

# مطالعه آزمایشگاهی اثر ریزدانه‌ها بر پتانسیل روانگرایی ماسه‌های اشباع

مهدی درخشندی<sup>۱</sup>؛ سید مجدالدین میرمحمد حسینی<sup>ii</sup>

## چکیده

بارهای سیکلی ناشی از زلزله باعث ایجاد روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای اشباع شل حاوی ریزدانه‌های چسبنده می‌شود. این پدیده در موارد زیادی از زلزله‌ها مشاهده شده است. در این تحقیق، مقاومت در برابر روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای حاوی ریزدانه چسبنده در قالب آزمایش‌های سه‌محوری دینامیکی با مطالعه پلاستیسیته مخلوط ماسه و رس توأمأ بررسی شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد با افزایش درصد ریزدانه تا رسیدن به درصد رس ۲۰ درصد (متناظر با  $PI=4$ ) مقاومت در برابر روانگرایی کاهش یافته و با اضافه شدن درصد رس مقاومت در برابر روانگرایی افزایش می‌یابد، تا اینکه در رس ۴۰٪ (متناظر با  $PI=7$ ) به مقداری در حدود ماسه خالص می‌رسد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش درصد رس نه تنها باعث افزایش مقاومت در برابر روانگرایی نمی‌شود بلکه به میزان قابل توجهی آن را کاهش می‌دهد. بنابراین، استفاده از روش‌های متداول در ارزیابی روانگرایی نظیر آزمایش  $SPT$  در صورتی که ماسه موجود حاوی ریزدانه چسبنده باشد کارا نیست و کاملاً غیر محافظه کارانه می‌باشد.

## کلمات کلیدی

مقاومت روانگرایی، آزمایش سه محوری سیکلی، ریزدانه چسبنده، ماسه های اشباع

## *Laboratory Investigation of the Effect of Fines on Liquefaction Potential of Saturated Sands*

Mahdi Derakhshandi; S.M Mir Mohammad Hosseyni

### ABSTRACT

Cyclic Loading produced by earthquake can induce liquefaction in saturated loose sands containing fines. In this investigation, the effect of plastic fines on the liquefaction strength was studied by considering both sand and fines. The tests were performed by implementing a cyclic triaxial apparatus. Tests results reveal that increasing the fines content to 20 percent ( $PI=4$ ) decreases the liquefaction strength. By increasing the fines content to more than 20 percent the liquefaction strength increases so that for the specimens containing 40 percent ( $PI=7$ ), the liquefaction strength is about the value clean sand. The results indicate that the presence of fines content does not increase the liquefaction strength and conversely decreases it significantly. Thus, using conventional methods of evaluating liquefaction potential such as SPT are not conservative if sand contains plastic fines.

### KEYWORDS

Liquefaction strength, Cyclic triaxial test, Plastic fines, Saturated sands

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر: [m\\_derakhshandi@aut.ac.ir](mailto:m_derakhshandi@aut.ac.ir)

<sup>ii</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر: [mirh53@yahoo.com](mailto:mirh53@yahoo.com)

محدوده PI های کوچکتر منجر می شود همچنین به دلیل اعمال خصوصیت چسبندگی به ماسه با اضافه شدن رس، مقاومت روانگرایی در محدوده PI های بالا افزایش می یابد.

اغماض از وجود ریزدانه در ماسه به تفسیری اشتباه به عنوان نتیجه ای محافظه کارانه از طریق چارت معروف سید و همکاران (۱۹۸۳) منجر خواهد شد. بنابراین، از کمیت و کیفیت ریزدانه ها در ارزیابی استعداد روانگرایی نهشته های ماسه ای نباید صرف نظر کرد.

## ۲- مصالح مورد مطالعه

برای انجام آزمایش ها از مخلوط مصالح ماسه ای با دانه بندی یکنواخت به همراه لای و رس با مشخصات استاندارد استفاده می شود. کانی رسی مورد استفاده به گونه ای انتخاب می شود که ضمن پوشش محدوده ای از خصوصیت خمیری مورد نظر در دسترس بوده و در عمل قابل استفاده در آزمایش ها باشد. همچنین متوسط ابعاد دانه های ماسه مورد استفاده باید به گونه ای باشد که خطای حاصل از نفوذ غشاء قابل اغماض بوده و به حداقل ممکن کاهش یابد.

مصالح مورد استفاده در این تحقیق، شامل ماسه شکسته سیلیسی شماره ۱۶۱ فیروزکوه است که رنگ قهوه ای روشن دارد و از دانه بندی یکنواختی برخوردار است. منحنی توزیع دانه بندی این ماسه خیلی به ماسه های استاندارد از جمله ماسه Toyora و مخصوصاً ماسه Sengenyama شبیه است. این دانه بندی همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می شود در محدوده دانه بندی ماسه های با پتانسیل روانگرایی بالا قرار می گیرد [۶]. مصالح ریزدانه مورد استفاده نیز از نوعی کائولن می باشد که خصوصیات فیزیکی و خمیری آن در جدول (۱) آمده است.

مطالعه ادبیات فنی موضوع نشان می دهد که در بعضی تحقیقات، درصد رس و در بعضی دیگر، پلاستیسیته رس مورد استفاده عامل مؤثر بر روانگرایی شناخته شده است. برای در نظر گرفتن توأم این دو عامل در این تحقیق، ماسه مورد نظر با درصد های مختلف رس ترکیب شده و خصوصیات خمیری مجموعه ماسه و رس توأم تعیین شده است.

