

## نگاهی دقیق‌تر به تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای - سیلتی

سامان راحت دهمرده (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری عمران - زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب،

saman.dahmarde@yahoo.com

آرش رزمخواه، استادیار، عضو هیئت‌علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

**چکیده:** طبق آخرین نتایج گزارش شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) در خصوص ویژگی‌های ژئوتکنیکی آبرفت‌های کلان‌شهر تهران، بخش عمده‌ای از نواحی جنوب تهران توسط ریزدانه‌ها (سیلت و رس) پوشیده شده و همچنین سطح آب‌های زیرزمینی در این مناطق بالاتر از سایر نواحی می‌باشد که احتمال وقوع پدیده‌ی روانگرایی را در حین زلزله برجسته‌تر می‌نماید. در چند دهه‌ی گذشته اکثر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی مفهوم روانگرایی و تعیین مقاومت چرخه‌ای، بر روی خاک‌های ماسه‌ای متمرکز شده درحالی‌که در طبیعت خاک‌های مخلوط ماسه‌ای - سیلتی بیشتر از خاک‌های ماسه و سیلت خالص یافت می‌شوند. از طرفی ارزیابی نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای سیلتی نشان‌دهنده‌ی تناقض در پاسخ مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف ریزدانه‌ها در برابر بارگذاری‌های چرخه‌ای می‌باشد. در این مقاله سعی شده با مروری دقیق‌تر بر جدیدترین مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط پژوهشگران و جمع‌آوری و پردازش داده‌های آنها، تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت روانگرایی مورد ارزیابی قرار گیرد و رابطه‌ی منطقی جهت تعیین مقاومت چرخه‌ای ارائه شود. رابطه‌ی استخراج شده کاهش مقاومت را با افزایش ریزدانه‌ها نشان می‌دهد. بررسی برخی از نتایج نیز این موضوع را بیان می‌کند که محتوای ۳۰ درصد سیلت حد آستانه‌ای برای رفتار روانگرایی ماسه‌های سیلتی می‌باشد و برای مواردی که محتوای ریزدانه‌ها کمتر از حد آستانه باشد، افزایش در محتوای ریزدانه منجر به کاهش مقاومت چرخه‌ای می‌شود؛ اما برای مقادیر بیشتر از حد آستانه‌ی مقاومت چرخه‌ای کم‌وبیش روندی ثابت یا افزایشی را دارا می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** روانگرایی، مقاومت چرخه‌ای، زلزله، ماسه، سیلت، ریزدانه، فشار آب منفذی

### ۱- مقدمه

بارهای مونوتونیک، چرخه‌ای و یا دینامیکی کاهش می‌یابد به‌وقوع می‌پیوندد [۱-۲]. روانگرایی بیشتر در نهشته‌های خاکی اشباع که شرایط زهکشی مناسب را ندارند با ایجاد سریع اضافه فشار آب منفذی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی روانگرایی ممکن است در حالات مختلفی نظیر گسیختگی جریانی، گسترش‌های جانبی و یا روانگرایی‌های سطحی

وقوع پدیده‌ی روانگرایی یکی از مخاطرات اصلی در اثر زمین‌لرزه‌های قوی می‌باشد. در چهار دهه‌ی اخیر و به‌خصوص پس از وقوع زلزله‌های بزرگ و مخرب نیگاتای ژاپن و آلاسکا بررسی روانگرایی موضوع مورد علاقه محققین رشته ژئوتکنیک لرزه‌ای و زلزله بوده است. پدیده‌ی روانگرایی هنگامی‌که مقاومت برشی خاک در اثر اعمال

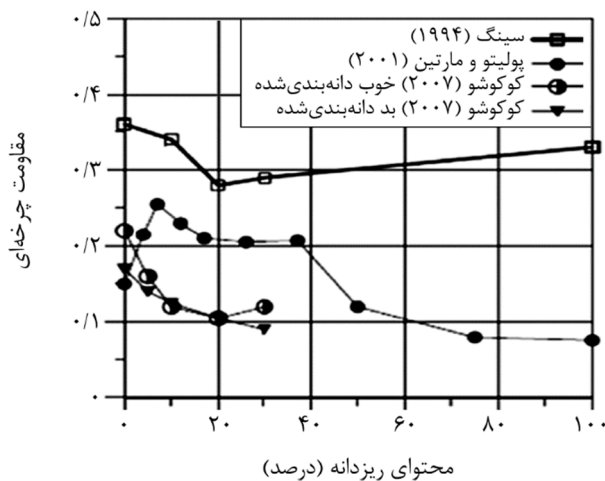
اتفاق بیافتد [۳-۵]. به‌وسیله‌ی مقاومت روانگرایی (مقاومت چرخه‌ای) می‌توان امکان وقوع روانگرایی در یک ساختگاه تحت اثر شتاب ناشی از زلزله را سنجید [۶-۸]. مقاومت چرخه‌ای ماسه‌ها به‌صورت گسترده‌ای به‌صورت آزمایشگاهی و تجربی به‌خصوص با استفاده از دستگاه سه محوری به‌صورت تنش ساده و تنش پیچشی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت چرخه‌ای ماسه‌ها نسبت تخلخل، تنش تحکیمی و محتوای ریزدانه‌ها می‌باشند [۹]. تعداد زیادی از آزمایش‌ها بر روی ماسه‌های توئورا، اوتاوا و مونتری انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان داده که با کاهش نسبت تخلخل، مقاومت روانگرایی افزایش قابل توجهی داشته است [۸، ۱۰، ۱۱]. تأثیر تنش تحکیمی نیز روی مقاومت چرخه‌ای توسط پژوهشگران این رشته مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این‌گونه بیان می‌کند که با افزایش تنش تحکیمی مقاومت چرخه‌ای کاهش می‌یابد [۱۲-۱۳].

در نواحی شمالی شهر تهران، نهشته‌های رسوبی اغلب از گروه قلوه‌سنگ‌ها و رسوبات درشت‌دانه‌ی شنی تشکیل شده است، اما در نواحی جنوبی تهران (پایین‌تر از خیابان جمهوری) اجزای تشکیل‌دهنده‌ی نهشته‌های خاکی اغلب ریزدانه‌ها (سیلت و رس) می‌باشند. این رسوبات ریزدانه به‌استثنای بخش‌هایی حوالی بزرگراه و پارک بعثت که دارای خاک‌های رسی با شاخص خمیری بالا (CH) می‌باشد در سایر مناطق جنوبی از شاخص خمیری و حد روانی پایینی (ML-CL، ML و CL) برخوردار می‌باشند [۱۴]. ارزیابی نقشه‌های هم‌ژرف آب‌های زیرزمینی تغییرات در سطوح آب زیرزمینی در نواحی مختلف تهران را نمایان می‌سازد. در حالت عمومی ژرفای سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی از سمت شمال به جنوب تهران کاهش پیدا می‌کند. چنین وضعیتی به‌دلیل نبود شبکه‌ی جمع‌آوری فاضلاب‌های شهری و در نتیجه‌ی تزریق پساب‌ها به منابع آب‌های زیرسطحی و همچنین به علت روند هیدرولوژیکی حاکم بر

