

## بهبود مقاومت روانگرایی ماسه‌ها با استفاده از سیمان‌تاسیون

مارال گوهرزای

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
goharzay.maral@gmail.com

کلید واژه‌ها: روانگرایی، سیمان‌تاسیون، ماسه سیمانی، رفتار مکانیکی، ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی.

### چکیده

در سال‌های اخیر، عامل بسیاری از آسیب‌های بزرگ وارده به سازه‌ها و پی‌ها را می‌توان وقوع روانگرایی در خاک بیان کرد. مدت طولانی است که سیمانی کردن ماسه جهت بهبود ویژگی‌های مهندسی آن به کار گرفته شده است. کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، اکسید آهن و سنگ گچ از جمله مواردی هستند که وجود یک و یا ترکیبی از آنها موجب سیمانی کردن طبیعی مصالح می‌شود. سیمان‌تاسیون در ماسه‌ها می‌تواند به صورت طبیعی وجود داشته باشد و یا به صورت مصنوعی اضافه شود. مشهود است که سیمان‌تاسیون باعث افزایش مقاومت ماسه در برابر روانگرایی می‌شود و می‌تواند یک فاکتور بحرانی در تصمیم‌های مهندسی باشد. این برآورد مستلزم آزمایش روی ماسه‌های ضعیف سیمانی شده در محدوده‌های مختلف سطوح سیمان‌تاسیون و وزن مخصوص است. برای این منظور آزمایش‌هایی انجام گرفته و نتایج آزمایشگاهی به منظور بررسی اثرات جداگانه وزن مخصوص و سیمان‌تاسیون به کار گرفته شده‌اند.

این مقاله نتایج به دست آمده از پژوهش‌های جامعی که در مورد مزایای تاثیر سیمان‌تاسیون ماسه بر رفتار مکانیکی آن و همچنین نتایج آزمایش‌های انجام شده در مورد ماسه‌های سیمانی را تحت بارگذاری سیکلی در آزمایش‌های سه محوری و دستگاه برش مکعبی برای بررسی ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی آنها را شرح می‌دهد.

### مقدمه

در هنگام وقوع زلزله، آسیب‌های گسترده‌ای بر ساختمان‌ها و سازه‌ها به علت وقوع روانگرایی ماسه‌ها وارد می‌شود. سیمانی کردن مصنوعی ماسه‌های ته نشین شده می‌تواند باعث کاهش آسیب‌های قابل توجهی که در وقوع زلزله انتظار می‌رود، شود که در نتیجه موجب حفظ ساختمان‌های مهم از خراب شدن می‌شود. با این وجود مطالعات زیادی انجام شده است، که در آن‌ها حرکت سیکلی ماسه‌های سیمانی شده را در هنگام وقوع پدیده پیچیده روانگرایی مورد بررسی قرار داده است. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات می‌توان گفت که نمونه‌های تحت فشارهای محدود کننده بالا، رفتاری فشاری همراه با اضافه فشار آب حفره‌ای مثبت از خود نشان می‌دهند، با وجودی که نمونه‌های سیمانی شده و سیمانی نشده تحت فشارهای محدود کننده کم از خود رفتار اتساعی با فشار آب‌حفره‌ای منفی نشان می‌دهند. هدف از انجام این مقاله بررسی اثرات مثبت سیمان‌تاسیون بر رفتار مکانیکی مصالح و همچنین شناخت و بررسی ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی مصالح تحت بارگذاری سیکلی می‌باشد که در ادامه به توضیح آن پرداخته شده است.

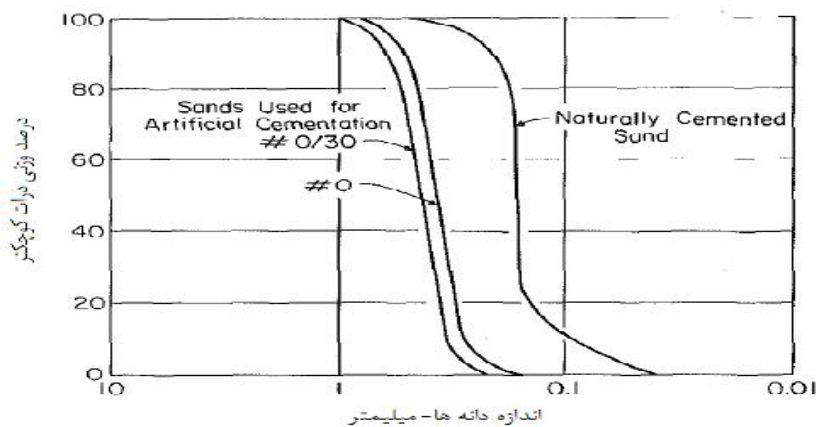
### شرح آزمایش

این مقاله شامل نتایج ۲۰ آزمایش سه محوری سیکلی بر روی ماسه سیمان‌ته شده طبیعی، بیشتر از ۱۰۰ آزمایش سه محوری سیکلیک بر روی ماسه سیمان‌ته شده مصنوعی و ۵۰ آزمایش مکعبی سیکلی بر ماسه سیمان‌ته شده مصنوعی می‌باشد.

