۰ درصد لای و ماسه با ۶۰ درصد لای 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. بدین صورت که در CSR=0.2 روانگرایی در ماسه خالص در سیکل ۴، ماسه با ۳۰ درصد لای در سیکل ۲ و ماسه با ۶۰ درصد لای در سیکل ۴ به وقوع پیوسته است. زیرا هر چه از ماسه خالص به سمت ماسه با ۳۰ درصد لای پیشروی می‌شود 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 سیکلی 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 شده، و خاک رفتار ریزدانه به خود گرفته که سبب کاهش پتانسیل روانگرایی می‌شود

از سویی دیگر تأثیر CSR بر رفتار روانگرایی تمامی نمونه‌های خاک در این پژوهش مشهود بوده است. به طوری که با تغییرات نسبت تنش سیکلی میزان درصد ریزدانه‌هایی که به ترتیب بیشترین فشار آب حفره‌ای را ایجاد می‌کنند، تغییر می‌کنند. ضمناً سه نمونه حاوی مقادیر مختلف لای، رفتار کرنشی متفاوتی را در مقادیر مختلف CSR نشان داده‌اند. به این صورت که مسیر کرنش طی شده سه نوع خاک برای رسیدن به  $(r_{ui} = 1)$  در CSR=0.15 یکنواخت تر از CSR=0.2 است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت پذیرفته تحت شرایط متفاوتی از گام‌های اعمال فشار CP و BBP برای اشباع‌سازی نمونه (دستیابی به اشباع ۹۵ درصد)، که به منظور بررسی آثار میزان گام‌های اعمال فشار در مرحله اشباع‌سازی بر نتایج روانگرایی در این پژوهش به آن پرداخته شده است، نتایج بیانگر آن بوده که تأثیر تغییر گام‌های فشار در نتایج ماسه لای‌دار و تا حد کمتری بر روی ماسه مشهود به نظر می‌رسد. به عنوان نمونه در ماسه

- transparent laminar shear box in shaking table. *International Journal of Geotechnical Engineering*. **14**(5), 514-526.  
<https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1712532>.
- [15] 15. Swamy K. R., Akhila M. and Sankar N. 2020 Effects of fines content and plasticity on liquefaction resistance of sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, doi: 10.1680/jgeen.19.00270.
- [16] ASTM D5311. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. (2013)
- 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*. Feb., **16**(54), 170 – 175.
- [13] Choobbasti A. J., selataneh H. and petanlar M. K. 2020 Effect of fines on liquefaction resistance of sand. *Innovatve 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

## Effects of Cyclic Stress and the Amount of Critical Non-Plastic Fine Grains on the Liquefaction Potential of Silty Sand in Cyclic Triaxial Experiment

<sup>1\*</sup>Nabialah Ahmadi & <sup>2</sup>Sina Safargholitabar Marzuni

\*1 Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran,  
2.(Ph.D. Candidate), Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Division, Tehran, Iran,

### Abstract

Liquefaction is the cause of many earthquake-induced failures in loose to semi-dense saturated deposits. Most recently published works have been focused on the liquefaction potential of clean sands. However, the studies on silt and silty sands, particularly the effect of cyclic stress ratio (CSR) on the critical silt content in evaluating sand liquefaction potential with 40% fine grains and more, have received less attention. Hence, the present work attempts to determine the effects of CSR, backpressure, the percentage of non-plastic fine-grain contents, and the effect of pressure on the saturated soil using cyclic triaxial experiment constant confining pressure. Samples were prepared by mixing 161-Firoozkuh Sand with three different silt amounts, including 0, 30, and 60 wt%. The experiment continued by the "wet tamping method," in which samples were made with a diameter of 5 cm and a height of 10 cm. All samples were compacted under a constant confining pressure of 100 kPa at a relative density of 32%, following the recommendation of ASTM.D-5311. According to the obtained results, with increasing the silt in the sand by 30%, a decrease in liquefaction resistance occurred. However, with a further increase of silt to sandy soil with 60% silt, an increase in liquefaction resistance was observed. This indicates that systematic progress from pure sand to sand with 30% silt led the fine particles of silt to fill the voids between coarser particles of sand. This resulted in reducing the soil drainage capacity during earthquake vibrations or cyclic loading. Therefore, the liquefaction potential increases in these conditions, but the sand-like behavior still prevails up to 30% fine-grained. A further increase beyond 30% changes the soil behavior, and the soil adopts fine-grained behavior, which reduces the liquefaction potential. CSR's effects on

liquefaction behavior of all soil samples of this study have been evident that with changes in the CSR, the percentage of fine particles that cause the highest pore water pressure, respectively, change. In this regard, the liquefaction curve equation is presented in the range of sandy to loamy sands. The results showed that by increasing the silt content up to 30%, a decrease in liquefaction resistance occurred, and then a further increase in the silt content caused an increase in the resistance. It was observed that by increasing fine grains up to 30%, the behavior of sand is predominant; however, when the content of fine grains exceeds 30%, the behavior of fine grains and silt is dominant. Collectively, the results show that changes in CSR's value cause a regular change in the percentage of fine particles that cause the highest pore water pressure. On the other hand, the effect of backpressure on the soil skeleton in the saturation state (B-value) of the samples based on liquefaction potential and the resulting strains was insignificant in the sand with 60% silt and somewhat more pronounced in the sand with 30% silt.

**Keywords:** Cyclic triaxial testing, Liquefaction potential, Silty sand, Cyclic Stress Ratio, Non-Plastic