## ۳- تجهیزات مورد استفاده و روش نمونه سازی

به منظور انجام آزمایش های دینامیکی بر روی مصالح مورد نظر، از دستگاه سه محوری سیکی GCTS که در نوع خود از پیشرفته ترین دستگاه های سه محوری سیکی موجود می باشد استفاده شده است. عملکرد دستگاه به صورت سیستم کنترل

روانگرایی خاک از جمله پدیده های ناشی از زلزله است که خسارات فراوانی به ساختمان ها و ابنیه فنی وارد می سازد. این پدیده تقریباً در تمام زلزله های بزرگ مشاهده شده است که در برخی از آنها باعث وارد آمدن خسارات جانی و مالی فراوان گردیده است. زلزله ۱۹۶۴ آلاسکا، روانگرایی وسیع در نیگاتای ژاپن در زلزله ۱۹۶۴، شکست سد خاکی سن فرناندو پایینی در اثر زلزله ۱۹۷۱، وقوع پدیده روانگرایی در آستانه اشرفیه در زلزله ۱۹۹۰ منجیل و روانگرایی وسیع در زلزله ۱۹۹۹ از میت ترکیه از جمله حوادث فاجعه باری بودند که توجه مهندسی علم ژئوتکنیک را به تحقیق در این زمینه معطوف داشت. از حدود ۴ دهه گذشته مطالعات فراوانی برای درک پدیده روانگرایی و بررسی و تعیین پتانسیل روانگرایی انجام شده است و هنوز نکات مبهم زیادی در خصوص رفتار این پدیده وجود دارد.

در ابتدا تصور بر آن بود که خاک های حاوی ریزدانه های چسبنده در اثر امواج حاصل از زلزله دچار روانگرایی نمی شوند؛ ولی مشاهده موارد روانگرایی ماسه های حاوی ذرات رس نشان داد که حتی خاک های ماسه ای با درصد رس بالا هم روانگرایی شده اند. از آنجا که تحقیقات انجام شده تاکنون به تمام جنبه های مختلف رفتاری این خاک ها نپرداخته است، در این تحقیق سعی شده است رفتار دینامیکی این خاک ها بررسی شود. موضوع این پژوهش، مدل سازی نمونه های خاک ماسه ای حاوی ریزدانه پلاستیک است که در قالب آزمون های آزمایشگاهی، شامل آزمایش های سه محوری دینامیکی انجام شده است.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط Mogami, Kubo (۱۹۵۳)، [۵] در ماسه های حاوی ریزدانه با اندیس خمیری ۳۴، مقاومت برشی در خلال ارتعاش با افزایش شتاب کاهش می یابد. Lee, Fitton (۱۹۶۸)، [۴] بیان داشتند که ریزدانه های رسی به طور قابل توجهی مقاومت سیکی را افزایش می دهند در حالی که ریزدانه های لای تمایل به کاهش مقاومت سیکی دارند Seed et al. (۱۹۸۳)، [۷] گزارش دادند که اگر خاک ماسه بیش از ۲۰ درصد ریزدانه یا درصد رطوبت کمتر از ۹۰ درصد حد روانی داشته باشد آنگاه آن خاک روانگرایی نخواهد شد. براساس نظر Ishihara, Koseki (1989)، [۲] ارتباط روشنی بین درصد رس یا درصد ریزدانه ها و مقاومت سیکی وجود ندارد، اما همچنان که PI افزایش می یابد، مقاومت سیکی هم افزایش می یابد. Tianqiang Guo, Prakash (1999)، [۹] بیان داشتند که با اضافه شدن ذرات رس، به دلیل کاهش هدایت هیدرولیکی فشار منفذی افزایش می یابد که به فشارهای منفذی بیشتر در

بسته (Closed Loop) می‌باشد که تمام مراحل اشباع تحکیم و بارگذاری به صورت خودکار توسط کامپیوتر کنترل می‌شود. نمونه‌های به کار رفته به قطر ۵ و طول ۱۰ سانتیمتر است که برای دستیابی به نمونه‌های با ساختار و نسبت منافذ یکنواخت از روش تراکم کاهش یافته (Under Compaction) استفاده شده است. در این روش، به طور کلی هر لایه تا دانسیته‌ای کمتر از آنچه که در نهایت مورد نظر است، کوبیده می‌شود [۳]. نمونه‌های مورد آزمایش با درصد کاهش تراکم اولیه ۶، درصد رطوبت ۵ و در ۵ لایه ۲ سانتیمتری ساخته شده‌اند.