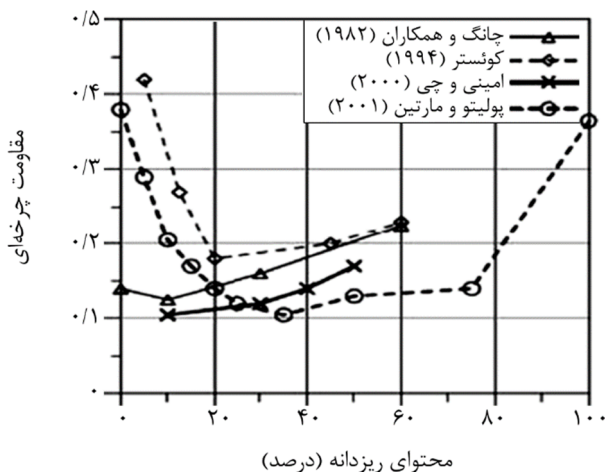
جریانات آب‌های زیرسطحی، طبیعی است. در حالت طبیعی شیب هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی از شمال به جنوب بوده و به همین دلیل و به سبب کاهش ارتفاع در نواحی جنوبی، بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق جنوبی نسبت به مناطق شمالی طبیعی می‌باشد [۱۵].

با توجه به وجود نهشته‌های ریزدانه در بخش قابل توجهی از نواحی جنوبی تهران و همچنین بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی در این نواحی، بررسی مقاومت چرخه‌ای خاک‌های حاوی ریزدانه ضرورت ویژه‌ای دارد. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی بررسی تأثیر محتوای ریزدانه‌ها (ذرات با قطر کوچک‌تر از ۰/۰۷۴ میلی‌متر) بر مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای یا ماسه‌های سیلتی نتایج متناقض و متضادی را نشان داده‌اند. برخی از محققان بیان کردند که افزایش محتوای ریزدانه‌ها موجب افزایش مقاومت روانگرایی می‌شود [۱۶-۱۸]، درحالی‌که محققان دیگر نظری متفاوت دارند و این‌گونه نتیجه‌گیری کرده‌اند که در نسبت تخلخل یکسان، افزایش ریزدانه‌ها باعث کاهش مقاومت روانگرایی تا میزان ۳۰ درصدی ریزدانه می‌شود [۱۹-۲۷]. علاوه بر این اکثر مطالعات و آزمایش‌های در محل، نشان می‌دهد حضور ریزدانه‌ها باعث افزایش مقاومت روانگرایی می‌شوند [۷]. از طرفی تخمین صحیح مقاومت روانگرایی در شرایط زهکشی نشده برای طراحی ایمن سازه‌های عظیم نظیر سدهای خاکی و سدهای باطله و همچنین شالوده‌ی ساختمان‌ها جهت محافظت و جلوگیری از آسیب‌دیدگی آنها در برابر گسیختگی‌های ناشی از روانگرایی ضروری است [۵]. برای رسیدن به این مهم و افزایش توان تصمیم‌گیری مناسب در مورد رفتار خاک‌ها در برابر روانگرایی، در این مقاله سعی شده با مروری دقیق‌تر بر جدیدترین کارهای آزمایشگاهی انجام شده در زمینه‌ی تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای-سیلتی و ارزیابی نتایج آنها، بتوان پارامترهای مؤثر در مقاومت روانگرایی را به نحو واقع-گرایانه‌تری درک و تفسیر نمود. همچنین، در این مطالعه

مارتین [۳۷] که در شکل (۱) آورده شده، در ابتدا تا رسیدن به محتوای ۱۰ درصدی ریزدانه‌ها مقاومت چرخه‌ای افزایش یافته و پس از آن کم‌کم روند نزولی مقاومت چرخه‌ای قابل مشاهده می‌باشد و در فاصله‌ی ۲۰ تا ۴۰ درصدی مقاومت چرخه‌ای حالت پایداری را طی می‌کند و بعد از آن دچار افت شدید می‌شود. در تحقیقات دیگر داش و سیتارام [۳۸] افزایش مقاومت چرخه‌ای را تا ۵ درصد محتوای ریزدانه گزارش دادند و بیان نمودند که با اضافه شدن ریزدانه‌ها بیش از مقدار ۵ درصد مقاومت به‌صورت شدیدی کاهش می‌یابد. پژوهشگران مختلفی نظیر شن و همکاران [۳۹]، کوئربیس و همکاران [۴۰]، واید [۴۱]



شکل (۱): مقایسه‌ی نتایج مطالعات محققان پیشین در تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای در تراکم نسبی ثابت [۴۷].



شکل (۲): مقایسه‌ی نتایج مطالعات محققان پیشین در تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای در نسبت تخلخل کلی ثابت [۴۷].

رابطه‌ای منطقی جهت تعیین مقاومت چرخه‌ای (CRR) خاک‌های حاوی ریزدانه بر اساس پردازش داده‌های جمع‌آوری شده به روش رگرسیون خطی ارائه شده است.

## ۲- مروری بر تحقیقات گذشته

کلمه‌ی روانگرایی ابتدا توسط کوبو و مोगامی ابداع شد [۳]. از مطالعه‌های پیشگام انجام شده در زمینه‌ی روانگرایی می‌توان به تحقیقات سید و همکارانش [۷، ۱۶، ۲۸، ۲۹] اشاره نمود که رفتار متفاوت ساختگاه‌های حاوی ماسه-های سیلتی را نسبت به مناطق حاوی ماسه‌ی تمیز بیان کرده‌اند. این مشاهدات توسط محققین دیگر نیز تأیید شده است [۲۷، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳]. اکثر مطالعات پیشین بر روی روانگرایی ماسه‌های تمیز با ایده‌ی در نظر گرفتن تأثیر ریزدانه‌ها در مقاومت چرخه‌ای و میزان توسعه‌ی فشار آب منفذی بوده است. کیشیدا [۳۴] در سال ۱۹۶۹ روانگرایی خاک‌هایی با محتوای ۷۰ درصدی ریزدانه‌ها و با محتوای ۱۰ درصدی رس را در طول زلزله‌های توهانوکوی و فوکویی گزارش کرده است. توهنو و یاسودا [۳۵] بیان داشتند که در حین زلزله‌ی توکاجی-اوکای سال ۱۹۶۸ خاک‌های حاوی ۹۰ درصد ریزدانه و ۱۸ درصد رس دچار روانگرایی شده‌اند. سید و همکاران [۲۹] این‌گونه پیشنهاد داده‌اند که تأثیر ریزدانه‌ها در خاک‌های ماسه‌ای در مقادیر کمتر از ۵ درصد قابل صرف‌نظر می‌باشد، اما برای مقادیر بیشتر از ۵ درصد پتانسیل روانگرایی کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۱) و (۲) تأثیر محتوای ریزدانه در مقاومت چرخه‌ای طبق مطالعات محققین مختلف در سال‌های اخیر با توجه به پارامترهای تراکم نسبی و نسبت تخلخل قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۱) دیده می‌شود سینگ [۳۶] کاهش مقاومت چرخه‌ای را در تراکم نسبی ثابت گزارش نمود. وی در تحقیقاتش بیان نمود که ماسه‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و یا ۳۰ درصد ریزدانه مقاومت روانگرایی کمتری نسبت به ماسه‌ی تمیز را دارا می‌باشند. درحالی‌که طبق نتایج مطالعات پولیتو و

که توسط ایمدال کریم و جهانگیر عالم [۴۷] در سال ۲۰۱۴، بازیار و شرفی [۴۸] در سال ۲۰۱۱ و استاماتوپولوس [۹] در سال ۲۰۱۰ انجام شده، به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش‌های بعدی این مقاله‌ی مروری، مواد و مصالح خاکی به کار رفته در آزمایش‌ها، برنامه‌ی آزمایشگاهی و نتایج ارائه شده و در انتها نتیجه‌گیری نهایی آورده شده است.