### ویژگی‌های ماسه مورد آزمایش

دانه بندی ماسه‌های سیمانی شده طبیعی در شکل ۱ نشان داده شده است. ماسه‌ها شامل دانه‌هایی گرد گوشه و با دانه بندی یکنواخت هستند که آن‌ها توسط اکسید آهن سیمانی شده‌اند. وزن مخصوص میانگین ماسه‌ها  $16/2 \frac{kN}{m^3}$ ، چسبندگی  $25 \frac{kN}{m^2}$  و زاویه اصطکاک داخلی  $38^\circ$

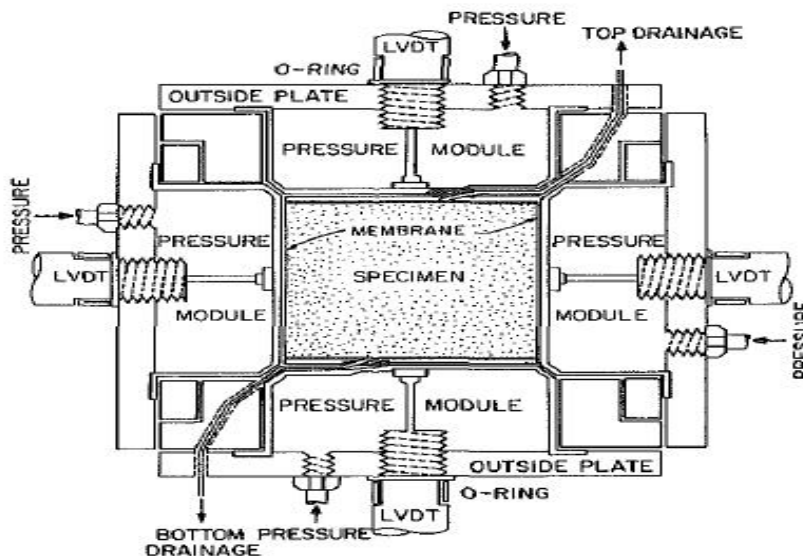
می باشد. ماسه های سیمانی شده مصنوعی با مخلوط کردن مقدار مشخصی سیمان پرتلند نوع ۲ در واحد وزن و مقداری ماسه ساخته می شوند. در این آزمایش از دو نوع ماسه با دانه بندی بسیار نزدیک به هم استفاده شده است. بهبود بخشی به نمونه ها با فرو کردن آن ها در آب مقطر انجام می شود. مدت زمان بهبود بخشی به طور معمول ۱۴ روز می باشد.



شکل ۱: منحنی دانه بندی برای ماسه های مورد آزمایش

### دستگاه آزمایش مکعبی

دستگاه سه بعدی مکعبی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مقاله، از این دستگاه جهت اندازه گیری بارگذاری دینامیکی و فشار آب منفذی استفاده شده است. تغییر شکل های اطراف نمونه به وسیله LVDT's که به مدول های فشاری چسبیده شده اند، بررسی می شود. برای تضمین اینکه سیستم در انتها نتایج صحیحی را از آزمایش حاصل کند، حدود ۱۰۰ آزمایش کالیبراسیون انجام شده است. در حقیقت به دلیل اینکه تغییر شکل در شش جهت نمونه اندازه گیری می شود، می توان به وسیله ابزار آلات مرسوم تغییرات حجم را به صورت مستقل اندازه گیری کرد. در تمام حالات آزمایش مکعبی، دستگاه به خوبی حالت روانگرایی اولیه را نشان می دهد. بارگذاری تنش و اطلاعات به دست آمده در دستگاه مکعبی به طور کامل توسط ریز کامپیوتر کنترل می شود که موجب توصیفی صحیح از مسیرهای پیچیده تنش و تجزیه و تحلیل راحت اطلاعات به دست آمده می شود.

