

بررسی آزمایشگاهی آثار چگالی نسبی و میزان ریزدانه‌ی غیرخمیری در پتانسیل روانگرایی و نشست ماسه‌ی اشباع

هادی یانی* (دانشجوی دکتری)

محمدحسین باقری‌پور (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مهندسی عمران تشریف: (بهار ۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۲۵-۳۶

روانگرایی پدیده‌ی است که طی آن رسوب‌های سُست اشباع، هنگامی که تحت بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند، مقاومت‌شان به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و یا از بین می‌رود، لذا شناخت هر چه بهتر روانگرایی و عوامل مؤثر در آن اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر، تأثیر چگالی نسبی و میزان ریزدانه‌ی غیرخمیری در پتانسیل روانگرایی و نشست ماسه‌ی اشباع با استفاده از دستگاه میز لرزه بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش تراکم نسبی، حتی در تکان‌های نسبتاً شدید، فشار آب حفره‌یی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد و در چگالی‌های بالا نیز احتمال روانگرایی کاملاً از بین می‌رود. به‌علاوه مقدار نشست سطحی خاک نیز به‌صورت قابل توجهی کاهش خواهد یافت. همچنین با زیاد شدن مقدار ریزدانه‌ی غیرخمیری، فشار آب حفره‌یی افزایش و در مقابل میزان نشست خاک، کاهش خواهد یافت. به‌علاوه با افزایش میزان چگالی نسبی و در درصد‌های سیلت بالا، حالت روانگرایی سریع‌تر از بین می‌رود.

واژگان کلیدی: روانگرایی، ماسه‌ی اشباع، ریزدانه‌ی غیرخمیری، چگالی نسبی، میز لرزه.

۱. مقدمه

می‌توان نتیجه گرفت که روانگرایی در بسیاری از خاک‌ها می‌تواند رخ دهد، اما مقدار تراکم و درصد ریزدانه‌ی غیرخمیری و خمیری می‌تواند در استعداد روانگرایی تأثیر زیادی بگذارند و چه بسا می‌توانند پتانسیل روانگرایی را از بین ببرند. معمولاً مؤثرترین روش در مقابله با روانگرایی و جلوگیری از آثار مخرب آن، شناسایی و فراهم آوردن نقشه‌ی مناطق مستعد روانگرایی است که باعث می‌شود پیش از اجرای طرح‌های عمرانی، پیش‌بینی و تمهیدات لازم برای پایداری سازه‌ها به عمل آید. امروزه روش‌های زیادی برای اصلاح خاک‌های دارای پتانسیل روانگرایی، از قبیل: برداشتن یا جایگزینی خاک نامطلوب، متراکم کردن خاک در محل، بهسازی خاک منطقه به‌وسیله‌ی روش‌هایی، مانند: تزریق، تثبیت شیمیایی، نصب ستون‌های زهکش و غیره وجود دارد.^[۱]

برای بررسی پتانسیل روانگرایی خاک، پژوهشگران مختلفی در سراسر جهان از روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی، عددی، شبیه‌سازی، ظرفیت انرژی و اعتمادپذیری استفاده کرده‌اند.^[۲-۵] همچنین در زمینه‌ی مطالعات صورت گرفته بر روی تأثیر چگالی نسبی در رفتار روانگرایی خاک‌ها می‌توان به مطالعه‌ی باز یار و همکاران (۲۰۱۱)،^[۶] اشاره کرد که مقاومت روانگرایی را بر مبنای روش انرژی کرنشی برای ماسه‌ی مخلوط با سیلت در چگالی‌های نسبی مختلف پیش‌بینی و در مطالعه‌ی خود یک مدل

روانگرایی خاک، پدیده‌ی است که در آن خاک اشباع در اثر تنش شدیدی که به آن وارد می‌شود، مقاومت و سختی خود را از دست می‌دهد و رفتاری شبیه به یک سیال پیدا می‌کند. تنش واردی ذکر شده می‌تواند در اثر تکان‌های ناشی از زلزله یا دگرگونی‌های ناگهانی در شرایط تنش خاک باشد. تا مدت‌ها تصور بر این بود که پدیده‌ی روانگرایی مختص ماسه است، اما در شن نیز روانگرایی هم در محل و هم در آزمایشگاه مشاهده شده است. علاوه بر این، روانگرایی لایه‌های غیرخمیری هم در آزمایشگاه و هم در صحرای مشاهده شده است که خود نشان می‌دهد خصوصیات خمیری خاک نیز، علاوه بر دانه‌بندی، در قابلیت روانگرایی خاک‌های ریزدانه اثر می‌گذارد. اما از آنجایی که اغلب خاک‌های ماسه‌یی در توده‌های رسوبی و خاکریزهای احداثی، دامنه‌ی خمیری کمتر از ۱۵ دارند، لذا اثر حالت خمیری ریزدانه در آن‌ها کم است. به همین منظور بیشتر مطالعات صورت گرفته در مورد ماسه‌های حاوی ریزدانه، مربوط به ماسه‌هایی است که ریزدانه‌ی غیرخمیری دارند. لایه‌های درشت‌دانه که غیرچسبیده و غیرخمیری هستند، شدیداً مستعد روانگرایی هستند. با توجه به موارد ذکر شده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۶/۲۱، پذیرش ۱۳۹۷/۶/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2018.50374.2306

جدید بر مبنای آزمایش‌های انجام گرفته با دستگاه سه‌محوری سیکلی، دستگاه برش ساده و پیچشی ارائه کردند. در ادامه، کیم و همکاران (۲۰۱۳)، آثار چگالی نسبی و کرنش برشی جمعی را بر روی تغییر شکل‌های ماندگار پس از روانگرایی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در بازه‌ی چگالی نسبی ۴۰-۶۰ درصد و کرنش برشی جمعی ۵۰-۱۰۰ درصد، تراکم نسبی آثار بیشتری نسبت به تعداد سیکل‌ها دارد. [۷] به علاوه اسمیس و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر چگالی نسبی و ضریب تحکیم در پتانسیل روانگرایی مجدد ماسه را بر روی ۴ ماسه‌ی سست و ماسه‌ی سیلیسی تقریباً روانگرا مطالعه و نتیجه‌گیری کردند که با وجود افزایش قابل توجه در میزان چگالی نسبی، مقاومت روانگرایی مجدد ماسه ممکن است کاهش یابد. [۸] در پژوهش دیگری حاکام (۲۰۱۶)، روانگرایی ماسه را براساس اندازه‌ی دانه و تراکم نسبی بررسی کرد و نتیجه گرفت که بین متوسط سایز دانه‌ها و چگالی نسبی با مقاومت روانگرایی، رابطه‌ی منحصر به فردی وجود دارد؛ بدین معنی که خاک با اندازه‌ی دانه‌ی بزرگ‌تر و تراکم نسبی بیشتر ممکن است مقاومت در برابر روانگرایی بالاتری داشته باشد. [۹] همچنین روح‌الامین و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه‌ی بر روی اثر چگالی نسبی اولیه در رفتار پس از روانگرایی ماسه با استفاده از دستگاه سه‌محوری سیکلی انجام دادند و نتیجه گرفتند که مدول برشی حالت اولیه، مدول برشی حالت پایدار و کرنش برشی وابسته به تراکم نسبی ماسه هستند. [۱۰] در مطالعه‌ی دیگری ویس کرمی و همکاران (۲۰۱۳)، اثر چگالی نسبی اولیه در تغییرات فشار آب حفره‌ی و نشست را برای ماسه در ۳ چگالی نسبی مختلف بررسی کردند و دریافتند که با افزایش تراکم نسبی، میزان فشار آب حفره‌ی و نشست کاهش پیدا می‌کند. [۱۱]

درخصوص بررسی اثر سیلت در روانگرایی هم می‌توان به مطالعه‌ی امینی و کای (۲۰۰۰) اشاره کرد که با انجام یک‌سری آزمایش سه‌محوری به این نتیجه رسیدند که با کاهش میزان سیلت، عموماً مقاومت روانگرایی کاهش می‌یابد. [۱۲] همچنین مارکیوس و همکاران (۲۰۱۲)، تأثیر ریزدانه‌ی غیرخمیری را در مقاومت روانگرایی ماسه‌ی کوبیمبر بررسی کردند و با انجام مجموعه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و برش پیچشی زهکشی نشده بر روی ماسه‌ی کوبیمبر دریافتند که نمی‌توان هیچ نتیجه‌ی مشخصی از تأثیر درصد ریزدانه در مقاومت روانگرایی ماسه‌ی تحت بارهای سیکلی گرفت. در ضمن نتیجه گرفتند که ریزدانه‌ی غیرخمیری می‌تواند مقاومت روانگرایی ماسه‌ی کوبیمبر را کاهش دهد. [۱۳] همچنین مومینوال و همکاران (۲۰۱۳)، پژوهشی بر روی خصوصیات دینامیکی و پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی سیلت‌دار انجام دادند و با انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی بر روی ماسه‌ی سیلت‌دار نتیجه گرفتند که مقاومت روانگرایی ماسه با افزایش میزان سیلت تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد و در بالای ۳۰٪، افزایش مقاومت روانگرایی با مقدار سیلت تغییرات ناچیزی خواهد داشت. [۱۴] به علاوه چن و همکاران (۲۰۱۴)، پتانسیل روانگرایی ماسه‌ی سیلت‌دار غیرخمیری را بررسی کردند و دریافتند که برای نمونه‌های با نسبت تخلخل مشابه، ماسه‌ی سیلت‌دار با درصد ریزدانه‌ی بالاتر، مقاومت سیکلی کمتری دارند. [۱۵]