پس از ساخت، نمونه درون سلول مخصوص آزمایش قرار می‌گیرد. سپس اشباع نمونه مطابق استاندارد ASTM انجام می‌شود. در این روش ابتدا با استفاده از خلأ (Vacuum) و آب بدون هوا (Deaired water) همراه با پس فشاری (Back pressure) که به نمونه وارد می‌شود، نمونه اشباع می‌شود. یادآوری این نکته لازم است که قبل از اشباع نمونه باید سنگ‌های متخلخل فوقانی و تحتانی، کاغذهای فیلتر و کلیه لوله‌های ارتباطی خشک و فاقد هوای محبوس باشد. ضمناً به دلیل اینکه حباب‌های هوا باعث جلوگیری از اشباع سریع نمونه حین روند اشباع‌سازی می‌شوند، قبل از ورود آب به داخل نمونه دی‌اکسیدکربن با فشار خیلی پایین را از نمونه عبور داده تا هوای داخل نمونه خارج شود. حال دی‌اکسید کربن به علت خاصیت حل شدن سریع آن در آب به صورت محبوس در نمونه ندارد و نمونه به سرعت اشباع می‌شود. این روش اشباع‌سازی به دلیل سرعت بالا و کاهش آشفته‌گی (Disturbance) نمونه، روشی مناسب برای خاک‌های ریزدانه است. پس از اشباع کامل ( $B-Value \geq 95\%$ )، نمونه‌ها تحت تحکیم ایزوتروپ در فشارهای همه جانبه  $\sigma'_{3c} = 300kPa$  و بعد از تحکیم، تحت آزمایش‌ها دینامیکی قرار می‌گیرند. آزمایش‌های سه محوری دینامیکی همگی به صورت زهکشی نشده و کنترل تنش انجام شده‌اند. فرکانس بارگذاری به منظور توزیع یکنواخت فشار آب منفذی حین بارگذاری در نمونه برابر ۰/۰۵ انتخاب شده است.

## ۴- بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها

در مطالعات انجام شده تاکنون در مورد اثر ریزدانه چسبیده بر پتانسیل روانگرایی، عمدتاً اثر PI رس بر مقاومت سیکی (منظور از مقاومت سیکی یا مقاومت روانگرایی در این مقاله مقدار  $CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_3}$  است که در آن  $\sigma_d$  دامنه تک تنش انحرافی سیکی و  $\sigma'_3$  تنش مؤثر تحکیمی می‌باشد) ماسه‌ها بررسی شده است. گزینه دیگری که می‌توان در نظر داشت PI

مجموعه رس و ماسه است؛ چرا که در این صورت اثر پلاستیسیته بر رفتار سیکی مخلوط رس و ماسه توأم در نظر گرفته می‌شود. جدول (۱) خصوصیات خمیری و فیزیکی مخلوط ریزدانه و ماسه را نشان می‌دهد و منحنی افزایش اندیس پلاستیسیته در مقابل درصد ریزدانه را می‌توان در شکل (۲) مشاهده کرد.

شکل (۳) تغییرات نسبت تخلخل حداکثر و حداقل، نسبت تخلخل پس از تحکیم و نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای پس از تحکیم را در برابر درصد ریزدانه‌های رسی نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش درصد رس، تخلخل اسکلت ماسه‌ای افزایش می‌یابد تا اینکه در مقدار ریزدانه ۲۰ درصد از مقدار نسبت تخلخل حداکثر ماسه تمیز فراتر می‌رود. این بدان معناست که پس از مقدار ریزدانه ۲۰ درصد با افزایش بیشتر درصد ریزدانه کم‌کم تماس بین دانه‌های ماسه از بین رفته و ساختار خاک از بافت غالب ماسه‌ای به بافت غالب رسی انتقال می‌یابد. با افزایش بیشتر درصد ریزدانه، دانه‌های ماسه در متن رس غوطه‌ور می‌شود و عملاً نقش مسلح کننده را در بافت رس به عهده می‌گیرند.

تمام آزمایش‌ها در شرایط اولیه  $e = 0.91$ ، تنش مؤثر همه جانبه تحکیمی  $\sigma'_{3c} = 300kPa$ ،  $CSR$  های مختلف و درصدهای رس ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ انجام شده است. شکل (۴) نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های انجام شده در درصد رس ۳۰ درصد و نسبت‌های  $CSR$ ، ۰/۰۹، ۰/۱ و ۰/۱۲ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، تغییر شکل‌ها به محض رسیدن تنش مؤثر به حدود صفر افزایش می‌یابد.

در صورتی که اساس بررسی این تحقیق پلاستیسیته ریزدانه‌ها به تنهایی بود آنگاه با استفاده از یک نوع ریزدانه رسی با PI مشخص تنها اثر کمیت ریزدانه بررسی می‌شد (از طرفی به دلیل خاصیت تیکسوتروپی بنتونیت از ترکیب با درصدهای بالای آن با کائولینیت نمی‌توان استفاده کرد) به همین دلیل از پلاستیسیته مخلوط به عنوان معیار استفاده شده است. معیار روانگرایی رسیدن به تنش مؤثر صفر در نظر گرفته شده و  $CSR$  متناظر با  $N = 10$  (زلزله ۷ ریشتر) به عنوان معیار مقایسه انتخاب شده است.

منحنی‌های تغییرات  $CSR$  در مقابل تعداد سیکل‌های مسبب روانگرایی را می‌توان در شکل (۵) مشاهده کرد. در این شکل با افزایش درصد ریزدانه به ماسه تمیز، این منحنی‌ها به سمت  $CSR$  کمتر حرکت می‌کند که حداقل آن در درصد رس ۲۰ درصد است که معادل  $PI=4$  می‌باشد. پس از آن، منحنی‌های مقاومت

## ۵- نتیجه گیری

مطالعات انجام شده تاکنون عمدتاً با بررسی پلاستیسیته ریزدانه‌ها به تنهایی صورت گرفته است. این مطالعه با توجه همزمان به کمیت و کیفیت ریزدانه‌ها انجام شده است؛ یعنی، پلاستیسیته مخلوط ماسه و ریزدانه‌های چسبنده توأم در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که بیان شد با افزایش درصد ریزدانه تا رسیدن به درصد ریزدانه ۲۰ درصد (متناظر با  $PI=4$ ) مقاومت در برابر روانگرایی کاهش و با اضافه شدن درصد ریزدانه مقاومت در برابر روانگرایی افزایش می‌یابد، تا اینکه در ریزدانه ۴۰ درصد (متناظر با  $PI=7$ ) به مقداری در حدود ماسه خالص می‌رسد. بنابراین، افزایش درصد ریزدانه‌های چسبنده نه تنها باعث افزایش مقاومت در برابر روانگرایی نمی‌شود؛ بلکه به میزان قابل توجهی آن را کاهش می‌دهد.