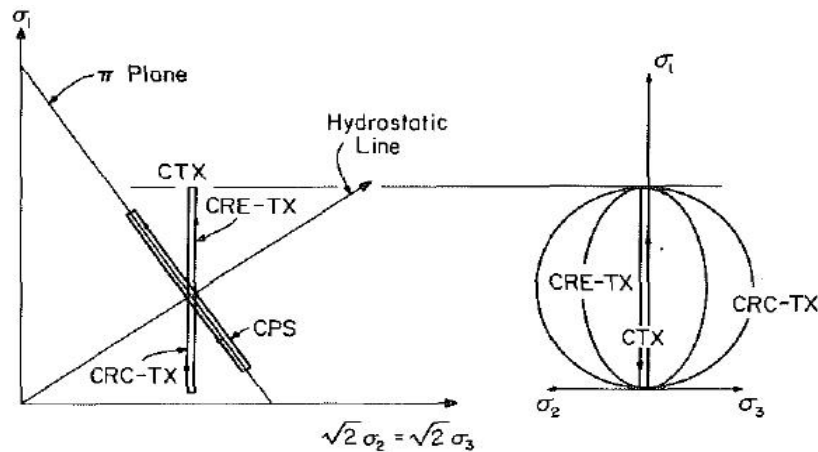


شکل ۲: نمایش جعبه برش مکعبی

### مسیرهای تنش

در آزمایش های مکعبی مسیرهای تنش شامل مدل هایی است که متاثر از عبور امواج در خاک از یک بعد و آن هایی که متاثر از بارگذاری و امواج در همه جهات از خاک می باشد. تقسیم بندی ها عبارتند از: مدل های آزمایش بارگذاری سیکلی سه محوری معمول (CTX) و بارگذاری

برش خالص سیکلی (CPS). در آزمایش برش خالص تغییرات در مقدار تنش عمودی در حین اعمال سیکل های تنش وجود ندارد که این موضوع در مورد آزمایش سه محوری برقرار نیست. شکل ۳ مسیرهای تنش مربوط به CPS و CTX را نشان می دهد. یکی از مسیرهای تنش مربوط به مسیر بیضوی است که به وسیله CRE نشان داده شده است. پس وند TX نشان دهنده این است که بارگذاری کامل انجام شده است. آزمایش CRE-TX برای حالتی است که در آن امواج متعددی از زلزله و پاسخ های آن ها در یک محور دوبار تکرار می شوند. نوع دوم بارگذاری- بارگذاری همه جهته- در شکل ۳ نشان داده شده است که مسیر تنش دایره ای یا آزمایش CRC-TX نامیده می شود. این آزمایش مشابه با حالت CRE-TX می باشد ولی بارگذاری های ماکزیمم در جهت محورهای عمودی و افقی در حین بارگذاری سیکلیک یکسان است.



شکل ۳: مسیرهای تنش مورد استفاده در آزمایش های سیکلی

## تعریف تنش

تنش معمولاً در قالب نرخ ماکزیمم تنش به کار رفته در سطوح افقی به عمودی در بارگذاری سیکلیک در فشار های محدود شونده به کار می رود. در این مقاله، این مقدار به نرخ تنش برشی سیکلیک اکتاهدرال ماکزیمم (oct) به تنش عمودی اکتاهدرال (oct) یا  $\frac{T_{oct}}{\sigma_{oct}}$  اصلاح شده است.

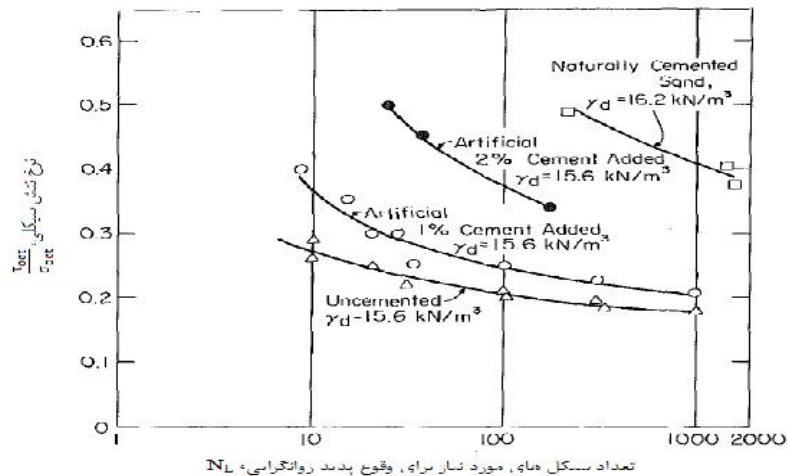
## روانگرایی ماسه سیمانی شده طبیعی

چون ماسه سیمانی شده طبیعی به آسانی شکسته می شود می توان گفت که در مقابل روانگرایی نسبت به ماسه سیمانی نشده مقاوم است. نرخ تنش سیکلی اکتاهدرال برای آزمایش های روانگرایی در مقابل تعداد سیکل هایی که برای رسیدن به روانگرایی اولیه مورد نیاز است، در شکل ۴ کشیده شده است. ماسه های سیمانی شده طبیعی نیاز به سطح تنش و تعداد سیکل های بارگذاری خاصی برای رسیدن به روانگرایی دارند که برای هر زلزله متفاوت است و مقدار آن ها نسبت به ماسه های سیمانی نشده بیشتر است.