در ادامه، ال تاکچ و همکاران (۲۰۱۵)، با مطالعه بر روی رفتار روانگرایی سیلت و ماسه‌ی سیلت‌دار با استفاده از دستگاه برش حلقه‌ی سیکلی دریافتند که برای ماسه‌ی سیلت‌دار با کاهش میزان سیلت در یک نسبت تخلخل ثابت، نسبت مقاومت سیکلی کاهش می‌یابد. [۱۶] در پژوهش دیگری، احمد خان و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر ریزدانه در مقاومت روانگرایی ماسه‌ی ریز و ماسه‌ی سیلت‌دار را بررسی و نتیجه‌گیری کردند که وجود ریزدانه‌ی غیرخمیری تا حد زیادی در مقاومت روانگرایی تأثیر می‌گذارد، به‌طوری‌که با افزایش ریزدانه‌ی غیرخمیری، مقاومت در برابر روانگرایی افزایش خواهد یافت. [۱۷]

همچنین کو و همکاران (۲۰۱۶)، مطالعه‌ی بر روی تأثیر ریزدانه در مقاومت

روانگرایی انجام دادند و دریافتند که برای ماسه با ریزدانه‌ی خمیری، مقاومت در برابر روانگرایی افزایش و برای ماسه با ریزدانه‌ی غیرخمیری، مقاومت در برابر روانگرایی کاهش می‌یابد. [۱۸] در مطالعه‌ی دیگری، ملکی و طاهری‌نیا (۲۰۱۳)، با انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی بر روی ۴ نوع ماسه‌ی مختلف نتیجه گرفتند که با افزایش درصد سیلت تا حدود ۳۰٪، مقاومت در مقابل روانگرایی کاهش، ولی از ۳۰٪ به بالا مقاومت در مقابل روانگرایی افزایش پیدا می‌کند. [۱۹] به علاوه سه‌لانه و جانعلی‌زاده (۲۰۱۴)، تأثیر ریزدانه‌ی غیرخمیری در مقاومت روانگرایی زهکشی نشده‌ی ماسه را با استفاده از دستگاه سه‌محوری سیکلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد سیلت در یک فشار دورگیر و نسبت تنش سیکلی ثابت، پتانسیل روانگرایی افزایش می‌یابد. [۲۰]

در پژوهش دیگری، قربانی و نژادمقدم (۲۰۱۵)، اثر ریزدانه‌ی غیرخمیری در مقاومت روانگرایی را با به کارگیری میز لرزه بررسی کردند و دریافتند که با افزایش میزان ریزدانه‌ی غیرخمیری، پتانسیل روانگرایی کاهش می‌یابد. [۲۱]

با مروری کلی بر روی مطالعات صورت گرفته‌ی پیشین می‌توان دریافت که بیشتر آزمایش‌ها با دستگاه سه‌محوری سیکلی یا دستگاه برش سیکلی انجام گرفته است که در مقایسه با دستگاه میز لرزه، آزمایش‌های کوچک مقیاس محسوب می‌شوند و محدودیت‌هایی نیز دارند، از جمله، بررسی نشست خاک با آزمایش‌های مذکور امکان‌پذیر نیست.

به‌علاوه با مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص است که نتایج متفاوتی درخصوص اثر میزان سیلت در مقاومت روانگرایی خاک‌ها به‌دست آمده است که این موضوع لزوم بررسی‌های بیشتر در این زمینه را آشکار می‌سازد و با توجه به آنکه آزمایش‌های پژوهش حاضر با دستگاه میز لرزه صورت گرفته است، نتایج به‌دست آمده می‌تواند اهمیت بسیاری داشته باشد. لازم به توضیح است که در مطالعات اخیر، بیشترین اختلاف درخصوص اثر میزان ریزدانه‌ی غیرخمیری در پتانسیل روانگرایی، در درصد‌های ریزدانه غیرخمیری کم بوده است (عمدتاً کمتر از ۲۵٪)، بنابراین در پژوهش حاضر مقدار بیشینه‌ی سیلت استفاده شده در آزمایش‌ها ۲۰٪ است.

همچنین در مطالعات پیشین به‌ندرت به آثار چگالی نسبی و میزان سیلت در نشست ماسه‌ی روانگرا توجه و کمتر بر روی تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ی بحث شده است، و بیشتر بررسی‌ها بر روی نسبت مقاومت سیکلی صورت گرفته است. و نیز بیشتر آزمایش‌ها در شتاب‌ها و بسامدهای تقریباً پایین انجام شده است، در حالی که پدیده‌ی روانگرایی که باعث آسیب‌های مخرب می‌شود، بیشتر در لرزش‌های نسبتاً شدید رخ می‌دهد که در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است این مورد لحاظ شود. لذا با توجه به مطالب و ضعف‌های مورد بحث، تصمیم به انجام پژوهش حاضر گرفته شده و سعی بر آن بوده است که تأثیر چگالی نسبی و میزان سیلت در نسبت فشار آب حفره‌ی و نشست ماسه‌ی روانگرا در تکان‌های نسبتاً شدید با استفاده از دستگاه میز لرزه بررسی شود.

۲. برآورد روانگرایی

روانگرایی پدیده‌ی است که در طی آن مقاومت خاک در مدت زمان کوتاهی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد و یا حتی از بین می‌رود. روانگرایی بیشتر در خاک‌ها و رسوبات سست اشباعی که در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند، روی می‌دهد. پژوهشگران زیادی طی سال‌های گذشته، روش‌های مختلفی را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی معرفی کرده‌اند. همه‌ی روش‌های متداول برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی

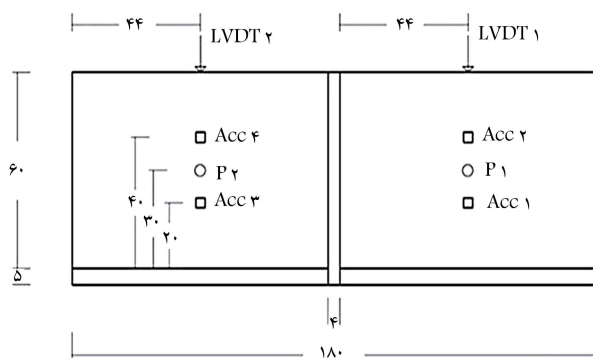
خاک در هنگام انجام آزمایش‌ها) برای دیوارهای انتهایی در جهت ارتعاش میز از فوم اسفنجی به ضخامت ۲/۴ سانتی‌متر استفاده شده است که قابلیت فشرده‌گی بالایی دارد. فوم اسفنجی مانع انعکاس امواج تولید شده در اثر لرزش می‌شود.^[۲۴] همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهد که هر چه ضخامت فوم افزایش یابد، تأثیر آن بیشتر خواهد شد.^[۲۵]

در پایین محفظه، دو عدد الک بسیار ریز (الک‌های ۱۴۰ و ۲۰۰) بر روی هم قرار داده شدند تا اشباع نمونه به صورت تدریجی و یکنواخت از کف صورت پذیرد. شیر ورودی در انتهای جعبه قرار گرفته بود که در نتیجه، فضایی در کف محفظه ایجاد می‌شد و به هنگام اشباع نمونه، ابتدا این فضا از آب پر می‌شد و سپس آب به صورت تدریجی و یکنواخت از پایین مدل به بالای آن حرکت می‌کرد. در شکل ۱، میز لرزه و تانک شفاف روی آن نمایش داده شده است.

در پژوهش حاضر در هر طرف محفظه از ۳ نوع حسگر شتاب، فشار آب حفره‌یی و جابه‌جایی استفاده شده است که در هنگام ساخت نمونه‌های خاک، دو عدد شتاب‌سنج (Acc) در ارتفاع ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری و یک حسگر فشار آب حفره‌یی (P) نیز در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از کف و در وسط نمونه‌ها قرار گرفته است. بعد از ساخت نمونه‌ها در هر طرف، یک حسگر جابه‌جایی‌سنج (LVDT) برای ثبت تغییر مکان‌های عمودی بر روی خاک قرار داده شده است. به علاوه دو حسگر شتاب نیز مربوط به خود دستگاه میز لرزه است که بر روی جداره‌ی تحتانی و لبه‌ی فوقانی تانک شفاف قرار گرفته و ثابت شده بودند و شتاب میز را در هنگام انجام آزمایش‌ها ثبت می‌کردند. حسگرهای فشار آب حفره‌یی و تغییر مکان‌ها در محل خود ثابت شده‌اند، در حالی که حسگرهای شتاب به‌طور آزاد در درون خاک قرار گرفته‌اند. قابل ذکر است که در پژوهش حاضر برای انجام کلیه‌ی آزمایش‌ها، محفظه فقط تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری از ماسه پر شده است. نمای کلی مدل و نحوه‌ی حسگرگذاری در آزمایش‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. میز لرزه و تانک شفاف استفاده شده در پژوهش حاضر.



شکل ۲. نمای کلی مدل و نحوه‌ی حسگرگذاری (ابعاد بر حسب cm).

خاک در آزمایشگاه و محل، به طور کلی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند:^[۲۶]

الف) برآورد پتانسیل روانگرایی براساس تنش سیکنی؛

ب) برآورد پتانسیل روانگرایی براساس کرنش سیکنی.