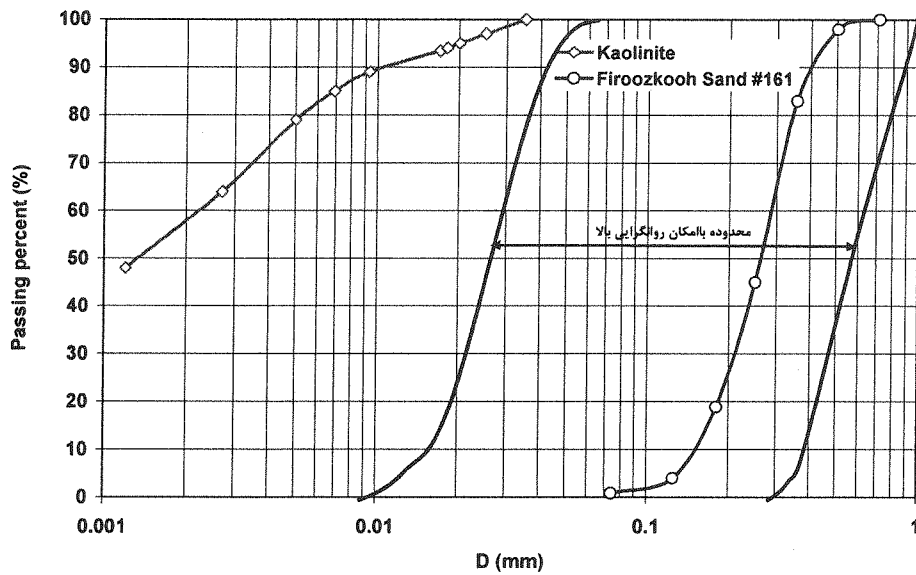
روش‌های متداول در ارزیابی روانگرایی شامل آزمایش‌های  $SPT$  و سه محوری سیکی است. عمده مزیت آزمایش  $SPT$  در ارزیابی روانگرایی، همسو بودن مقاومت در برابر روانگرایی و عدد  $SPT$  است (افزایش یا کاهش). بر اساس نموداری که Seed et al. (۱۹۸۳)، [۷] ارائه کرده اند به‌طور متداول استفاده می‌شود، ارتباط بین نسبت تنش مسبب روانگرایی و ضربات تصحیح شده  $SPT$  حداکثر برای درصد لای ۳۵ می‌باشد و برای هر خاک با بیش از ۳۵ درصد لای محافظه‌کارانه است. در صورتی که ماسه موجود حاوی ریزدانه چسبنده باشد این روش کارا نبوده و غیر محافظه‌کارانه می‌باشد. از طرفی تهیه نموداری شبیه نمودار [7] Seed et al. برای خاک‌های چسبنده نیازمند تهیه بانک اطلاعاتی وسیعی از بررسی  $SPT$  در ماسه‌های چسبنده بعد از زلزله می‌باشد؛ لذا می‌توان در راستای انجام این تحقیق با انجام آزمایش‌های بیشتر و ایجاد یک بانک اطلاعاتی جامع بین درصد رس،  $PI$ ،  $e$  و  $CSR$  ماسه‌ها با توجه به تنش‌های تحکیمی مختلف  $\sigma'_c$  رابطه معنی داری برقرار کرد و آن را به‌کار برد. در این صورت کافی است که ماسه مورد مطالعه در محدوده ماسه‌های مستعد روانگرایی قرار داشته و درصد رس،  $PI$ ،  $e$  آن ماسه تعیین شود تا با توجه به رابطه به‌دست آمده  $CSR$  ماسه مورد نظر پیش بینی شود.

روانگرایی به سمت افزایش  $CSR$  حرکت می‌کند به طوری که در مقدار رس ۴۰ درصد، مقاومت روانگرایی حتی از مرز ماسه خالص هم فراتر نمی‌رود.