### ۳- برنامه‌ی آزمایشگاهی

#### ۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

ایمدال کریم و جهانگیر عالم [۴۷] از ماسه‌های ریز و سیلت‌هایی که از محدوده‌های ماسه‌ای رودخانه پادما، ماوا، مونشیگانج، بنگلادش در نزدیکی پل پادما جمع‌آوری شده، استفاده کرده‌اند. در این تحقیق ماسه و سیلت در گرمخانه خشک شده و سپس آنها جهت ایجاد ماسه و سیلت تمیز توسط الک‌هایی با سایز ۷۵ میکرومتر غربال شده‌اند. تصاویر الکترومیکروسکوپی (SEM) ماسه‌ها و سیلت‌های مصرفی به وضوح آشکار ساخته‌اند که ذرات دارای شکل گوشه‌دار و زبر می‌باشند. بازیار و شرفی [۴۸] نیز از خاک‌های شهر فیروزکوه در ایران جهت کاربرد در آزمایش‌ها استفاده کرده‌اند. سیلت فیروزکوه دارای رنگی زرد متمایل به طلایی و حاوی ذرات شکسته و خرد شده می‌باشد. مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهد که ماسه‌های انتخابی حاوی کم‌وبیش ۶۰ درصد ذرات خرد شده و ۴۰ درصد ذرات گرد گوشه می‌باشند. در برنامه‌ی آزمایشگاهی انجام شده توسط استاماتوپولوس [۹] مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع ماسه‌های طبیعی حاصل از کوارتز بیابان‌های مصر (گرد، شفاف و بدون رنگ) می‌باشند. سیلت‌های غیرپلاستیک نیز از آسیاب نهشته‌های طبیعی کوارتز منطقه آسیرو نزدیک تسالونیک یونان به دست آمده‌اند.

مخلوط ماسه و سیلت با اضافه کردن سیلت‌های غیرپلاستیک در درصدهای مختلف به ماسه‌ی تمیز و اختلاط

و همچنین ژناکی و آتاناسوپولوس [۲۶] به طرز مشابهی در نسبت تخلخل ثابت، افزایش مقاومت چرخه‌ای را با افزایش محتوای ریزدانه‌ها گزارش کرده‌اند. درحالی‌که برخی دیگر از محققان مانند فین و همکاران [۴۲] و پولیتو و مارتین [۳۷] روندی ثابت را گزارش نموده‌اند. چانگ و یه [۴۳] معتقد بودند که ماسه‌ها با افزایش ریزدانه‌ها میل به افزایش مقاومت چرخه‌ای دارند. آنها بیان کردند که این افزایش تا میزان ۱۰ درصد ریزدانه آشکار و واضح نیست و پس از آن تا محتوای ۳۰ درصد ریزدانه افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت چرخه‌ای دیده می‌شود. ترونکوسو [۴۴] با استفاده از نتایج آزمایش‌های ۳ محوری چرخه‌ای نشان داد که ماسه‌های سیلته‌ی دارای ۱۵ درصد ریزدانه تنها نیمی از مقاومت روانگرایی ماسه تمیز را به دست می‌آورد. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات ارتن و ماهر [۴۵] اشاره نمود که نشان دادند فشار آب منفذی تولید شده در ماسه‌های حاوی ریزدانه تا محتوای ۳۰ درصدی افزایش می‌یابد در شرایطی که نسبت تخلخل یکسان باشد. امینی و چی [۳۱] در نتیجه‌گیری از مطالعه‌ی جامع بیان داشتند که با افزایش فشار محصورکنندگی مقاومت روانگرایی ماسه‌های سیلته‌ی کاهش می‌یابد ولیکن مقاومت روانگرایی با افزایش در محتوای سیلت‌ها در تخلخل ثابت افزایش را نشان می‌دهد. کوکوشو [۴۶] با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری تنش کنترل تأثیر محتوای ریزدانه‌ها تا مقدار ۳۰ درصد روی مقاومت چرخه‌ای را بررسی کرده و این‌گونه گزارش نموده که با افزایش ریزدانه‌ها تا ۱۰ درصد موجب کاهش مقاومت چرخه‌ای می‌شود. ارزیابی‌ی اجمالی تحقیقات انجام شده نشان‌دهنده‌ی تناقض در نتایج به‌دست‌آمده در زمینه‌ی تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای می‌باشد. هدف اصلی این مقاله‌ی مروری، واکاوی این مسئله و رسیدن به پاسخی قابل‌اعتماد جهت کاربرد مهندسی است. برای دستیابی به این هدف و به‌منظور ارزیابی تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای کارهای آزمایشگاهی مستقلی

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش

#### ۳-۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش‌های آزمایشگاهی

##### انجام شده توسط ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷]

نمونه‌های خاک استفاده شده در این پژوهش دارای قطر ۷۱ و ارتفاع ۱۴۲ میلی‌متری هستند که به‌وسیله روش کوبش مرطوب درون قالب‌های مربوطه متراکم شده‌اند. جهت ایجاد تراکم، ابتدا خاک خشک با ۱۰ درصد آب مخلوط شده و سپس با استفاده از ضربات چکشی ۱ کیلوگرمی که از ارتفاع ۶ اینچی (۱۵/۲۴ سانتی‌متر) بر روی لایه‌های مختلف رها گردیده، آن قدر کوبیده شده‌اند که نمونه‌های خاک به میزان تراکم لازم رسیده است. پس از آماده‌سازی و شکل‌گیری نمونه‌ها درصد اشباع نمونه‌ها با استفاده از عبور دی‌اکسید کربن از میان آنها به مدتی حدود ۱ ساعت تعیین شده است. در مرحله‌ی بعدی آب مقطر از نمونه‌ها در زمانی حدود ۳ تا ۵ ساعت با اعمال فشار ثقلی ۵ کیلو پاسکالی عبور داده شده است تا نمونه‌ها اشباع شوند. نمونه‌ها به‌صورت همسان (ایزوتروپ) تحکیم یافته‌اند تا به حد محصورکنندگی میل کنند. مدت‌زمان انجام پروسه‌ی تحکیم نمونه‌ها بین ۲ ساعت (برای ماسه تمیز) تا حدود ۳ ساعت (برای سیلت خالص) متغیر بوده است. بعد از آماده‌سازی، اشباع و تحکیم نمونه‌ها آنها تحت بارگذاری چرخه‌ای با نسبت‌های مختلف تنش چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. تمامی آزمایش‌ها در بارگذاری چرخه‌ای با فرکانس ۱ هرتزی انجام شده‌اند. نمونه‌ها با یک تنش سینوسی متناسب با تنش چرخه‌ای (CSR) بارگذاری می‌شوند تا اینکه پدیده‌ی روانگرایی ایجاد شود. در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت روانگرایی در مجموع ۶۰ آزمایش تنش سه محوری چرخه‌ای بر روی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف سیلت (صفر تا ۱۰۰ درصد) برای یک تراکم نسبی ثابت ( $D_r = 60\%$ ) انجام شده است. حداقل سه آزمون چرخه‌ای برای نسبت‌های مختلف تنش چرخه‌ای (CSR) انجام گرفته تا اضافه فشار آب منفذی برابر تنش تحکیم اولیه ( $\sigma'_{vc}$ ) شود و یا کرنش محوری به مقدار  $\pm 3\%$  برسد [۴۷].