برای ارزیابی روانگرایی به روش تنش سیکنی باید ضریب اطمینان در برابر روانگرایی (F.S) به‌این صورت محاسبه شود:^[۲۷]

۱. محاسبه‌ی نسبت تنش برشی سیکنی (CSR)^۱ به‌وجود آمده در خاک توسط زلزله با به‌کارگیری روابط و نمودارهای ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف؛

۲. محاسبه‌ی نسبت مقاومت برشی سیکنی (CRR)^۲، براساس روابط و نمودارهای مختلف موجود؛

۳. محاسبه‌ی ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی (F.S) با تقسیم CSR به CRR.

اگر ضریب اطمینان به‌دست آمده کوچک‌تر از ۱ باشد، آنگاه احتمال وقوع روانگرایی وجود خواهد داشت. ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش کرنش برشی سیکنی برای اولین بار توسط دبری و همکاران پیشنهاد شد،^[۲۸] که در آن از کرنش برشی سیکنی به جای تنش برشی سیکنی جهت تعیین بارگذاری حاصل از زلزله استفاده شده است. مطالعات انجام شده نشان داده است که کرنش برشی سیکنی در مقایسه با تنش برشی سیکنی، پارامتر مناسبی جهت ارزیابی اضافه فشار آب حفره‌یی ایجاد شده در ماسه‌ی اشباع در طول بارگذاری سیکنی در وضعیت زهکشی نشده است.

برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش کرنش سیکنی، ابتدا کرنش برشی سیکنی ایجاد شده در اثر زلزله محاسبه می‌شود. سپس تعداد سیکل‌های معادل بارگذاری سیکنی یکنواخت مشابه روش تنش سیکنی محاسبه می‌شود. در ادامه، نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی $R_U = \Delta u / \sigma'_v$ (تغییرات فشار آب حفره‌یی تقسیم بر تنش مؤثر قائم) با داشتن کرنش برشی سیکنی به‌دست خواهد آمد. براساس روش ذکر شده، روانگرایی در عمق موردنظر از توده‌ی خاک زمانی رخ می‌دهد که $R_U > 0.9$ باشد.

۳. مدل و مصالح

۳.۱. معرفی میز لرزه

برای انجام آزمایش‌ها از میز لرزه‌یی کاملاً اتوماتیک متعلق به دانشگاه ارومیه استفاده شده است که تانک شفافی به ابعاد داخلی (ارتفاع) ۸۰ × (عرض) ۵۸ × (طول) ۱۸۰ سانتی‌متر بر روی آن قرار گرفته است. جداره‌ی تانک به ضخامت ۲ سانتی‌متر و از جنس پلکسی‌گلس بوده است. در ابتدا از صفحه‌ی پلاستیکی صلب و مقاوم به ضخامت ۴ سانتی‌متر در وسط تانک برای تقسیم آن به دو قسمت کاملاً مساوی استفاده شده است. برای جلوگیری از حرکت صفحه، در زمان ساخت نمونه و انجام آزمایش‌ها، پایین و اطراف آن کاملاً چسبانده و در بالا از دو عدد نبشی متصل به تانک در طرفین صفحه استفاده شده است. همچنین اطراف صفحه برای جلوگیری از خطا در حین ساخت و اشباع‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، به‌طور کامل و مناسب آب‌بندی شده است. از مزایای تانک شفاف اخیر می‌توان به امکان مشاهده‌ی رفتار مدل و ارزیابی تغییر شکل‌های ایجاد شده در اثر ارتعاش و از معایب آن نیز می‌توان به صلب بودن دیواره‌های انتهایی اشاره کرد که باعث می‌شود موج لرزه‌یی که به آن‌ها برخورد می‌کنند، منعکس شود و اندکی رفتار مدل را تحت تأثیر قرار دهد. لذا جهت رفع مشکل ایجاد شده (کاهش تأثیر صلبیت مرزهای میز لرزه در

۴. مصالح استفاده شده در پژوهش حاضر

۱.۴. ماسه

مطالعه‌ی کمی و تجربی رفتار ماسه‌ها و درک رفتار پیچیده‌ی آن‌ها، اهمیت ویژه‌ی دارد. لذا معرفی ماسه‌ی استاندارد با خصوصیات فیزیکی مشخص و حتی‌الامکان مشابه ماسه‌های استاندارد شناخته شده، برای تکرارپذیری نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ضروری است. در کلیه‌ی آزمایش‌هایی که در آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک مختلف در جهان بر روی نمونه‌های بازسازی شده انجام می‌شود، رعایت یک سری قوانین منطقی الزامی است. زیرا اگر مبنای قابل اعتمادی برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، قابلیت تکرارپذیری آن‌ها، امکان کنترل شرایط آزمایش، خواص مصالح مورد آزمایش و بسیاری از عوامل دیگر وجود نداشته باشد، عملاً اطمینان‌پذیری حاصل ناچیز خواهد بود. بنابراین باید از مصالحی شناخته شده و قابل اعتماد برای انجام آزمایش‌ها استفاده کرد.

در پژوهش حاضر از ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به‌عنوان ماسه‌ی استاندارد جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شده است که با دو ماسه‌ی استاندارد شناخته شده توپورا^۳ و سنگنیما^۴ مقایسه و خصوصیات مربوط به آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.^[۲۶] ماسه‌ی فیروزکوه از نظر خصوصیات فیزیکی و منحنی دانه‌بندی، شباهت بسیاری به ماسه‌های توپورا و سنگنیما دارد، لذا می‌توان نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده روی ماسه‌ی فیروزکوه را با نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی ماسه‌های مذکور قابل مقایسه دانست. به‌علاوه با توجه به منحنی‌های دانه‌بندی (شکل ۳) می‌شود نتیجه گرفت که ماسه‌ی فیروزکوه نسبت به ماسه‌های استاندارد اشاره شده، توزیع دانه‌بندی یکنواخت‌تری دارد که نشان می‌دهد ماسه‌ی فیروزکوه جهت انجام آزمایش‌ها، کیفیت بهتری دارد.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌های ۱۶۱ فیروزکوه، توپورا و سنگنیما.

خصوصیات	نوع ماسه		
	سنگنیما	توپورا	۱۶۱ فیروزکوه
چگالی ویژه (G_s)	۲٫۷۲	۲٫۶۵	۲٫۶۶
e_{max}	۰٫۹۱۱	۰٫۹۷۷	۰٫۸۵۸
e_{min}	۰٫۵۵	۰٫۵۹۷	۰٫۵۴۸
$D_{50}(mm)$	۰٫۲۷	۰٫۱۷	۰٫۳
$\%F$	۲٫۳	۰	۱
C_u	۱٫۹۳	۱٫۲۶	۲٫۵۸
C_c	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۰٫۹۷
$K(m/s)$	-	-	۰٫۱۲۵



شکل ۳. منحنی‌های دانه‌بندی ماسه‌های ۱۶۱ فیروزکوه، توپورا و سنگنیما.

۲.۴. سیلت

در مطالعه‌ی حاضر از سیلت غیرخمیری فیروزکوه استفاده شده است که دارای حد روانی (LL) ۲۵، حد خمیری (PL) ۲۳ و شاخص خمیری (PI) ۲ است.

۵. مدل آزمایش

در پژوهش حاضر، تعدادی آزمایش میز لرزه بر روی ۴ نمونه‌ی ماسه با چگالی‌های نسبی مختلف (آزمایش‌های ۱ و ۲) و نیز بر روی ۴ نمونه‌ی ماسه با مقادیر متفاوت سیلت (آزمایش‌های ۳ و ۴) انجام شده است (جدول ۲). لازم به توضیح است که در پژوهش حاضر، برای تهیه‌ی ماسه‌های سیلت‌دار از ترکیب ماسه‌ی خیلی سست ($D_r = 10\%$) با درصد‌های مختلف سیلت استفاده شده است. به‌عنوان مثال و برای مشاهده‌ی بهتر، ساختار مدل آزمایش‌های ۱ و ۲ در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

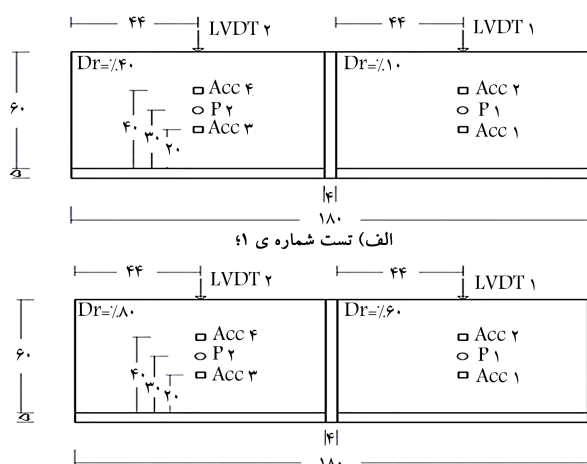
۷. نتایج

۶. روش انجام آزمایش

برای ساخت مدل‌ها از روش وزنی استفاده شده است، بدین صورت که میزان خاک لازم با توجه به وزن مخصوص خاک و حجم میز در هر طرف محاسبه شده است. سپس خاک به‌طور یکنواخت و لایه به لایه به‌صورت بارشی در جعبه ریخته شده است. در ادامه، هر لایه به مقدار مشخصی متراکم شده است، تا چگالی کل

جدول ۲. آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر.