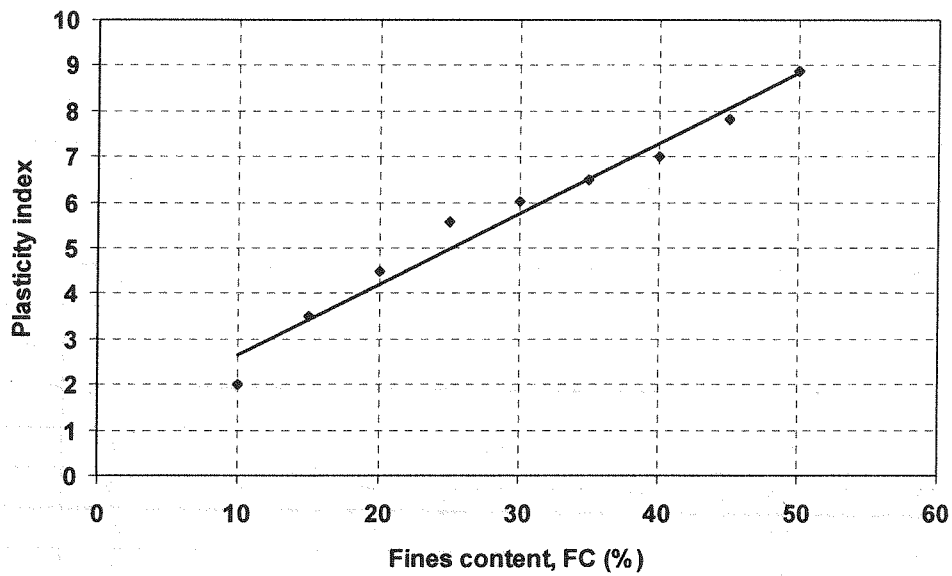
شکل (۶) اثر درصد رس بر مقاومت روانگرایی را نشان می‌دهد. در این شکل، با افزایش درصد رس به میزان ۱۰ درصد مقاومت روانگرایی به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش مقاومت در تعداد سیکل  $N=10$  تقریباً کاهشی ۳۰ درصدی را نسبت به مقدار مقاومت روانگرایی در ماسه تمیز از خود نشان می‌دهد. با افزایش درصد ریزدانه چسبنده به مقدار ۱۰ درصد، ذرات رس به دلیل ماهیت چسبنده خود در بین ذرات ماسه قرار می‌گیرند و باعث کاهش اصطکاک بین دانه‌های ماسه می‌شوند و به بیانی دیگر، در فاصله بین ذرات ماسه نقش ماده‌ای روان‌کننده را پذیرا شده و دانه‌های ماسه را روغنگاری می‌کنند. این فرآیند باعث لغزش راحت‌تر دانه‌های ماسه بر روی یکدیگر می‌شود و جابجایی ذرات در حالت زهکشی نشده باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه کاهش مقاومت روانگرایی می‌شود. با افزایش درصد رس به میزان ۲۰ درصد این رفتار کماکان ادامه می‌یابد. یادآوری می‌شود همان‌گونه که در منحنی‌های نسبت‌های تخلخل در برابر درصد رس (شکل ۳) مشاهده شد، با افزایش درصد ریزدانه نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای پس از تحکیم افزایش می‌یابد تا اینکه در درصد ریزدانه حدود ۲۰ درصد این مقدار از نسبت تخلخل حداکثر ماسه تمیز فراتر می‌رود. این مسأله نشان‌دهنده آن است که با افزایش درصد رس به بیش از ۲۰ درصد تماس دانه به دانه مصالح ماسه‌ای کم‌کم از دست رفته و ذرات ریزدانه، دانه‌های ماسه را از یکدیگر جدا می‌کنند و به تدریج ساختار خاک تغییر یافته و بافت ماسه‌ای به بافت ریزدانه تبدیل می‌شود که دانه‌های ماسه در آن شناور بوده و عملاً نقش تسلیح‌کنندگی نمونه‌ای را؛ که اکنون رفتاری شبیه به نمونه رسی دارد، به عهده می‌گیرند. بنابراین با افزایش درصد ریزدانه به بیش از مقدار ۲۰ درصد، مقاومت خاک افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش درصد ریزدانه به ۴۰ درصد نمونه‌ها رفتار مقاومتی در حدود ماسه تمیز به خود می‌گیرند. بنابراین، مقاومت روانگرایی نمونه‌های ماسه‌ای حاوی ریزدانه‌های چسبنده به میزان قابل توجهی به مقدار ریزدانه وابسته بوده و اثر آن در ابتدا تا درصد ریزدانه ۲۰ درصد نزولی و در درصدهای ریزدانه بیش از ۲۰ درصد صعودی است؛ به طوری که در ریزدانه ۴۰ درصد به مقداری در حدود ماسه تمیز می‌رسد.