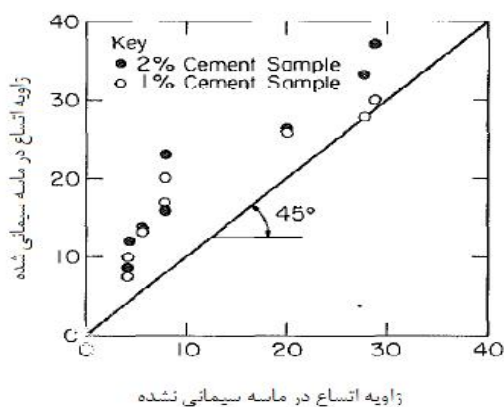
## ارتباط بین سیماناسیون و دانسیته در ماسه های سیمانی شده مصنوعی

در ماسه های سیمانی نشده تعریف روشنی از دانسیته داریم هرچند که مشکلات تجربی برای محاسبه آن نیز وجود دارد ولی در ماسه های سیمانی شده به علت اینکه راهی برای محاسبه تراکم نسبی وجود ندارد، با شرایط سختی رو به رو هستیم. برای محاسبه تراکم نسبی در ماسه های سیمانی شده باید ذرات خاک را از هم جدا کنیم که این کار منجر به شکست مصالح سیمانی شده، افزایش مواد ریزدانه به توده خاک غیردانه ای و جدا شدن دانه ها می شود. به علت این مساله در این مقاله به جای به کارگیری از دانسیته نسبی برای نمونه های مصنوعی سیمانته شده، از وزن مخصوص خشک به عنوان اساس مقایسه استفاده می شود.

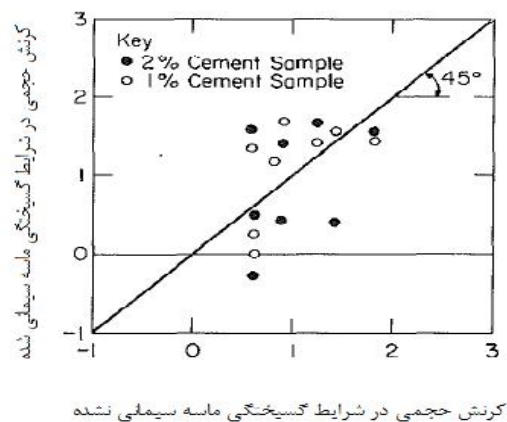
شکل ۵ و ۶ نتایج حاصل از یک سری آزمایشات زهکشی شده را نشان می دهد. بنابراین با مقایسه زاویه اتساع ماکزیمم (با استفاده از شیب منحنی تغییرات حجم در مقابل کرنش محوری) و تغییرات حجم در حالت گسیختگی به ترتیب برای ماسه های سیمانی شده و سیمانی نشده نتایج گویای این مطلب است که تغییرات حجم در حالت گسیختگی در حالت ماسه سیمانی نشده و سیمانی شده با ۱ یا ۲ درصد سیمان برابر است. می توان گفت که زاویه اتساع ماکزیمم در ماسه سیمانی شده مقدار بیشتری نسبت به ماسه سیمانی نشده دارد. از این مطلب می توان نتیجه گرفت که به ازای یک مقدار دانسیته برای ماسه سیمانی شده و سیمانی نشده، هر دو تغییرات حجمی مشابهی را در حالت گسیختگی متحمل می شوند اگر چه تغییرات حجم در ماسه ی سیمانی شده نسبت به ماسه های سیمانی نشده در رسیدن به گسیختگی در آزمایش برش بالاتر است.



شکل ۴: منحنی های مقاومت سیکی برای ماسه های سیمانی شده در آزمایش های سه محوری



شکل ۵: زاویه اتساع ماسه سیمانی نشده در مقابل ماسه سیمانی شده مصنوعی با ۱ یا ۲ درصد سیمان



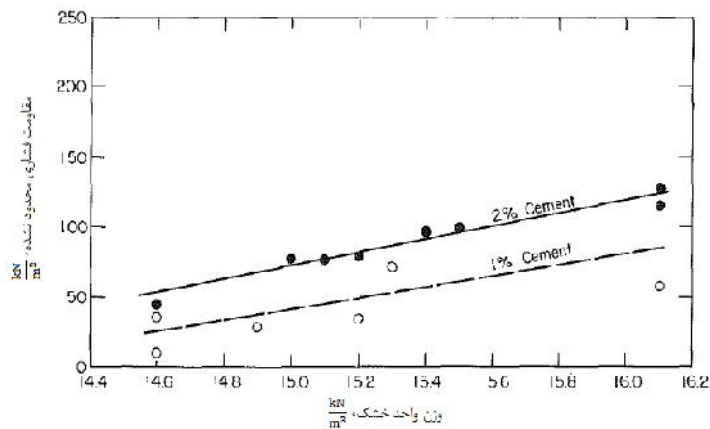
شکل ۶: تغییرات حجمی ماسه سیمانی نشده در مقابل ماسه سیمانی شده مصنوعی با ۱ یا ۲ درصد سیمان