آنها با یکدیگر حاصل شده‌اند. ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷] و همچنین بازیار و شرفی [۴۸] مخلوط‌هایی تا ۱۰۰ درصد ریزدانه‌ها را جهت استفاده در برنامه‌ی آزمایشگاهی آماده کردند، اما استاماتوپولوس [۹] فقط سه نوع مخلوط تا ۲۵ درصد ریزدانه را مورد استفاده قرار داده است. توزیع دانه‌بندی ماسه‌ها، سیلت‌ها و مخلوط‌های ماسه و سیلت از لحاظ سایز دانه‌ها بر اساس استانداردهای مربوطه نظیر ASTM ایجاد شده‌اند. جدول (۱) مشخصات خاک‌ها را بیان می‌کند. نسبت‌های تخلخل حداکثر ( $e_{max}$ ) و حداقل ( $e_{min}$ ) طبق استانداردهای معتبر نظیر ASTM D4253 و ASTM D4254 تعیین شده‌اند [۴۹-۵۰].

جدول (۱): مشخصات خاک‌های مصرفی در برنامه آزمایشگاهی.

نوع خاک	وزن مخصوص (Gs)	نسبت تخلخل حداکثر ( $e_{max}$ )	نسبت تخلخل حداقل ( $e_{min}$ )	اندازه متوسط دانه‌ها (D50)	ضریب یکنواختی (Cu)
ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷]					
$F0_{(Sand)}$	۲/۶۹	۱/۱۶۵	۰/۵۰۴	۰/۲۰۳	۲/۱۸
$F10$	.....	۱/۲۳	۰/۴۵۱	.....	.....
$F20$	.....	۱/۲۹	۰/۴۲	.....	.....
$F30$	.....	۱/۳۷	۰/۴۰۵	.....	.....
$F35$	.....	۱/۴	۰/۴	.....	.....
$F50$	.....	۱/۳۸۵	۰/۳۶۵	.....	.....
$F60$	.....	۱/۵	۰/۴	.....	.....
$F70$	.....	۱/۵۴	۰/۴۵	.....	.....
$F80$	.....	۱/۶۸	۰/۴۴	.....	.....
$F90$	.....	۱/۷	۰/۴۳	.....	.....
$F100_{(Silt)}$	۲/۷۲	۱/۷۲	۰/۴۶۲	۰/۰۲۲	۵/۲۳۳
بازیار و شرفی [۴۸]					
$F0_{(Sand)}$	۲/۶۷	۰/۸۷	۰/۵۸	۰/۳۶۱	۲/۴۴
$F15$	۲/۶۷	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۳۵۱	۳۰/۴۶
$F30$	۲/۶۷	۰/۸۵۴	۰/۳۱۹	۰/۳۰۸	۴۸/۹۲
$F60$	۲/۶۸	۱/۲۵۹	۰/۳۶	۰/۰۵	۳۰/۴۳۱
$F100_{(Silt)}$	۲/۶۸	۱/۸۸	۰/۴۶	۰/۰۲۱	۱۱/۵۴
استاماتوپولوس [۹]					
$F0_{(Sand)}$	۲/۶۵	۰/۸۴	۰/۵۶	.....	.....
$F15$	.....	۰/۷۷	۰/۴	.....	.....
$F25$	.....	۰/۷۳	۰/۳۸	.....	.....

### ۳-۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش‌های آزمایشگاهی

#### انجام شده توسط بازیار و شرفی [۴۸]

نمونه‌ها قطر خارجی و داخلی ۱۰۰ و ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری دارند. آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM D5311 در یک فرکانس ۱ هرتزی انجام شده‌اند [۵۱]. تمامی نمونه‌ها به صورت همسان تحت فشارهای محصورکنندگی مؤثر ( $\sigma_3'$ ) ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلو پاسکال تحکیم یافته‌اند. تمامی نمونه‌ها به وسیله‌ی جاری شدن آب از زیر تا بالای آنها اشباع شده‌اند. درجه‌ی بسیار بالایی برای اشباع به دست آمده که توسط مقادیر ضریب فشار منفذی اندازه‌گیری شده ( $B = 0.97 \sim 1$ ) تأیید شده است. مدت‌زمان مورد نیاز برای رسیدن نمونه‌ها به حالت اشباع ۳۰ دقیقه تا ۱۲ ساعت بوده است. در این تحقیق جهت آماده‌سازی نمونه‌ها از روش تحت تراکم استفاده شده است [۵۲-۵۳]. پارامترهای مورد نیاز برای آماده‌سازی نمونه‌ها نظیر محتوای آب و مقدار تراکم (فشار) به ترتیب ۹ و ۴ درصد انتخاب شده است [۴۹، ۵۱]. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، بارهای پیچشی هارمونیک چرخه‌ای متغیر به نمونه‌های اشباع شده اعمال و کرنش برشی برای هر نمونه به صورت پیوسته ثبت شده است. شدت‌های بار پیچشی چرخه‌ای به منظور ایجاد محدوده‌ی وسیعی از نسبت‌های تنش چرخه‌ای ( $CSR = \tau/\sigma_3'$ ) انتخاب شده و تعداد چرخه‌های مورد نیاز ( $N_i$ ) برای شروع روانگرایی متغیر (بین محدوده‌ی ۰/۱۷ تا ۹۰۰) بوده است. لازم به یادآوری است که روانگرایی (اولیه) زمانی رخ می‌دهد که اضافه فشار آب منفذی برابر تنش تحکیم اولیه ( $\sigma_3'$ ) نمونه‌ها شود ( $Ru = 1$ ) و یا مقدار دو برابر کرنش محوری برابر ۷/۵ درصد ( $DA = 7.5$ ) شود. در کل ۶۰ آزمایش بر روی نمونه‌هایی با مقادیر مختلف ریزدانه‌ها (۶۰، ۳۰، ۱۵ و ۱۰۰ درصد) در تراکم نسبی یکسان (۶۰ درصد) انجام شده و هر آزمایش تا زمان رسیدن به روانگرایی ادامه یافته است. در این مطالعه آزمایشگاهی بر روی روش انرژی نیز جهت ارزیابی تأثیر ریزدانه‌ها بر روانگرایی تمرکز شده است [۴۸].