جدول (۱): خصوصیات خمیری و فیزیکی مخلوط ماسه و ریزدانه

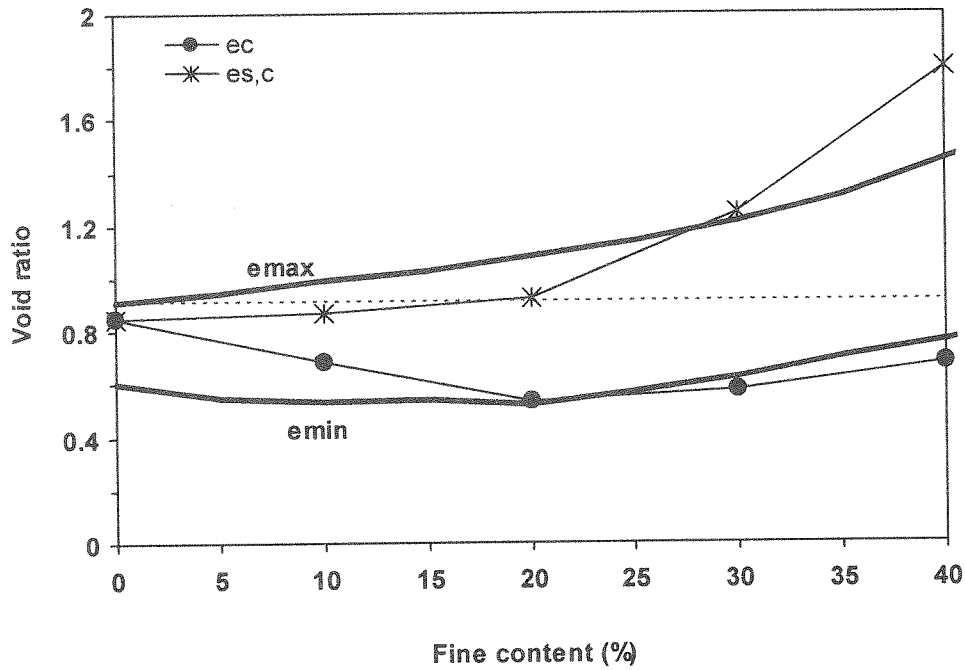
درصد رس	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۱۰۰
Gs	۲/۶۵۸	۲/۶۶۴	۲/۶۷۰	۲/۶۷۵	۲/۶۸۱	۲/۷۱۷
PI	۰	۲	۴/۵	۶	۷	۱۹
LL	-	۱۰	۱۳.۵	۱۷	۲۰	۴۲
PL	-	۸	۹	۱۱	۱۳	۲۳



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی مصالح ماسه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌های سه محوری سیکی



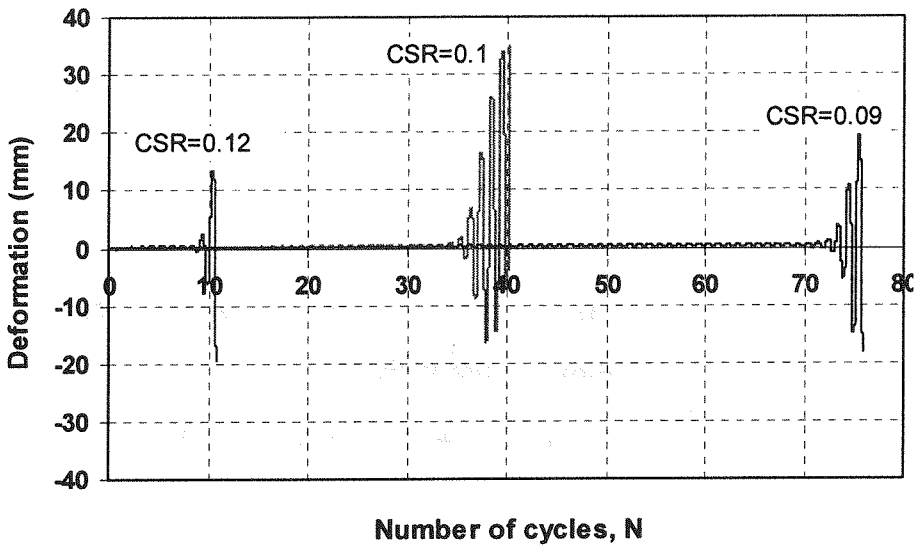
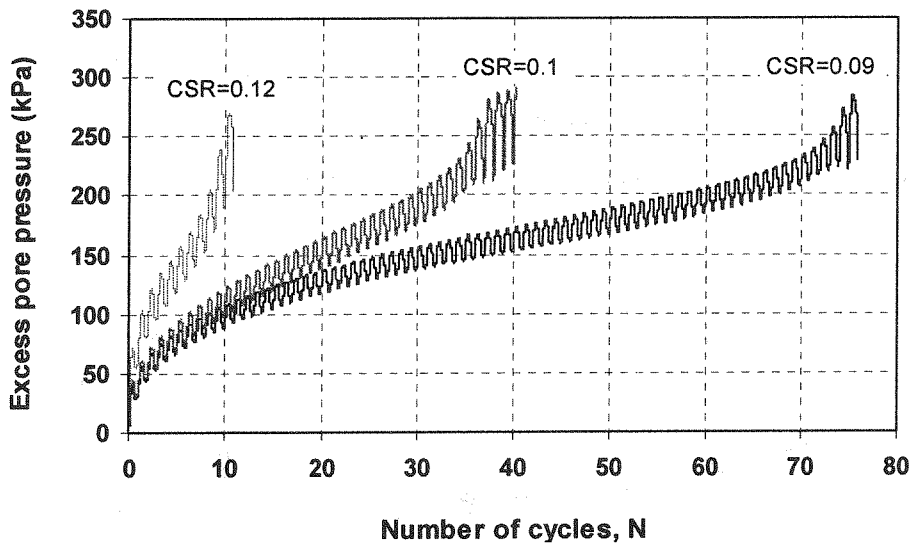
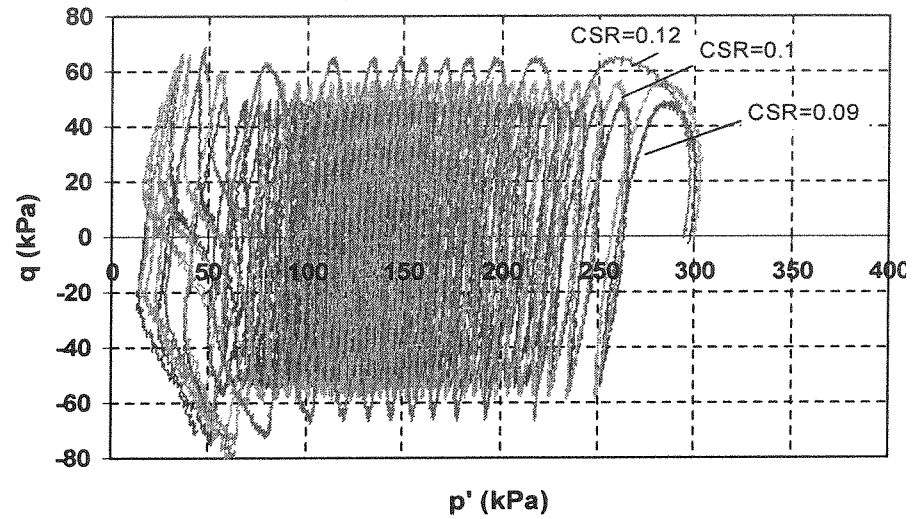
شکل (۲): منحنی تغییرات اندیس پلاستیسیته مخلوط ریزدانه و ماسه در مقابل درصد ریزدانه