می توان گفت که هرچه نمونه متراکم تر است، سیمانتاسیون بیشتری دارد و از این رو وزن مخصوص و سیمانتاسیون پارامترهایی وابسته به هم می باشند. برای مثال در شکل ۷ مقاومت فشاری محدود نشده ( $UCS$ ) برای ماسه سیمانی شده بهبود یافته به مدت ۱۴ روز در مقابل وزن مخصوص خشک رسم شده است و همان طور که دیده می شود با بالا رفتن  $UCS$ ، وزن مخصوص نیز افزایش می یابد. دلیل آن را می توان این گونه توجیه کرد که وضعیت متراکم تر، موجب می شود که سیمانتاسیون اثر بیشتری داشته باشد و در نتیجه مقدار سیمان بیشتر است. به دلیل آن که نمونه متراکم تر وزن مخصوص بیشتری دارد و بنابراین نیاز به سیمان بیشتری برای رسیدن به درصد سیمان در واحد وزن معینی دارد. بنابراین دانستن مقدار سیمان جهت تعیین مقاومت یا سطح سیمانتاسیون کافی نیست بلکه باید دانسیته آن را نیز بدانیم. شکل ۷ مقادیر  $UCS$  را که برای محاسبه میزان سیمان مصنوعی نمونه ها در این مقاله استفاده شده است را در زمان بهبود ۱۴ روزه نشان می دهد.

### تأثیر سیمانتاسیون بر مقاومت روانگرایی ماسه های همکن تحت مسیرهای تنش سه محوری

شکل ۴ منحنی های مقاومت سیکی برای آزمایش های انجام شده سه محوری معمول برای ماسه های سیمانی شده مصنوعی در مقایسه با ماسه های سیمانی شده طبیعی و نمونه های سیمانی نشده را نشان می دهد. نتایج حالتی را که ماسه سیمانته نشده و یا ماسه سیمانی شده با ۱ یا ۲ درصد سیمان پرتلند در حالتی که نمونه ها برای مدت ۱۴ روز بهبود یافته اند، را نشان می دهد. تمام نمونه های خاکی وزن مخصوص خشکی در حدود  $15/6 \frac{kN}{m^3}$  دارند و خاک های سیمانی نشده دانسیته نسبی ۵۵٪ دارند. در حقیقت، ماسه با سیمان ۲٪ نیاز به بارگذاری لرزه ای بسیار بزرگی دارد تا روانگرایی در آن به وقوع بپیوندد.

ماسه با ۱٪ سیمان مقاومت بالاتری را نسبت به ماسه سیمانی نشده در شرایطی که تنش در بالاترین مقدار و تعداد سیکل ها برای روانگرایی در کمترین مقدار است، را نشان می دهد. با کاهش تنش و تعداد سیکل های لازم برای وقوع روانگرایی، منحنی مقاومت سیکلی خاک به حالت ماسه سیمانی نشده نزدیک می شود.

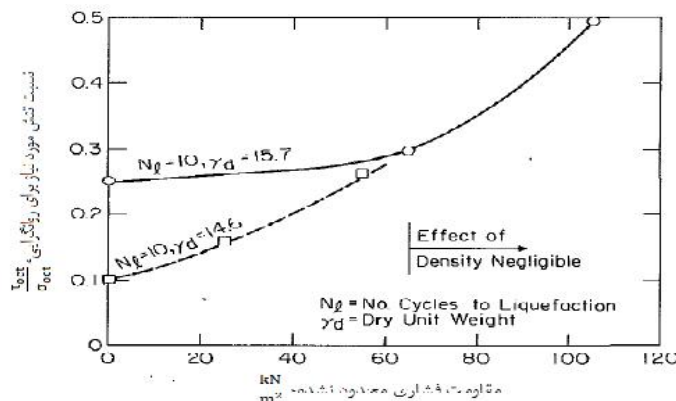


شکل ۷: مقاومت فشاری محدود نشده ماسه های سیمانی شده مصنوعی به صورت تابعی از دانسیته