### ۳-۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش‌های آزمایشگاهی

#### انجام شده توسط استاماتوپولوس [۹]

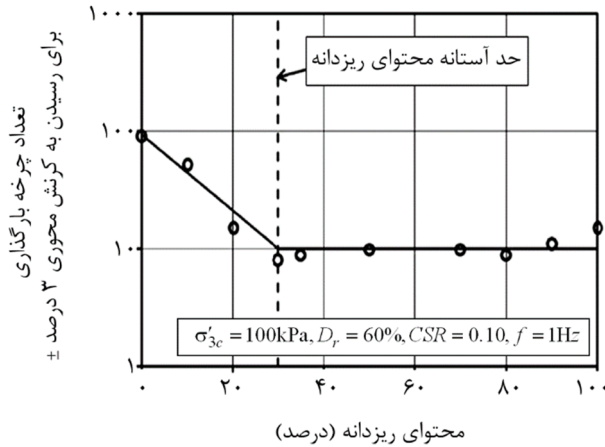
تمامی نمونه‌ها با قطر ۳۸/۲ و ارتفاع ۸۴/۹ میلی‌متر برای آزمایش توسط دستگاه سه محوری ساخته شده‌اند. نمونه‌ها در نسبت‌های مختلف محتوای ریزدانه، نسبت تخلخل و تنش تحکیمی آماده شده است. نرخ بارگذاری هارمونیک اعمالی کم و بیش ۳۰ ثانیه برای هر چرخه کامل بوده و آزمایش‌ها تا رسیدن به روانگرایی انجام شده است. ماسه‌ها و سیلت‌های مورد استفاده در مخلوط‌ها ابتدا در گرمخانه خشک شده‌اند تا رطوبت کم و بیش برابر صفر شود. سپس مخلوط‌های همگن ماسه-سیلت حاوی صفر، ۱۵ و ۲۵ درصد ریزدانه‌ها آماده شده‌اند. خاک‌ها درون قالب‌ها در ۵ تا ۹ لایه به وسیله‌ی دستگاه کوبش هیدرولیکی متراکم گردیده‌اند و در صورت نیاز برای تراکم کافی از آب اضافی (۹ درصد) استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها به وسیله‌ی جاری کردن آب از پایین تا بالای نمونه‌ها اشباع می‌شوند و به منظور رسیدن به حداکثر درجه‌ی اشباع دی‌اکسید کربن هم اعمال شده است. ضریب فشار منفذی اندازه‌گیری شده ( $B$ ) برابر ۱ بوده است. تمامی نمونه‌ها تحکیم در تنش‌های محصورکنندگی ۵۵۰، ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰ و یا ۷۵۰ کیلو پاسکال تحکیم یافته‌اند. در این کار آزمایشگاهی مشابه [۸]، روانگرایی در شرایطی که دو برابر کرنش محوری از ۵ درصد تجاوز نماید، معرفی می‌شود. در تحلیل‌های روانگرایی بیشتر یک زلزله با بزرگای  $M = 7.5$  به عنوان مرجع انتخاب می‌شود که متناظر با ۱۵ چرخه بارگذاری است [۶-۷]. به همین دلیل مقاومت چرخه‌ای در چرخه‌ی پانزدهم ( $SR_{15}$ ) به عنوان شاخص اصلی برای مقاومت چرخه‌ای خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۴- شرح و تفسیر نتایج

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها با توجه به شرایط در نظر گرفته شده در بخش قبل در قالب اشکال به صورت موردی تشریح و تحت تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۱- تأثیر محتوای ریزدانه بر فشار آب منفذی

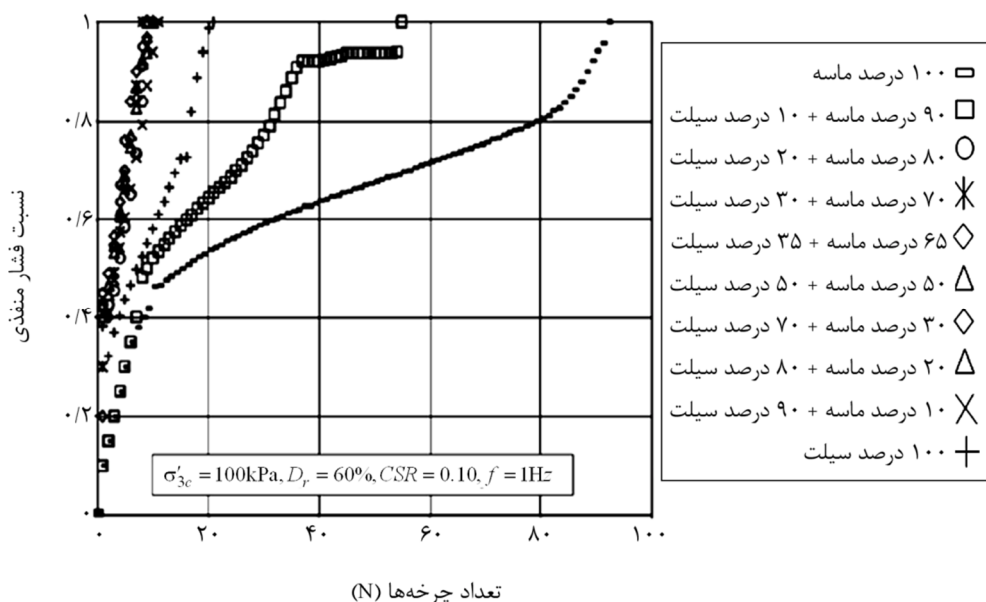
ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷] در ابتدا تعداد چرخه‌ی مورد نیاز برای تولید اضافه فشار آب منفذی یا رسیدن به کرنش محوری  $\pm 3\%$  نمونه‌ها با توجه به محتوای ریزدانه‌ها در نسبت تنش چرخه‌ای  $0/1$  را با استفاده از روش تراکم نسبی ثابت مورد مطالعه قرار داده‌اند که در شکل (۳) ارائه گردیده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که تعداد چرخه‌ی مورد نیاز برای نمونه‌های حاوی بیش از ۳۰ درصد سیلت کم‌وبیش ثابت و حدود ۱۰ چرخه می‌باشد و برای محتوای سیلت کمتر از ۳۰ درصد تعداد چرخه‌ها به صورت نزولی از ۱۰۰ چرخه (صفر درصد سیلت) به ۱۰ چرخه (۳۰ درصد سیلت) می‌رسند. نتایج بیان می‌کند که در تراکم ثابت، مقاومت چرخه‌ای تا رسیدن به محتوای ۳۰ درصدی ریزدانه‌ها به سرعت کاهش یافته و پس از آن برای تمامی درصد‌ها حالتی یکنواخت دارد. در شکل (۴) نیز پاسخ فشار آب منفذی به صورت تابعی از چرخه‌های بارگذاری ترسیم شده که با بررسی آن می‌توان کاهش نرخ تولید اضافه فشار آب منفذی را در محتوای ۳۰ درصد سیلت مشاهده نمود. این شرایط توجیهی مناسب برای تغییرات مقاومت چرخه‌ای حاصله است.



شکل (۳): تعداد چرخه برای رسیدن به کرنش  $\pm 3\%$  [۴۷].