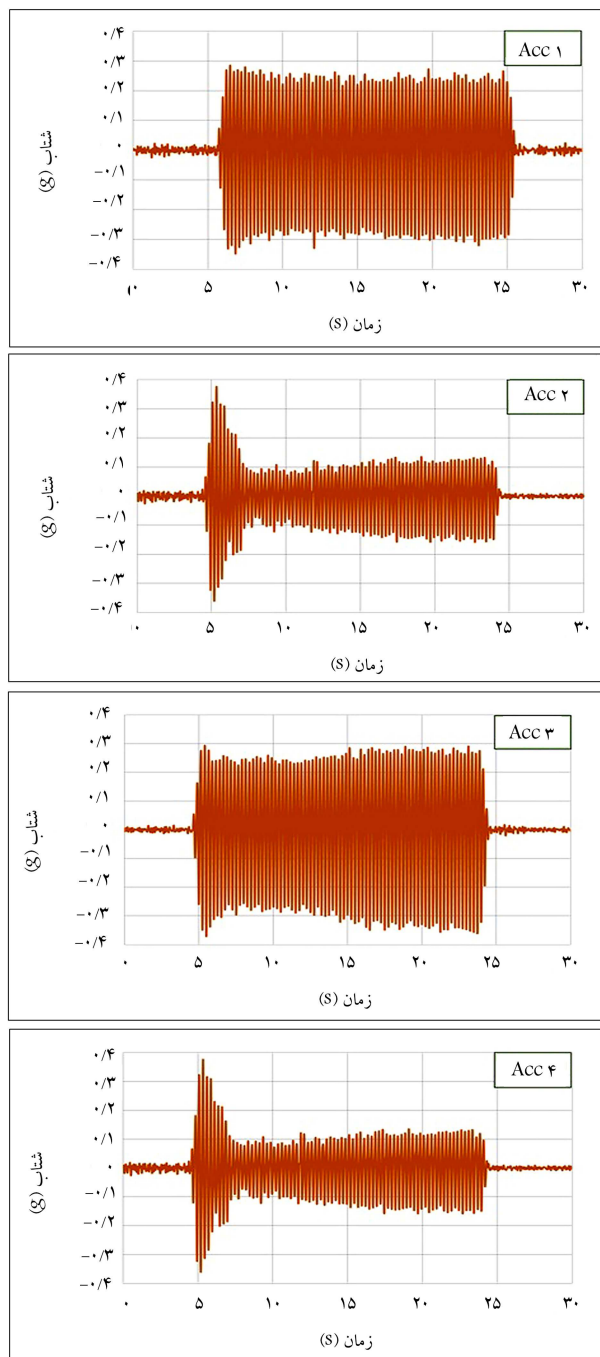
شماره‌ی آزمایش	شرح آزمایش	گروه A	گروه B
۱	ماسه با چگالی نسبی ۱۰٪	ماسه با چگالی نسبی ۱۰٪	ماسه با چگالی نسبی ۴۰٪
۲	ماسه با چگالی نسبی ۶۰٪	ماسه با چگالی نسبی ۶۰٪	ماسه با چگالی نسبی ۸۰٪
۳	ماسه با ۵٪ سیلت	ماسه با ۵٪ سیلت	ماسه با ۱۰٪ سیلت
۴	ماسه با ۱۵٪ سیلت	ماسه با ۱۵٪ سیلت	ماسه با ۲۰٪ سیلت



ب) تست شماره ۲. شکل ۴. نحوه‌ی مدل آزمایش‌ها.

۲.۷. تاریخچه‌ی زمانی فشار آب حفره‌یی

تولید و زائل شدن فشار آب حفره‌یی، یکی از معیارهای اصلی بررسی لرزه‌یی خاک‌های اشباع است. تاریخچه‌ی نسبت فشار آب حفره‌یی برای آزمایش‌های ۱ الی ۴، در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مشاهده می‌شود. مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است که با افزایش میزان چگالی نسبی، مقادیر نسبت فشار آب حفره‌یی (R_u) به‌طور محسوس‌ی کاهش پیدا می‌کند که نشانگر کاهش پتانسیل روانگرایی است. این امر آثار مؤثر تراکم خاک‌های روانگرا را با استفاده از روش‌هایی

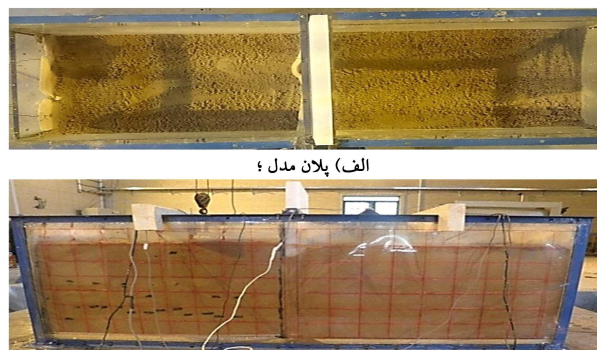


شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی شتاب‌سنج‌های واقع در خاک برای آزمایش ۱ (سمت راست: گروه A، سمت چپ: گروه B).

مشخص شود. البته تأثیر وزن لایه‌های فوقانی در افزایش میزان تراکم لایه‌ی تحتانی نیز در نظر گرفته شده است. برای تهیه و ساخت ماسه‌ی سیلت‌دار نیز ابتدا مقدار ماسه و سیلت موردنیاز به دقت محاسبه و وزن شدند. اختلاط ماسه و سیلت در حالت خشک و به‌صورت دستی انجام و سعی شده است که مخلوط کاملاً همگنی به‌دست آید. هنگام ساخت نمونه‌ها، برای مشاهده‌ی بهتر تغییرشکل‌ها در هر دو طرف، شبکه‌ی مربعی از ماسه‌ی رنگ شده در دیواره‌ی مدل اجرا شده است. پس از آماده‌سازی مدل‌ها برای هر آزمایش، زمان اشباع‌سازی و انجام آزمون‌ها فرا رسید. برای آنکه روند اشباع‌سازی نمونه‌ها به‌صورت سریع‌تر و صحیح‌تر انجام شود، پیش از آغاز اشباع‌سازی مدل‌ها، گاز دی‌اکسیدکربن با فشار کم از شیر ورودی پایین محفظه (آب و گاز) عبور داده شد. این کار باعث می‌شود تا فرایند اشباع‌سازی به‌طور دقیق‌تری صورت پذیرد. در ادامه، آب با دبی کم وارد نمونه‌ها شد. در این مرحله میزان فشار آب به‌گونه‌یی تنظیم شد که آب در مدل‌های دو طرف به آرامی و در حد تعیین شده بالا بیاید و با رسیدن آب به سطح موردنظر، شیر ورودی بسته می‌شود. اشباع کامل معمولاً حدود ۲ ساعت به‌طول می‌انجامد. به‌عنوان نمونه، پلان و نمای یک مدل ساخته شده قبل از انجام آزمایش در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

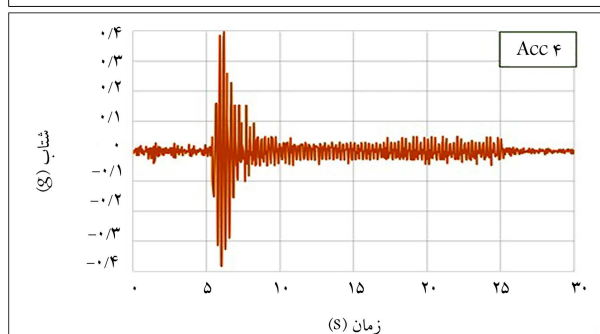
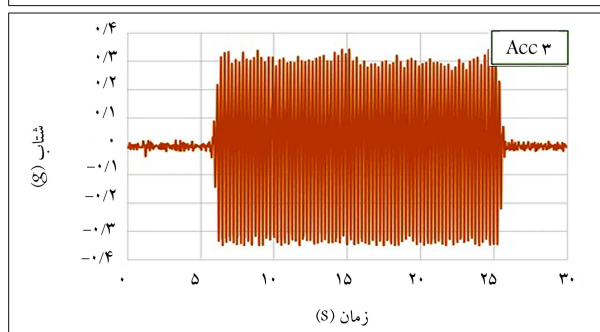
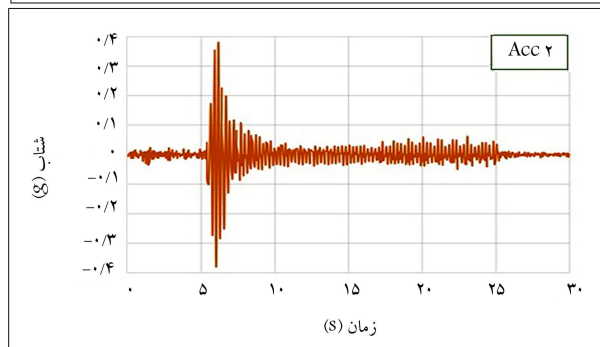
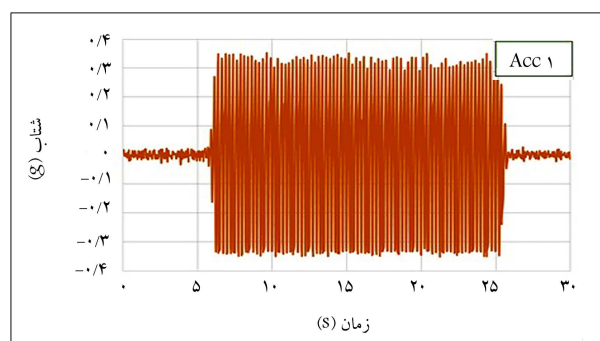
۱.۷. تاریخچه‌ی زمانی شتاب

همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه میز لرزه متعلق به دانشگاه ارومیه استفاده شده است که یک دستگاه کاملاً اتوماتیک است. شتاب ورودی حرکت میز در کلیه‌ی آزمایش‌ها ثابت و حدود $0.3g$ و بسامد آن تقریباً $4/7$ هرتز بوده است. در زمان انجام آزمون توسط نرم‌افزار نصب شده بر روی رایانه متصل به دستگاه، کلیه‌ی اطلاعات ورودی و خروجی ثبت و کنترل شده است. یکی از مزیت‌های مهم میز لرزه‌ی مذکور در قیاس با میز لرزه‌های دستی این است که امکان مقایسه‌ی کلیه‌ی مدل‌ها در شرایط کاملاً یکسان وجود دارد. در ادامه، تاریخچه‌ی زمانی شتاب برای شتاب‌سنج‌های واقع شده در خاک برای ۴ آزمایش انجام شده در پژوهش حاضر، در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل حاکی از آن است که دامنه‌ی شتاب هنگام عبور از خاک (از پایین به بالا) تشدید شده است. به بیان دیگر، شتاب‌سنج‌های واقع شده‌ی بالای مدل و در نزدیک سطح خاک نسبت به شتاب‌سنج‌های قرار گرفته در پایین، شتاب‌های بالاتری را نشان داده‌اند، اما هنگامی که در خاک روانگرایی رخ داده است (تمامی آزمایش‌ها به جز آزمایش ۲)، افزایش فشار آب حفره‌یی باعث کاهش مقاومت برشی خاک شده است و در نتیجه، دامنه‌ی شتاب کاهش یافته است.

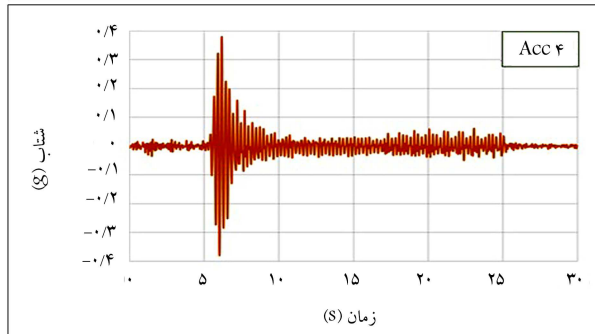
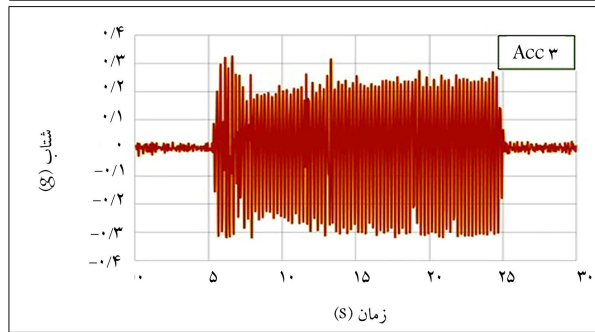
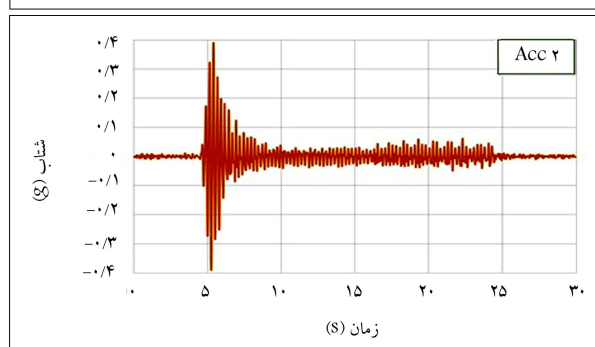
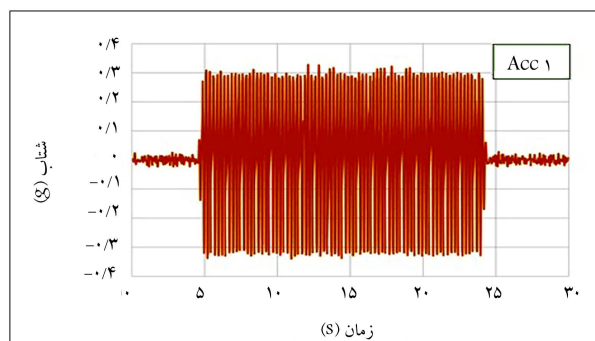


(ب) نمای مدل.

شکل ۵. نمونه‌یی از مدل قبل از آزمایش.



شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی شتاب‌سنج‌های واقع در خاک برای آزمایش ۳ (سمت راست: گروه A، سمت چپ: گروه B).



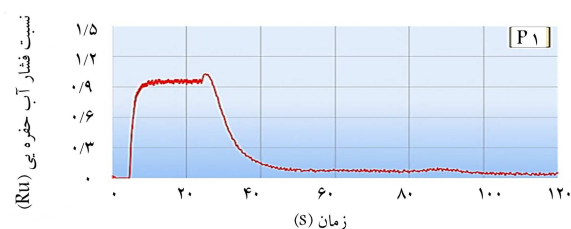
شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی شتاب‌سنج‌های واقع در خاک برای آزمایش ۲ (سمت راست: گروه A، سمت چپ: گروه B).

۳.۷. تاریخچه‌ی زمانی نشست

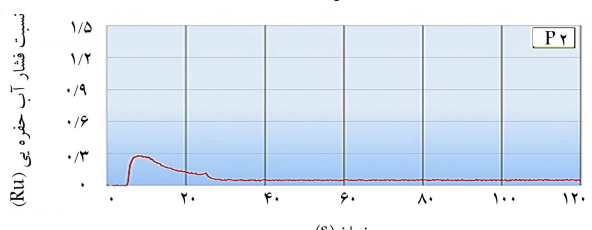
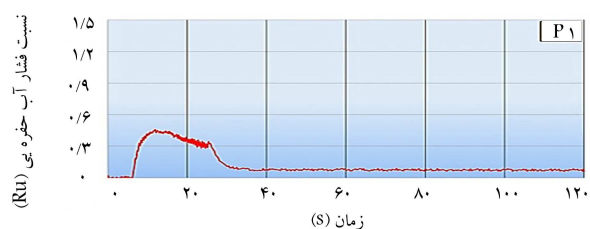
تاریخچه‌ی نشست برای آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر در شکل‌های ۱۴ الی ۱۷ مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشخص است، با افزایش میزان چگالی نسبی ماسه، مقادیر نشست سطحی به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. به‌علاوه با بررسی شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیلت، نشست سطحی کاهش پیدا کرده است. نتایج به‌دست آمده همچنین بیانگر آثار مثبت افزایش

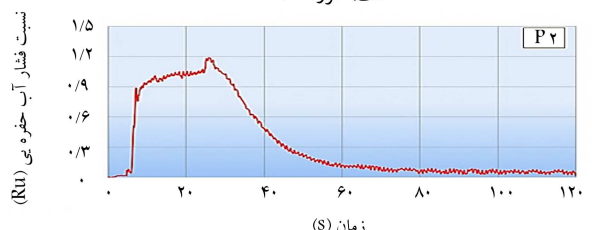
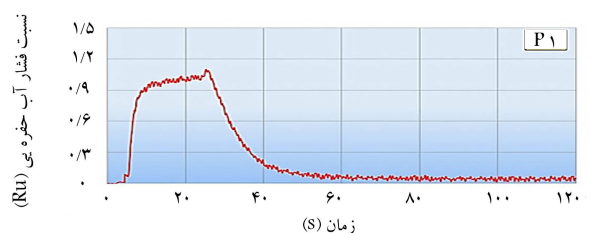
مانند تراکم دینامیکی به‌عنوان گزینه‌ی مناسب برای از بین بردن روانگرایی تأیید می‌کند. به‌علاوه با مشاهده‌ی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان دریافت که برای درصد‌های سیلت استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، با افزایش درصد سیلت، نسبت فشار آب حفره‌ی افزایش خواهد یافت که بیانگر افزایش پتانسیل روانگرایی است و احتمالاً به این دلیل است که ذرات سیلت در میان ذرات ماسه قرار می‌گیرند و باعث کم شدن اصطکاک میان آن‌ها می‌شوند (پدیده‌ی جداسازی اتفاق می‌افتد).