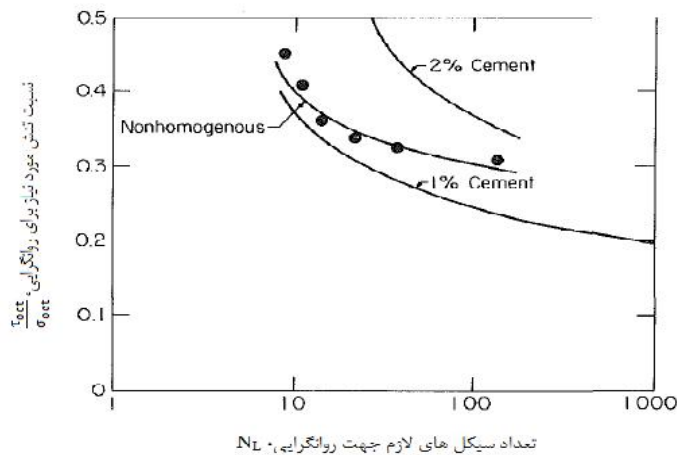
تاثیر وزن مخصوص نسبی و سیمانتاسیون بر مقاومت روانگرایی در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل، نرخ تنش اکتاهدرال سیکلی مورد نیاز برای روانگرایی در ۱۰ سیکل را در مقابل UCS نشان داده که برای دو وزن مخصوص  $14/6 \frac{kN}{m^3}$  و  $15/6 \frac{kN}{m^3}$  بررسی صورت گرفته است. همان طور که انتظار می رود نتایج نشان می دهد که مقاومت روانگرایی با افزایش UCS افزایش می یابد و نیز وزن مخصوص تاثیر زیادی بر UCS پایین، می گذارد و نیز می توان نتیجه گرفت که در شرایطی که UCS به مقدار  $60 \frac{kN}{m^2}$  افزایش یابد، تاثیر وزن مخصوص کم می شود ولی کاهش در مقدار UCS، موجب افزایش تاثیر وزن مخصوص می شود. ماسه های سیمانی شده با  $100 \frac{kN}{m^2}$  UCS برای وقوع روانگرایی نیاز به تنشی دارند که فقط در زلزله های بزرگ ایجاد می شود.

### تاثیر ناهمگنی در سیمانتاسیون بر مقاومت روانگرایی ماسه های سیمانی شده

برای تعیین تاثیر ناهمگنی بر واکنش ماسه های سیمانی شده باید یک سری آزمایش های سه محوری مخصوص انجام بگیرد. در این حالت یک نمونه مخلوط شده با ۷ سانتی متر لایه سیمانی ۲٪ و ۱ سانتی متر لایه سیمانی ۱٪ به کار گرفته شده است. در شکل ۹ منحنی مقاومت سیکلی برای ماسه ناهمگن در امتداد ماسه های سیمانی شده همگن ۱٪ و ۲٪ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود منحنی های مقاومت برای دو لایه ماسه همگن با ماسه غیر همگن در مجاورت هم قرار دارند (هم مرز هستند). هر چند که نحوه تغییرات داده های ناهمگن ماسه با سایر نمونه ها یکسان نمی باشد. در نسبت های بالای تنش، مقاومت لایه ماسه ناهمگن نزدیک به لایه ماسه ای با سیمان ۱٪ است در حالی که در نرخ های پایین تنش، مقاومت لایه ماسه ناهمگن تمایل به نزدیک شدن به سیمان ۲٪ دارد. می توان نتیجه گرفت که تحت بارگذاری های بیشتر، لایه ماسه ای با سیمان ۱٪ نقش مهمی را در کاهش مقاومت مخلوط ایفا می کند در حالی که در بارگذاری های معمولی لایه ماسه ای با سیمان ۱٪ تاثیر کمی بر مخلوط می گذارد. بر اساس نتایج به دست آمده می توان گفت که ضعیف ترین لایه سیمانی شده عملکرد غالب مخلوط ماسه سیمانی شده را کنترل می کند.



شکل ۸: ارتباط بین نسبت تنش روانگرایی برای دانسیته های مختلف و مقاومت های محدود نشده ماسه



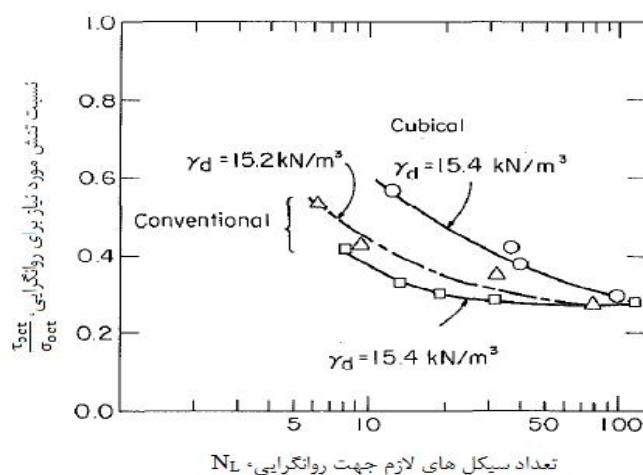
شکل ۹: تاثیر ناهمگنی بر ماسه های سیمانی شده بر منحنی های مقاومت سیکلی