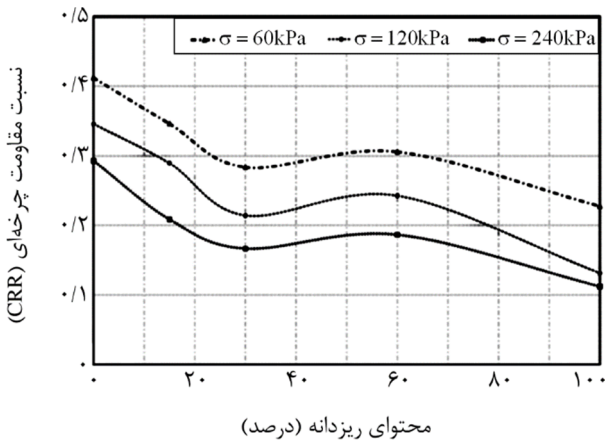
#### ۴-۲- تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای

ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷] در ادامه‌ی تحقیقات خود نسبت مقاومت چرخه‌ای (CRR) برای مخلوط‌های ماسه و سیلت با محتوای مختلف سیلت را در تراکم نسبی ۶۰ درصد تعیین کرده‌اند. بررسی نتایج این‌گونه بیان می‌کند که نسبت اضافه فشار آب منفذی با افزایش محتوای ریزدانه‌های سیلت غیر پلاستیک تا کمتر از مرز ۳۰ درصد افزایش یافته و با افزایش بیشتر سیلت ( $FC > 30\%$ ) این نسبت کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش محتوای ریزدانه‌ها در مخلوط ماسه و سیلت تا ۳۰ درصد، تعداد



شکل (۴): پاسخ فشار منفذی متناظر با چرخه‌های بارگذاری [۴۷].

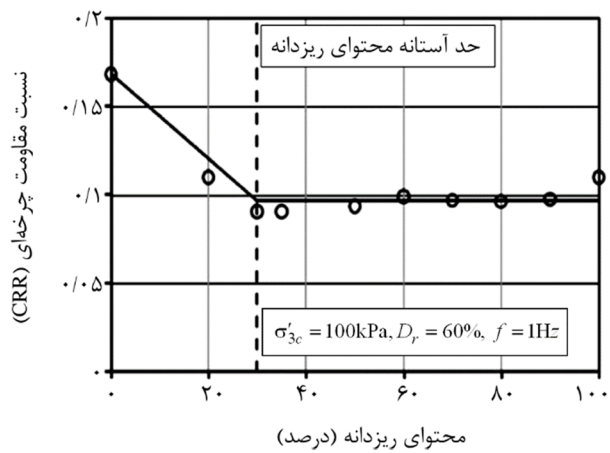
درصد) مقاومت روانگرایی یک روند افزایشی پیدا می‌کند اما مقاومت در محتوای بیش از ۶۰ درصد ریزدانه‌ها دوباره کاهش می‌یابد [۴۸].



شکل (۶): تأثیر ریزدانه‌ها بر مقاومت چرخه‌ای در تراکم نسبی ثابت [۴۸].

استاماتوپولوس [۹] آزمایش‌های چرخه‌ای زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های تحکیم‌یافته (به‌صورت همسان) را در نسبت‌های مختلف تخلخل اولیه ( $e_0$ ) و تنش تحکیمی ( $P'_0$ ) به‌وسیله‌ی دستگاه سه محوری انجام داد. این نتایج بر اساس تعداد چرخه‌های بارگذاری بیان شده‌اند. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، در این تحقیق آزمایشگاهی مقاومت چرخه‌ای در چرخه‌ی پانزدهم (SR15) به‌عنوان شاخص اصلی برای مقاومت چرخه‌ای خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که آزمایش‌های این پژوهش حاصل نتایج دو آزمایشگاه تحت نظر پروفیسور استاماتوپولوس (STAM) و دیگری تحت نظر پروفیسور تیکا (AUTH) بوده است. شکل‌های (۷) و (۸) مقاومت چرخه‌ای اندازه‌گیری شده SR15 (شاخص مقاومت چرخه‌ای) را با توجه به تنش‌های تحکیمی و نسبت تخلخل مخلوط‌های ماسه و سیلت حاوی صفر، ۱۵ و ۲۵ درصد ریزدانه را ارائه می‌کند. پاسخ‌ها نشان می‌دهند که مقاومت چرخه‌ای هر مخلوط افزایش می‌یابد هنگامی که نسبت تخلخل و تنش تحکیمی کاهش یافته باشد. این نتیجه منطبق با مشاهدات و سایر محققین است [۱۲].

چرخه‌های بارگذاری برای ایجاد روانگرایی اولیه‌ی کاهش و برای مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد ریزدانه‌ها تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد. این نتایج تغییر در ماتریس ساختاری خاک در مرز ۳۰ درصد را بیان می‌نماید. شکل (۵) تغییرات مقاومت چرخه‌ای را برای مقادیر مختلف سیلت ارائه می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد نسبت چرخه‌ای تا رسیدن به حد آستانه (مرز محتوای سیلت = ۳۰ درصد) کاهش یافته و پس‌از آن مقدار این نسبت به‌صورت ثابت باقی می‌ماند.



شکل (۵): مقاومت چرخه‌ای برای مقادیر مختلف ریزدانه‌ها (سیلت) [۴۷].

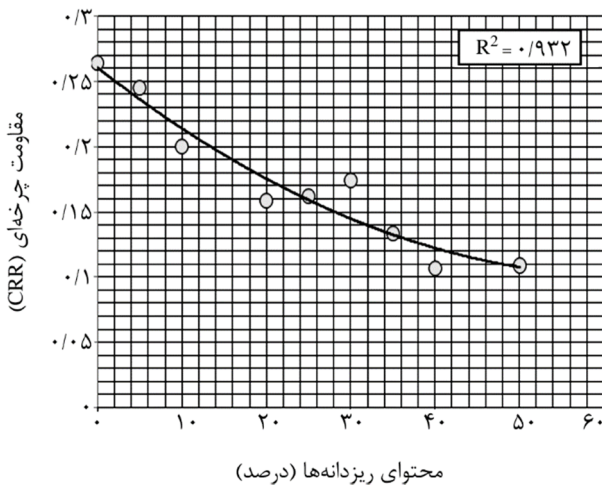
تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط بازیار و شرفی [۴۸] در زمینه‌ی مقاومت چرخه‌ای نیز روندی نزدیک و مشابه نتایج ایمدادل کریم و جهانگیر عالم [۴۷] را نشان می‌دهد که بر اساس آن محتوای ۳۰ درصد ریزدانه را می‌توان به‌عنوان مقدار تأثیرگذار بر رفتار مقاومت روانگرایی معرفی نمود. تأثیر محتوای ریزدانه‌ها (سیلت) بر روی مقاومت روانگرایی در تراکم نسبی ثابت در شکل (۶) ارائه شده است. این شکل بیان می‌کند که برای مقادیر کم محتوای ریزدانه‌ها،  $FC < FC_{th}$  که  $FC_{th}$  مرز و آستانه‌ی محتوای ریزدانه‌ها برای تغییر رفتار در ماسه سیلتی است) افزایش در محتوای ریزدانه‌ها در تراکم نسبی یکسان منجر به کاهش مقاومت روانگرایی می‌گردد. این رفتار مشابه نتایج مطالعات پولیتو و مارتین [۳۷] می‌باشد. درحالی‌که برای مقادیر بیشتر ریزدانه‌ها ( $FC > FC_{th}$ ) در تراکم نسبی ثابت افزایش در محتوای ریزدانه‌ها (کم‌وبیش ۳۰ تا ۶۰



خطی رابطه (۱) جهت تعیین مقاومت چرخه‌ای خاک‌ها با توجه به میزان ریزدانه‌ها استخراج گردیده است:

$$CRR = 4e^{(-0.05 CF^2)} - 0.005 CF + 0.026 \quad (1)$$

در این رابطه  $CRR$  نسبت مقاومت چرخه‌ای و  $CF$  محتوای ریزدانه‌ها برحسب درصد می‌باشد. شکل (۹) همبستگی میان مقاومت چرخه‌ای ( $CRR$ ) و میزان محتوای ریزدانه‌ها ( $CF$ ) را نمایان می‌سازد.