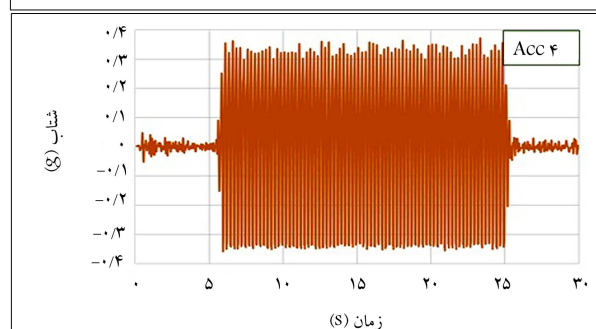
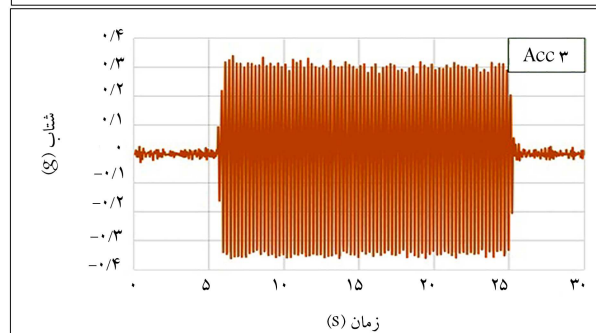
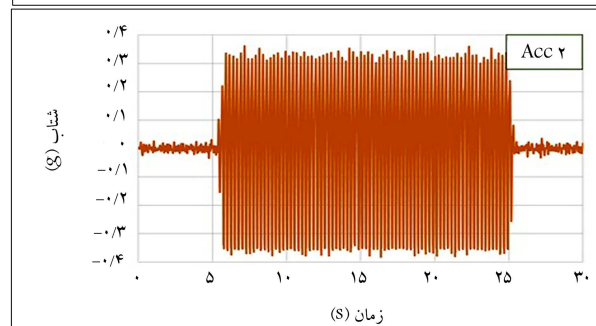
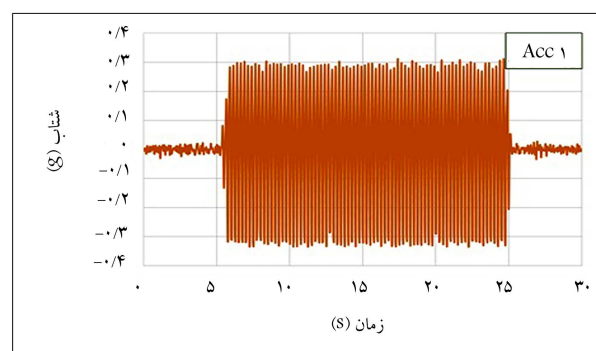
شکل ۱۰. تغییرات نسبت فشار آب حفره بی برای آزمایش ۱.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت فشار آب حفره بی برای آزمایش ۲.



شکل ۱۲. تغییرات نسبت فشار آب حفره بی برای آزمایش ۳.

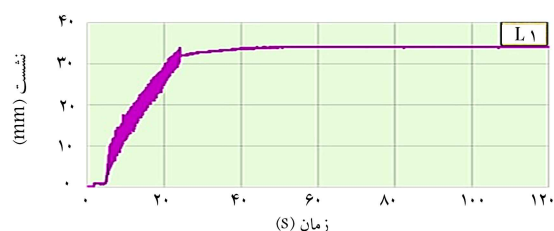


شکل ۹. تاریخچه ی زمانی شتاب سنج های واقع در خاک برای آزمایش ۴ (سمت راست: گروه A، سمت چپ: گروه B).

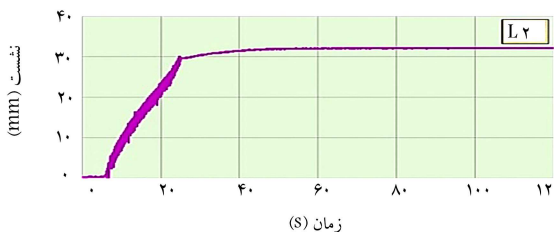
چگالی نسبی و میزان سیلت در محدود کردن نشست های حاصل از روانگرایی است.

۸. تغییر شکل های مدل

همان گونه که قبلاً بیان شد، در هنگام ساخت هر مدل، شبکه یی مربعی از ماسه ی رنگی در خاک و در جداری مخزن شفاف قرار داده شده است تا بتوان تغییر شکل های ایجاد شده در طول لرزش را بهتر مشاهده کرد. نتایج مشاهدات تمامی آزمایش ها

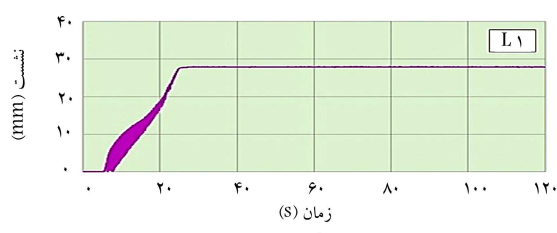


الف) گروه A؛

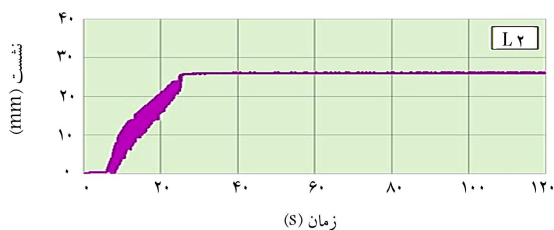


ب) گروه B.

شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای آزمایش ۳.



الف) گروه A؛



ب) گروه B.

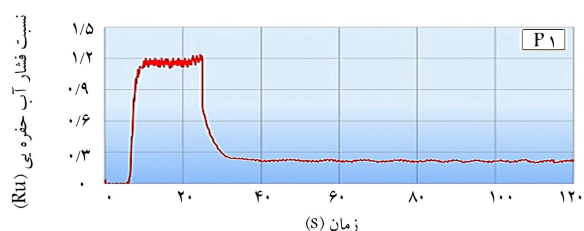
شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای آزمایش ۴.

نشان می‌دهند که تغییرشکل‌های به‌وجود آمده در حین لرزش در راستای قائم نسبت به راستای افقی بیشتر بوده است. به‌علاوه از بالا به سمت پایین نمونه، مقدار جابه‌جایی‌های قائم کاهش یافته است، به‌نحوی که در سطح، بیشترین جابه‌جایی در پایین نمونه، جابه‌جایی تقریباً صفر است. برای مثال، تغییرشکل یک مدل بعد از اعمال لرزش در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

۹. بحث

۱.۹. تاریخچه‌ی زمانی نسبت فشار آب حفره‌یی

برای مقایسه و درک بهتر، تاریخچه‌ی نسبت فشار آب حفره‌یی در آزمایش‌های مختلف در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. در مورد نقش پارامتر R_u (نسبت فشار آب حفره‌یی) در وقوع روانگرایی، قبلاً توضیحاتی در بخش ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۹ الف مشخص است، با زیاد شدن درصد چگالی نسبی ماسه، میزان نسبت فشار آب حفره‌یی کاهش یافته است. برای مثال، نسبت فشار آب حفره‌یی با

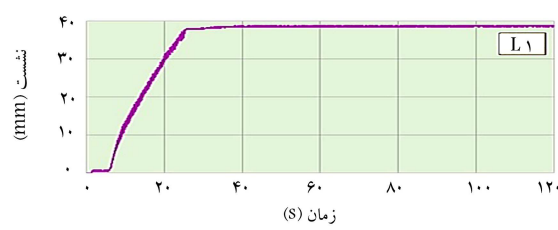


الف) گروه A؛

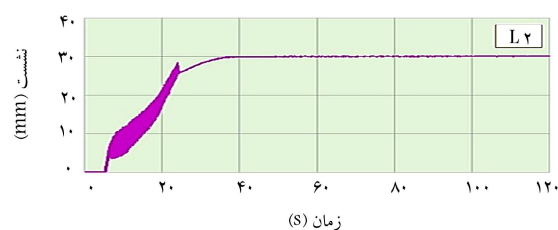


ب) گروه B.

شکل ۱۳. تغییرات نسبت فشار آب حفره‌یی برای آزمایش ۴.

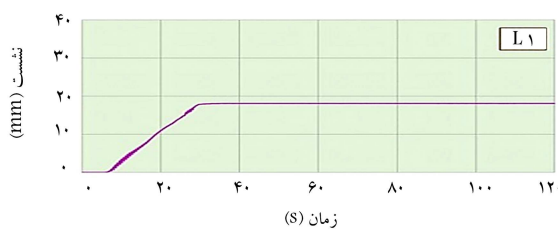


الف) گروه A؛

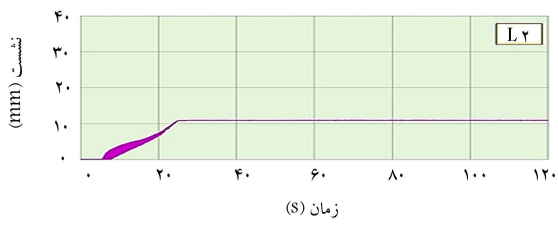


ب) گروه B.

شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای آزمایش ۱.