### بررسی رفتار ماسه سیمانی شده تحت بارگذاری سیکلیک در جعبه برش مکعبی

گام اول در آزمایش جعبه برش مکعبی، بارگذاری ماسه سیمانی شده است که باید با مسیرهای تنش مشابهی که در آزمایش سه محوری سیکلیک معمولی به کار گرفته شده است، انجام شود. بنابراین نتایج حاصل از این دو دستگاه را می توان مقایسه کرد. در شکل ۱۰ منحنی های مقاومت سیکلیک آزمایش سه محوری مکعبی بر روی ماسه و نتایج نمونه های ماسه ای حاصل شده از آزمایش سه محوری سیکلیک معمولی با هم مقایسه شده اند. وزن مخصوص برای نمونه های ماسه ای با هم یکی هستند و در تمام نمونه ها میزان ۱٪ سیمان برای سیمانتاسیون در نظر گرفته شده است. نحوه تغییرات منحنی های مقاومت سیکلیک در تمام حالات یکسان است ولی مقاومت های حاصل شده از دستگاه مکعبی نسبت به مقاومت های سه محوری بیشتر است. بیشترین مقدار تفاوت در نرخ های بالای تنش به وجود می آید و این تفاوت با کاهش نرخ تنش کاهش می یابد. این نکته حائز اهمیت است که در دستگاه مکعبی با داشتن سطح بارگذاری قابل تغییر، این امکان فراهم آورده می شود که تمرکز تنش کمتری در نمونه های مکعبی برخلاف شرایطی که در دستگاه سه محوری برقرار است، داشته باشد. بنابراین نمونه ها در دستگاه مکعبی احتمال کمتری دارند که به طور نا به هنگام گسیخته شوند که علت آن را می توان تاثیر تمرکز تنش دانست.

### تاثیر مسیر تنش بر مقاومت روانگرایی ماسه سیمانته شده

در آزمایش با جعبه برش مکعبی، دو نوع بارگذاری به کار گرفته شده است و می تواند گذر امواج لرزه ای از یک بعد، مسیر آزمایش سه محوری معمولی و مسیر برش خالص را تخمین بزند. منحنی های مقاومت سیکلیک برای هر دو آزمایش در شرایط ماسه ای با سیمان ۲٪ را در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بارگذاری CPS همیشه مقدار مقاومت بیشتری را نسبت به حالت CTX نشان می دهد.

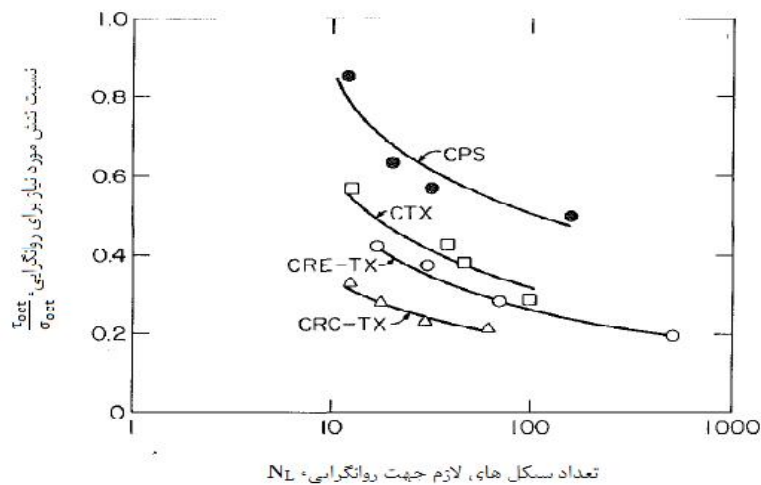


شکل ۱۰: مقایسه نتایج آزمایش های مکعبی با مدل سازی بارگذاری سه محوری سیکلیک و آزمایش های سه محوری سیکلیک مرسوم

که احتمالاً به علت این است که مسیر CTX منجر به افزایش فشار مثبت میان منفذی در حین بارگذاری می شود. مسیر های تنش ناشی از بارگذاری همه جهته مانند CRC-TX و CRE-TX منجر به کاهش مقاومت روانگرایی می شوند. علاوه بر آن می توان نتیجه گرفت که وزن



مخصوص تاثیر کمی بر تغییرات مقاومت روانگرایی دارد و بهتر است که اثر آزمایش CRC-TX در نظر گرفته شود چون به دلیل تغییرات مساوی تنش در تمام نقاط نمونه در این محیط، ضعیف ترین صفحه در نمونه کنترل کننده رفتار کلی است.