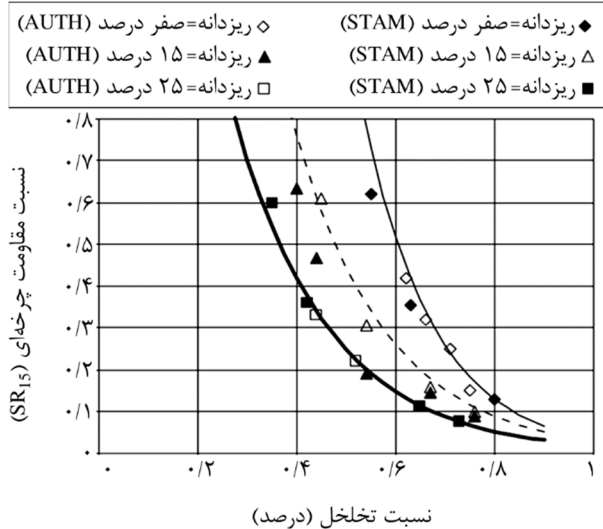


شکل (۹): همبستگی مقاومت چرخه‌ای و محتوای ریزدانه‌ها.

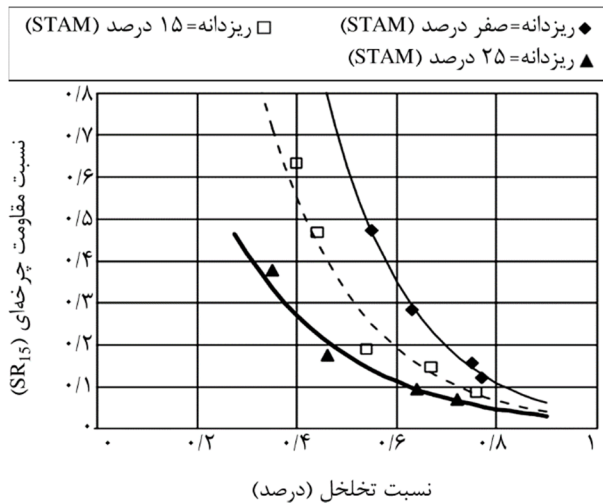
## ۶- نتیجه‌گیری

بر اساس رابطه‌ی تعیین‌شده جهت محاسبه‌ی مقاومت چرخه‌ای خاک‌های حاوی ریزدانه‌ها و همچنین مرور و تفسیر نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی مورد بررسی [۹، ۴۵، ۴۶] نتایج نهایی زیر قابل استخراج می‌باشد:

۱. رابطه‌ی استخراج شده از داده‌های مورد پردازش نشان‌دهنده‌ی روندی کاهشی در مقاومت چرخه‌ای با افزایش محتوای ریزدانه‌ها می‌باشد و این‌گونه بیان می‌دارد که مقاومت ماسه‌ی تمیز به‌مراتب بیشتر از خاک‌های ماسه سیلتی و سیلت خالص است.
۲. با افزایش فشار محصورکنندگی (تحکیمی) مقاومت چرخه‌ای خاک‌های ماسه - سیلت کاهش می‌یابد. در ضمن افزایش نسبت تخلخل نمونه‌ها موجب کاهش مقاومت چرخه‌ای می‌گردد.



شکل (۷): مقاومت چرخه‌ای نمونه‌ها در تنش تحکیمی ۵۰ کیلو پاسکال [۹].



شکل (۸): مقاومت چرخه‌ای نمونه‌ها در تنش تحکیمی ۱۵۰ کیلو پاسکال [۹].

## ۵- تعیین رابطه‌ی مقاومت چرخه‌ای خاک‌های حاوی ریزدانه

در این مطالعه جهت تعیین رابطه‌ی مقاومت چرخه‌ای خاک‌های حاوی ریزدانه، نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف [۲۷-۴۸، ۵۴] در زمینه‌ی تأثیر محتوای ریزدانه‌ها بر مقاومت روانگرایی گردآوری و مورد پردازش قرار گرفته است. داده‌های جمع‌آوری شده ابتدا بر اساس میزان محتوای ریزدانه‌ها دسته‌بندی شده و پس از انجام میانگین‌گیری از آنها، با استفاده از روش رگرسیون

- on liquefied strength of silty sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **55**, 108-119.
6. European Prestandard (1994) Eurocode 8– design provisions of earthquake resistance of structures – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
  7. Seed, H-B., Idriss, I-M., and Arango, I. (1983) Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **109**(3), 458-482.
  8. Ishihara, K. (1996) *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford Engineering Science Series, **46**.
  9. Stamatopoulos, C. (2010) An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 662-678.
  10. Finn, W-D., Pickering, D-J., and Bransby, P-L. (1971) Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **97**(4), 639-660.
  11. De Alba, P., Seed, H-B., and Chan, C-K. (1976) Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **102**(9), 909-928.
  12. Vaid, Y-P. and Thomas, J. (1995) Liquefaction and postliquefaction behavior of sand. *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, **121**(2), 163-173.
  13. Vaid, Y-P., Sivatayalan, S. (1996) Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**, 281-289.

۱۴. جعفری، محمد کاظم، رزمخواه، آرش و کشاورز بخشایش، محمد (۱۳۸۲) پهنه‌بندی سرعت موج برشی آبرفت‌های گستره تهران. نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۲، صفحه ۲۱۳-۲۲۵.
۱۵. جعفری، محمد کاظم، کشاورز بخشایش، محمد، سهرابی، عبدالله و رزمخواه، آرش (۱۳۸۱) ویژگی‌های آبرفت‌های جنوب تهران از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای.