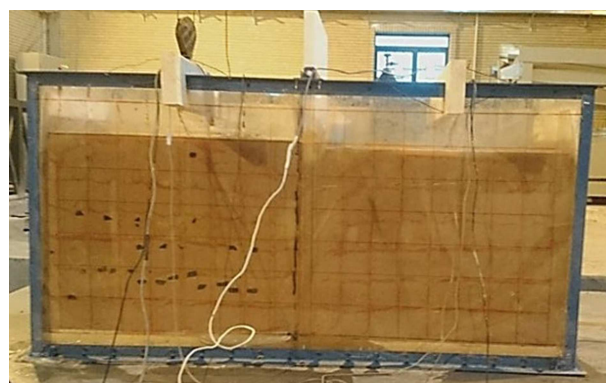
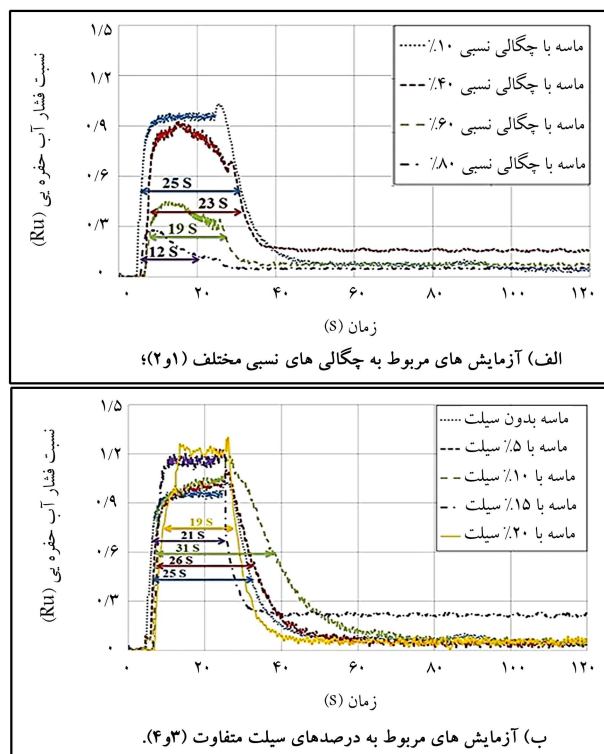


الف) گروه A؛

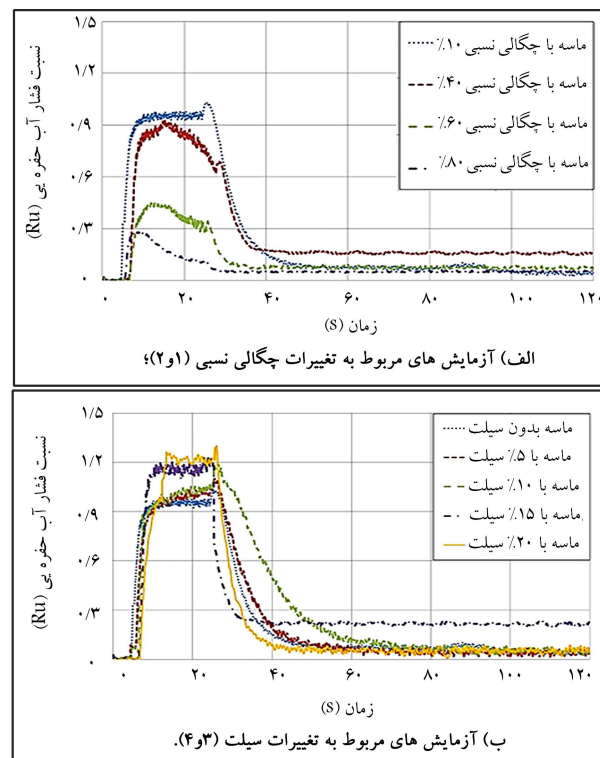


ب) گروه B.

شکل ۱۵. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای آزمایش ۲.



شکل ۱۸. تغییر شکل یک مدل پس از لرزش.



شکل ۲۰. مقادیر t_{half} برای آزمایش‌های مختلف انجام شده در پژوهش حاضر.

پدیده‌ی جداشدگی رخ می‌دهد که در نتیجه سبب می‌شوند تا فشار آب حفره‌ی افزایش پیدا کند. نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر با مطالعات پژوهشگران پیشین شباهت دارد، [۱۹، ۱۸، ۱۴، ۱۲] در حالی که با نتایج حاصل از برخی پژوهش‌های پیشین متفاوت است. [۲۱، ۱۷، ۱۶] حال با توجه به تناقض‌های موجود در مطالعات پیشین و نیز استفاده از دستگاه میز لرزه در پژوهش حاضر که در مقایسه با آزمایش‌هایی همچون سه‌محوری سیکلی یا برش حلقه‌ی سیکلی، یک آزمون بزرگ‌مقیاس محسوب می‌شود، نتایج به‌دست آمده می‌تواند مؤثر و مفید باشد. شایان ذکر است برای تهیه‌ی ماسه‌ی سیلت‌دار، همان‌طور که قبلاً بیان شد، از مخلوط کردن ماسه‌ی خیلی سست با درصد‌های متفاوت سیلت به‌عنوان ماسه‌ی تمیز (بدون سیلت) استفاده شده است. با توجه به اینکه در همه‌ی آزمایش‌ها، فشار آب حفره‌ی دقیقاً به مقادیر اولیه‌ی خود در پایان آزمایش بر نمی‌گردد، لذا برای در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای از بین رفتن فشار آب حفره‌ی و انجام مقایسه‌ی بهتر بین نتایج آزمون‌های مختلف، یک پارامتر شناخته شده به نام t_{half} (نیمه‌ی عمر فشار آب حفره‌ی) تعریف شده است. [۲۷] t_{half} مدت زمانی است که طول می‌کشد از نصف مقدار بیشینه‌ی خود قبل از نقطه‌ی بیشینه، به نصف مقدار بیشینه‌ی خود بعد از نقطه‌ی بیشینه برسد. وقتی که R_u به نصف مقدار بیشینه‌ی خود برسد، عملاً حالت روانگرایی از بین رفته است. در ادامه، مقدار t_{half} برای آزمایش‌های مختلف انجام شده در مطالعه‌ی حاضر، در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۲۰ الف مشخص است، با افزایش میزان چگالی نسبی، مقدار t_{half} به‌طور محسوسی کاهش پیدا کرده است و این بدین معنی است که با افزایش میزان چگالی نسبی، حالت روانگرایی خیلی زودتر از بین می‌رود. به‌علاوه همان‌طور که در شکل ۲۰ ب قابل مشاهده است، مقدار t_{half} با افزایش میزان سیلت، از روند واحدی پیروی نکرده است (ابتدا با افزایش میزان سیلت تا ۱۰٪ افزایش و سپس با زیاد شدن مقدار سیلت تا ۲۰٪ کاهش یافته است)، ولی در مجموع شاید

شکل ۱۹. تاریخچه‌ی نسبت فشار آب حفره‌ی آزمایش‌های مختلف پژوهش حاضر.

افزایش چگالی نسبی از ۱۰ به ۴۰ درصد (تبدیل ماسه‌ی خیلی سست به سست)، ۱۲٪ از ۱۰ به ۶۰ درصد (تغییر ماسه‌ی خیلی سست به نیمه متراکم)، و از ۱۰ به ۸۰ درصد (تبدیل ماسه‌ی خیلی سست به متراکم)، ۷۳٪ کاهش یافته است. که دلیل آن می‌تواند بهبود مشخصات مکانیکی خاک و متراکم شدن ذرات و افزایش اصطکاک بین آن‌ها باشد که اجازه‌ی افزایش فشار آب حفره‌ی را نمی‌دهد. به‌علاوه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با برخی مطالعات پیشین، از جمله: ویس کرمی و همکاران (۱۳۹۲) و حاکام (۲۰۱۶) مشابه هستند. [۱۱، ۹]

به‌علاوه از شکل ۱۹ ب می‌توان دریافت که با افزودن سیلت به ماسه، نسبت فشار آب حفره‌ی افزایش یافته است. برای مثال، نسبت فشار آب حفره‌ی با افزایش: ۵٪ سیلت، ۵٪ با ۱۰٪ سیلت، ۱۶٪ با ۱۵٪ سیلت، ۲۰٪ با ۲۰٪ سیلت، ۲۷٪ افزایش یافته است که نشانگر تأثیر منفی سیلت در پتانسیل روانگرایی است. که احتمالاً به این دلیل است که در درصد‌های پایین سیلت، ذرات ریزدانه‌ی غیرخمیری در بین دانه‌های ماسه قرار می‌گیرند و باعث کاهش اصطکاک بین آن‌ها می‌شوند

میزان ۱۸٪؛ با افزودن ۱۵٪ سیلت، به میزان ۲۸٪ و با افزایش ۲۰٪ سیلت، به میزان ۳۳٪ کاهش یافته است. که می‌تواند به این دلیل باشد که ذرات سیلت در میان دانه‌های ماسه قرار می‌گیرند و اجازه‌ی جابه‌جایی کافی و تغییر شکل لازم را به آن‌ها نمی‌دهند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر با مطالعه‌ی انجام شده توسط ویس کرمی و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۱] شباهت دارد. همچنین در بیشتر آزمایش‌ها با افزایش میزان چگالی نسبی و سیلت، زمان رسیدن به مقادیر نشست بیشینه به تأخیر افتاده است (نشست بیشینه در مدت زمان طولانی‌تری رخ داده است).

۱۰. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر چگالی نسبی و میزان سیلت در پتانسیل روانگرایی و نشست ماسه‌ی اشباع با استفاده از میز لرزه بررسی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

— در نمونه‌های با درصد‌های پایین، چگالی نسبی روانگرایی رخ داده است (مقدار R_u بزرگ‌تر از ۰٫۹)^(۵)، اما با افزایش میزان چگالی نسبی، مقدار R_u کاهش یافته و حتی در بعضی از آزمایش‌ها نیز روانگرایی کاملاً از بین رفته است.

— با زیاد شدن میزان چگالی نسبی، مقادیر نشست سطحی به‌طور قابل ملاحظه‌یی کم شده است که نشان دهنده‌ی تأثیر مثبت افزایش چگالی نسبی در محدود ساختن نشست‌های سطحی است.

— آثار مثبت تراکم خاک‌های روانگرا با استفاده از روش‌هایی همچون تراکم دینامیکی به‌عنوان گزینه‌ی مناسب برای از بین بردن روانگرایی و آثار ناشی از آن تأیید می‌شود.

— با افزایش میزان سیلت، نسبت فشار آب حفره‌یی افزایش پیدا کرده است که بیانگر افزایش پتانسیل روانگرایی است.