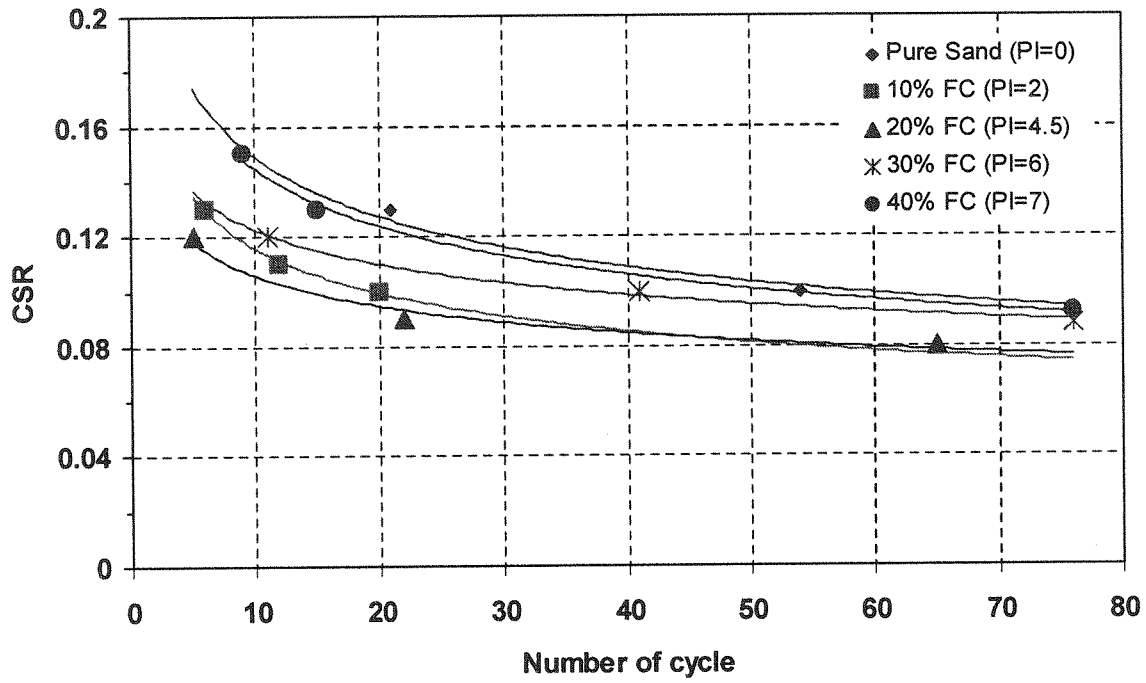
شکل (۳): تغییرات نسبت تخلخل حداکثر و حداقل، نسبت تخلخل پس از تحکیم و نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای پس از تحکیم در برابر درصد‌های مختلف ریزدانه

جدول (۲): آزمایش‌های سه محوری سیکلی کنترل تنش و مشخصات آنها برای نمونه‌های مخلوط ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه و درصد‌های ریزدانه ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد

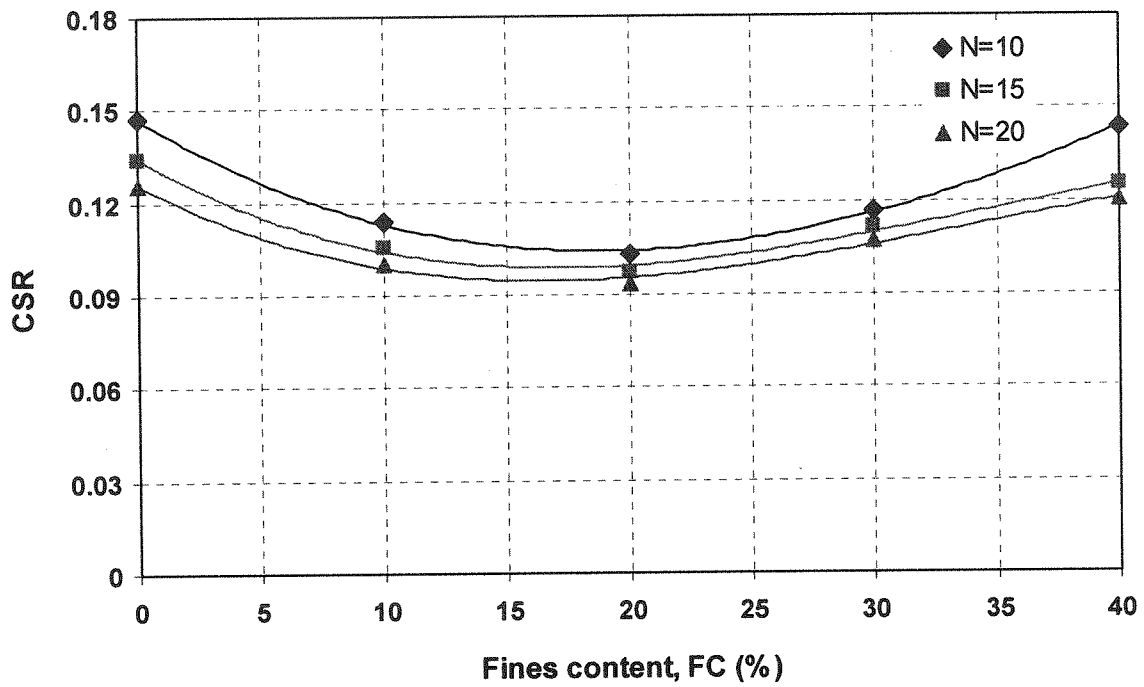
نام آزمایش	درصد رس	پارامتر B	تنش مؤثر تحکیمی (kPa)	$e_0$	$e_c$	$D_{rc}$	$e_{s,c}$	CSR	$N_l$
S1C0	۰	۹۷/۵	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۸۴۴	۲۲	۰/۸۴۴	۰/۱	۵۴
S13C0	۰	۹۷/۴	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۱۸۵	۲۰	۰/۱۸۵	۰/۱۳	۲۱
S15C0	۰	۹۷/۶	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۱۸۵	۲۰	۰/۱۸۵	۰/۱۵	۹
S1C10	۱۰	۹۷/۸	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۸	۶۸	۰/۸۷	۰/۱	۲۰
S11C10	۱۰	۹۷/۹	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۸۵	۶۷	۰/۸۷۲	۰/۱۱	۱۲
S13C10	۱۰	۹۷/۸	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۸۵	۶۷	۰/۸۷۲	۰/۱۲	۶
S09C20	۲۰	۹۷/۹	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۴	۹۶	۰/۹۲۵	۰/۰۹	۶۵
S1C20	۲۰	۹۸/۱	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۲	۹۸	۰/۹۱۳	۰/۱	۲۲
S12C20	۲۰	۹۸	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۴	۹۶	۰/۹۲۵	۰/۱۲	۵
S09C30	۳۰	۹۸/۲	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۷	۱۰۰	۱/۲۴	۰/۰۹	۷۵
S1C30	۳۰	۹۸	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۸	۱۰۰	۱/۲۶	۰/۱	۳۱
S12C30	۳۰	۹۷/۹	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۵۷۵	۱۰۰	۱/۲۵	۰/۱۲	۱۱
S15C40	۴۰	۹۸/۴	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۸	>۱۰۰	۱/۸	۰/۱۵	۷۶
S13C40	۴۰	۹۸/۱	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۷۵	>۱۰۰	۱/۷۹	۰/۱۲	۱۵
S09C40	۴۰	۹۸/۳	۳۰۰	۰/۹۱	۰/۶۷۵	>۱۰۰	۱/۷۹	۰/۰۹	۹



شکل (۴): نمونه‌ای از آزمایش‌های انجام شده برای نمونه‌های حاوی درصد ریزدانه ۳۰ درصد و  $CSR = 0.09, 0.1, 0.12$



شکل (۵): تغییرات منحنی‌های مقاومت روانگرایی  $CSR$  در مقابل تعداد سیکل‌های مسبب روانگرایی با تغییرات درصد ریزدانه



شکل (۶): منحنی تغییرات مقاومت روانگرایی  $CSR$  در مقابل درصد ریزدانه



- ASTM D5311, *Standard Test Method for Load Control Cyclic Triaxial Strength of Soils*, American Standard for Testing Materials, west Conshohocken, Pennsylvania, USA. [۱]
- Ishihara, K., and Koseki, "Discussion on The Cyclic Shear Strength Of Fines-Containing Sands" Earthquakes Geotechnical Engineering, Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio DeJaniero, Brazil, 1989 pp 101-106. [۲]
- Ladd, R.S., "Preparing Test Specimens Using Undercompaction", Geotechnical Testing Journal, 1(1), 1978 pp. 16-23. [۳]
- Lee, K.L., and Fitton, J.A., "Factors Affecting The Cyclic Loading Strength Of Soil," Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM STP 450, American Society for Testing and Materials, 1968, pp 7195. [۴]
- Mogami.T and Kubo.K, "The Behavior of Soil During Vibration", proc. 3rd Int.conf.Soil Mech.,1953 152-153. [۵]
- Port and Harbour Research Institute Ministry of Transportation, Japan, "*Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*", A.A. Balkema, 1997. [۶]
- Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I., "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", JGED, American Society of Civil Engineers, Vol. 109, No. 3, 1983, pp 458-482. [۷]
- Seed H.B., Tokimatsu.K, and Chung, R. "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations" J. Geotechnical Eng., ASCE, 111(12) 1985, pp 861-878. [۸]
- Tianqiang Guo and Shamsheer Prakash, "Liquefaction of Silts and Silt-Clay Mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 125, Issue 8, 1999, pp 706-710. [۹]