۳. طبق مطالعات سایر محققین، استعداد روانگرایی ماسه سیلتی با افزایش در محتوای ریزدانه ممکن است افزایش یا کاهش یابد؛ اما این نتایج بیان می‌کند که حد آستانه‌ی محتوای سیلت کم‌وبیش برابر ۳۰ درصد ( $FC = 30\%$ ) می‌باشد. برای مواردی که محتوای ریزدانه‌ها کمتر از حد آستانه باشد ( $FC < 30\%$ )، افزایش در محتوای ریزدانه در تراکم نسبی یکسان منجر به کاهش مقاومت چرخه‌ای (روانگرایی) می‌شود؛ اما برای مقادیر بیشتر از حد آستانه ( $FC > 30\%$ ) بیشتر افزایش در محتوای ریزدانه‌ها باعث کاهش مقاومت نمی‌شود و کم‌وبیش روندی ثابت یا افزایشی را داراست. البته بعد از ۶۰ درصد ریزدانه دوباره ممکن است مقاومت چرخه‌ای میل به کاهش داشته باشد. لازم به اشاره است که مقدار آستانه محتوای ریزدانه‌ها مقداری یکتا و منحصر به فرد نیست و می‌تواند وابسته به مشخصات دانه‌های ریز و درشت و همچنین نسبت تخلخل کلی ( $e$ ) مخلوط باشد.

۴. نرخ تولید اضافه فشار آب منفذی با در نظر گرفتن چرخه‌های بارگذاری در تراکم نسبی ثابت، در ابتدا تا رسیدن به حد آستانه‌ی ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد و پس از آن تا رسیدن به نمونه سیلت خالص کم‌وبیش نرخ تولید اضافه فشار آب منفذی روندی یکسان را نشان می‌دهد.

## ۶- مراجع

1. Castro, G. (1969) *Liquefaction of Sands*. In, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
2. Terzaghi, K., Peck, R-B., and Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3<sup>rd</sup> ed, New York, Wiley.
3. Kramer, S-T. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, University of Washington, Prentice - Hall International Series in Civil Engineering Mechanics.
4. Towhata, I. (2007) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer.
5. Sadrekarimi, A. (2013) Influence of fines content

26. Xenaki, V-C. and Athanasopoulos, G-A. (2003) Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, 183-194.
27. 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.
28. Seed, H-B. and Idriss, I-M. (1971) Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, **97**, 1249-1274.
29. Seed, H-B., Tokimatsu, K., Harder, L-F., and Chung, R-M. (1985) Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **111**(12), 1425-1445.
30. Boulanger, R-W., Meyers, M-W., Mejia, L-H., and Idriss, I-M. (1998) Behavior of a fine-grained soil during Loma Prita earthquake. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(1), 146-158.
31. Amini, F. and Qi, G-Z. (2000) Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **126**(3), 208-217.
32. Boulanger, R-W. and Idriss, I-M. (2006) Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **132**(11), 1413-1426.
33. Bray, J-D. and Sancio, R-B. (2006) Assessment of the liquefaction susceptibility of finegrained soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **132**(9), 1165-1177.
34. Kishida, H. (1969) Characteristics of liquefied sands during Mino-Owari, Tohankai, and Fukui earthquakes. *Soils and Foundations*, **9**(1), 75-92.
35. Tohno, I. and Yasuda, S. (1981) Liquefaction of the ground during the 1978 Miyagiken-Oki earthquake. *Soils and Foundations*, **21**(3), 18-34.
36. Singh, S. (1994) Liquefaction characteristics of silts. Ground failure under seismic conditions. *Geotechnical Special Publication*, ASCE, **44**, ۴۵-۴۶، شماره ۴۵-۴۶، صفحه ۹۲-۱۰۴.
16. Seed, H-B. (1987) Design problems in soil liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **113**, 827-845.
17. Pitman, T-D., Robertson, P-K., and Sego, D-C. (1994) Influence of fines on the collapse of loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 728-739.
18. Yasuda, S., Wakamatsu, K., and Nagase, H. (1994) Liquefaction of artificially filled silty sands, Ground failures under seismic conditions. *Geotechnical Special Publication*, ASCE, **44**, 91-104.
19. Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996) The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*, **36**, 81-91.
20. Yamamuro, J-A. and Lade, P-V. (1997) Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, 905-917.
21. Wang, G. and Sassa, K. (2000) *Undrained Shear Behavior of Silty Soils in Ring-Shear Tests*. In: GeoEng2000, Melbourne, Australia.
22. Fourie, A-B., Blight, G-E., and Papageorgiou, G. (2001) Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*, **38**, 707-719.
23. Naeini, S-A. and Baziar, M-H. (2004) Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 181-187.
24. De Alba, P. and Ballesterro, M. (2008) Effect of fines on sand residual strength after liquefaction. *Proceedings of the Conference Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, American Society of Civil Engineers, Sacramento*, 1-11.
25. Belkhatir, M., Missoum, H., Arab, A., Della, N., and Schanz, T. (2011) Undrained shear strength of sand-silt mixture: effect of intergranular void ratio and other parameters. *Journal of Civil Engineering*, **15**, 1335-1342.

- Earthquake Geotechnical Engineering Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. The Netherlands: Springer, 159-184.
47. Emdadul Karim, M. and Jahangir Alam, M-d. (2014) Effect of non-plastic silt content on the liquefaction behavior of sand-silt mixture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **65**, 142-150.
  48. Baziar, M-H. and Sharafi, H. (2011) Assessment of silty sand liquefaction potential using hollow torsional tests-An energy approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 857-865.
  49. ASTM D 4253-00 (2006) Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International.
  50. ASTM D 4254-00 (2006) Standard test method for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International.
  51. ASTM D 5311-92 (2004) Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International.
  52. Hazirbaba, K. (2005) Pore pressure generation characteristics of sand and silty sands: a strain approach. (Dissertation presented for Ph.D. program to the faculty of Graduate School, University of Texas).
  53. Polito, C-P. and Martin, J-R. (2001) Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **127**(5), 408-415.
  54. قهرمانی، محمود، قلندرزاده، عباس و مرادی، مجید (۱۳۸۵) بررسی تأثیر ریزدانه‌های پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه اشباع. ژورنال زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال هشتم، شماره دوم، صفحه ۷۱-۸۰.
  55. 105-116.
  37. Polito, C-P. and Martin, J-R. (2001) Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(5), 408-415.
  38. Dash, H-K. and Sitharam, T-G. (2009) Undrained cyclic pore pressure response of sand-silt mixtures: effect of nonplastic fines and other parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**, 501-517.
  39. Shen, C-K., Vrymoed, J-L., and Uyeno, C-K. (1977) The effects of fines on liquefaction of sands. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, 381-5.
  40. Kuerbis, R., Negussey, D., and Vaid, Y-P. (1988) Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. In: *Proceedings on Hydraulic Fill Structures, Geotechnical Special Publication*, ASCE, **21**, 330-345.
  41. Vaid, Y-P. (1994) Liquefaction of silty soils. *Ground failure under seismic conditions, Geotechnical Special Publication*, ASCE, **4**, 41-61.
  42. Finn, W-D-L., Ledbetter, R-H., and Wu, G. (1994) Liquefaction in silty soils: design and analysis Ground failures under seismic conditions. *Geotechnical Special Publication*, ASCE, **44**, 51-74.
  43. Chang, N-Y. and Yeh, S-T. (1982) Liquefaction potential of clean and silty sands. In: *Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference*, Seattle, USA, **2**, 1017-1032.
  44. Troncoso, J-H. (1988) Evaluation of seismic behavior of hydraulic fill structures. *Geotechnical Special Publication*, **21**, 475-491.
  45. Erten, D. and Maher, M-H. (1995) Cyclic undrained behavior of silty sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **14**(2), 115-123.
  46. Kokusho, T. (2007) Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests. In: *Kyriazis DP, Editor*.