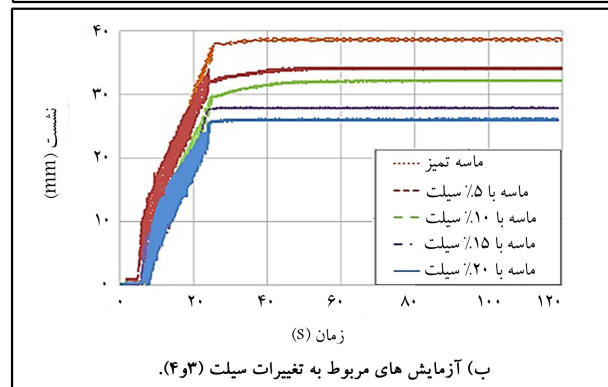
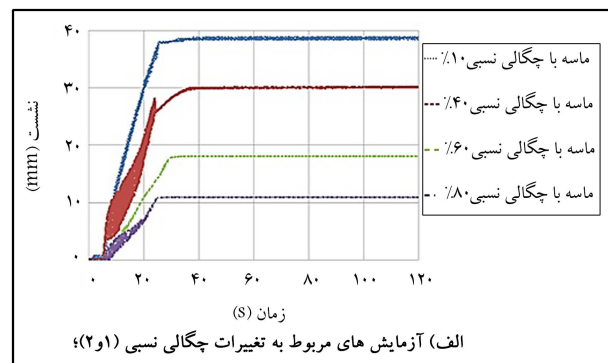
— با زیاد شدن میزان چگالی نسبی و درصد سیلت، مقادیر نشست سطحی به‌طور چشمگیری کاهش یافته است که بیانگر آثار مفید افزایش چگالی نسبی و میزان سیلت در محدود ساختن نشست‌های حاصل از روانگرایی است.

— با افزایش میزان چگالی نسبی، مقدار (t_{half} نیمه‌ی عمر فشار آب حفره‌یی) کاهش پیدا کرده است که نشان می‌دهد با افزایش میزان چگالی نسبی، حالت روانگرایی خیلی زودتر از بین خواهد رفت.

— در درصد‌های سیلت بالا، حالت روانگرایی سریع‌تر از بین می‌رود.

— با اضافه کردن مقادیر چگالی نسبی و سیلت، در بیشتر آزمایش‌ها زمان رسیدن به مقادیر نشست بیشینه به تأخیر می‌افتد.

— تغییر شکل‌های ایجاد شده در طول لرزش، در جهت قائم نسبت به جهت افقی بیشتر است. همچنین تغییر شکل‌های مذکور به‌نحوی هستند که در سطح نمونه، بیشترین و در پایین نمونه، کمترین تغییر شکل رخ می‌دهد.



شکل ۲۱. تاریخچه‌ی زمانی نشست آزمایش‌های مختلف انجام شده در پژوهش حاضر.

بتوان این‌گونه نتیجه گرفت که در درصد‌های سیلت بالا، حالت روانگرایی سریع‌تر از بین می‌رود.

۲.۹. تاریخچه‌ی زمانی نشست

به منظور درک بهتر و مقایسه، تاریخچه‌ی زمانی نشست در آزمایش‌های مختلف انجام شده در پژوهش حاضر در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود. با مشاهده‌ی شکل ۲۱ الف می‌توان دریافت که با افزایش میزان چگالی نسبی ماسه، مقدار نشست سطحی به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. برای مثال، میزان نشست با افزایش چگالی نسبی: از ۱۰ به ۴۰ درصد، ۲۳٪؛ از ۱۰ به ۶۰ درصد، ۵۴٪؛ و از ۱۰ به ۸۰ درصد، ۷۱٪ کاهش یافته است؛ که این امر بیانگر تأثیر مثبت افزایش چگالی نسبی در محدود ساختن نشست‌های سطحی است.

به علاوه همان‌گونه که از شکل ۲۱ ب مشخص است، با اضافه کردن سیلت به نمونه‌ها، مقدار نشست سطحی به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش یافته است، به‌طوری که با افزودن ۵٪ سیلت، به میزان ۱۰٪؛ با افزودن ۱۰٪ سیلت، به

2. cyclic resistance ratio
3. Toyora
4. Sengenyama

پانوشته‌ها

1. cyclic stress ratio

منابع (References)

1. Port and Harbour Research Institute., *Hand Book on Liquefaction Remediation of Reclaimd Land*, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, USA, A.A. Balkema Publishers (1997).
2. Hwang, J.H. and Yang, C.W. "A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(10), pp. 761-770 (2004).
3. Baziar, M.H and Jafarian, Y. "Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: Capacity energy", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **12**(27), pp. 1072-1056 (2007).
4. Bagheripour, M.H., Shooshpasha, I. and Afzalirad, M. "A genetic algorithm approach for assessing soil liquefaction potential based on reliability method", *Journal of Earth Sciences Systems*, **121**(1), pp. 45-62 (2012).
5. Bayati, H. and Bagheripour, M.H. "Shaking table study on liquefaction behaviour of different saturated sands reinforced by stone columns", *Marine Georesources and Geotechnology Journal*, **37**(12), pp. 1-15 (2018).
6. Baziar, M.H., Jafarian, Y., Shahnazari, H. and Tuntchian, M.A. "Prediction of strain energy-based liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An evolutionary approach", *Computers & Geosciences*, **37**(11), pp. 1893-1883 (2011).
7. Kim, J., Kazama, M. and Kwon, Y. "Effects of relative density and accumulated shear strain on post-liquefaction residual deformation", *Natural Hazards and Earth System Sciences, Sci.*, **13**, pp. 2567-2577 (2013).
8. Ecemis, N., Demirci, H.E. and Karaman, M. "Effects of relative density and coefficient of consolidation on re-liquefaction potential of sand", *2ed European Conference on Earthquake Engineering and Sesimology*, Istanbul, pp. 1669-1678 (2014).
9. Hakam, A. "Laboratory liquefaction test of sand based on grain size and relative density", *Journal of Engineering and Science Technology*, **48**(3), pp. 334-344 (2016).
10. Rouholamin, M., Bhattacharya, S. and Orense, R. "Effect of initial relative density on the post-liquefaction behaviour of sand", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **97**, pp. 25-36 (2017).
11. Weis Karami, M., Ghorbani, A., Nemati Mersa, A. and et al. "Designing and manufacturing of transparent shear machine and shake table for physical modeling of cyclic pore water in Anzali sand", *1st National Conference on Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering*, University of Mohaghegh Ardebili (2013).
12. Amini, F. and Qi, G. "Liquefaction testing of stratified silty sands", *J. geotech. and Geoenvir. Engrg., ASCE*, **126**(3), pp. 208-217 (2000).
13. Marques, F., Santos, J.A. and Gomes, R.C. "Coimbra sand-influence of non-plastic fines In liquefaction resistance", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal (24-28 Sep., 2012).
14. Mominul, H.M., Alam, M.J., Ansary, M.A. and et al. "Dynamic properties and liquefaction potential of a sandy soil containing silt", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris (2013).
15. Chen, Ch., Lee, W., Chen, J. and et al. "Liquefaction potenial of non-plastic silty sand", *Journal of Marine Science and Technology*, **22**(2), pp. 137-145 (2014).
16. Takch, A.El., Sadrekarimi, A. and El Naggar, M.H. "Liquefaction behavior of silt and sandy silts from cyclic ring shear tests", *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand (1-4 Nov., 2015).
17. Ahmad Khan, A., Khan, M.Z. and Bilal Khan, M. "Effect of Fines on Liquefaction Resistance in Fine Sand and silty sand", *International Journal of Engineering Research and Applications*, **6**(1), pp. 102-106 (2016).
18. Ku, Ch.Sh., Lee, D.H., Bai, M.S. and et al. "Effect of the different fines content definition on liquefaction resistance", *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Greece (2016).
19. Maleki, M. and Taheriniya, S. "Investigating the effect of physical parameters on liquefaction resistance of mixed sands with cohesionless fines", *9th International Congress of Civil Engineering*, Isfahan University of Technology (2013).
20. Celataneh, H. and Ganalizadeh, A. "Effect of non-plasticity fine-grained on undrained liquefaction resistance of sand under homogeneous conditions: Case study of babolsar and firoozkooh sands", *1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran (2014).
21. Ghorbani, A. and Nejad Moghadam, M. "The Effect of non-pasteurized fine grains on the resistance of anzali sand using shake table", *2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Faculty of Civil Engineering, Qom University of Technology (2015).
22. Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes", *Proceeding of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, University of California, Berkeley, 26(2), pp.115-130 (7-9 Jan., 2004).
23. Dobery, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y. and et al. "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquake by the cyclic strain method", *NBS Building Science, Series 138* (1982).
24. Yang, E.K., Choi, J.I., Kwon, S.Y. and Kim, M.M. "Development of dynamic p-y backbone curves for a single in dense sand by 1g shaking table tests", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **15**(5), pp. 813-821 (2011).
25. Bhattacharya, S., Lombardi, D., Dihoru, L. and et al. "Model container design for soil-structure interaction

- studies", *Role Seism Test Facil Perform Based Earthquake Engineering Springer Series Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, **22**, pp. 135-158 (2011).
26. Naeemifar, O. and Yasrebi, S.Sh, "Effect of the percentage and PI of clay on the surface profile of clay sand", *Journal of Civil and Surveying Engineering, Faculty of Engineering*, **45**(6), pp. 721-733 (2011).
27. Kluge, K. "Soil liquefaction around offshore pile foundations- scale model investigations", PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Florence (2008).