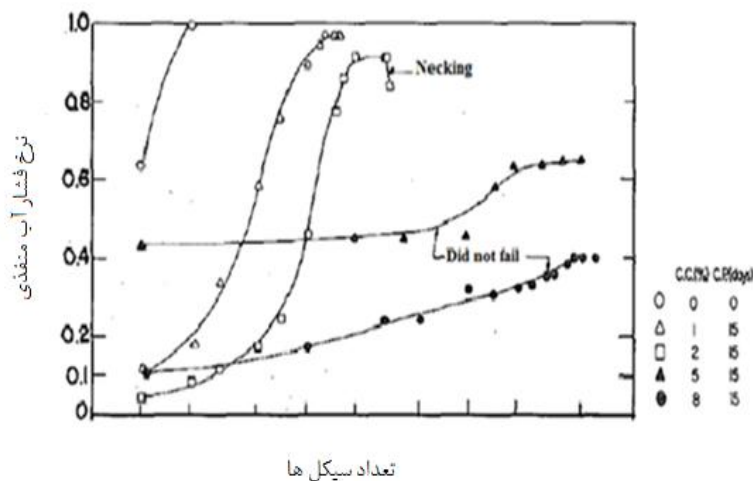
شکل ۱۱: مقایسه نتایج آزمایش برش سیکلی مکعبی با مسیره‌های مختلف تنش (وزن مخصوص خشک =  $15/4kN/m^3$ )

### بررسی تغییرات فشار میان منفذی در ماسه سیمانی شده

برای مشاهده تغییرات فشار میان منفذی در ماسه سیمانی شده استفاده از نمودارهای بی بعد روش رایجی است که توسط Martin and Seed (1976) پیشنهاد شده است. فشار میان منفذی در برابر تعداد سیکل های بارگذاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. محدوده تغییرات متغیرها در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱۲ منحنی های بی بعد شده فشار منفذی را برای تمام آزمایش ها در ماسه سیمانی شده نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که سیمانی کردن خاک ها موجب کاهش فشار میان منفذی و همچنین کاهش نشست نسبت به خاک های سیمانی نشده می شوند و در نتیجه در مقابل روانگرایی مقاومت بهتری را از خود نشان می دهند.

جدول ۱: معرفی متغیرها و مقادیر آن ها در آزمایش بارگذاری سیکلی (Martin and Seed, 1976)

متغیر	محدوده تغییرات	نمادها	واحدها
جزء سیمانی	۱، ۲، ۵، ۸	CC	%
مدت زمان بهبود یافتگی		CP	days
فشار محدود کننده موثر		$\sigma_0$	kPa



شکل ۱۲: تاثیر اجزای سیمانی بر نرخ فشار آب میان منفذی

ماسه های سیمانی شده ویژگی های منحصر به فردی نسبت به ماسه های سیمانی نشده دارند. زمانی که ماسه های سیمانی شده اشباع در معرض بارگذاری سیکلی قرار بگیرند، می توانند روانگرا شوند ولی مقاومت آن ها در مقابل روانگرایی نسبت به ماسه های سیمانی نشده بیشتر است. هدف از این مقاله تلاش برای روشن ساختن نقش سیماناسیون بر مقاومت روانگرایی ماسه ها است. نتایج حاصل از آزمایش ها در ادامه ارائه شده است.

- افزایش وزن مخصوص و سیماناسیون تاثیر مشابهی بر مقاومت روانگرایی می گذارد. با این وجود زمانی که سیماناسیون به یک حدی بحرانی برسد، موجب می شود که تاثیر وزن مخصوص از بین برود. با توجه به نتایج این مقاله می توان گفت که در UCS برابر با  $۶۰ \frac{kN}{m^2}$  وزن های مخصوص متفاوت تاثیر کمی بر رفتار مخلوط ماسه ای می گذارند.
- با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش ها می توان گفت که در شرایطی که UCS ماسه به  $۱۰۰ \frac{kN}{m^2}$  افزایش می یابد، خاک قابلیت روانگرایی ندارد.
- وجود لایه ضعیف در ماسه ی سیمانته شده در یک توده قوی تر موجب کاهش مقاومت روانگرایی می شود و این اثر در سطوح بالای تنش، اثر بیشتری دارد.
- آزمایش های انجام شده در جعبه برش تنش هایی را که موجب روانگرایی می شوند را ۲۵-۳۰٪ بزرگتر از نتایجی که از آزمایش های سه محوری معمول به دست آمده اند، نشان داده است.
- به ازای تعداد یکسانی از سیکل های بارگذاری جهت وقوع روانگرایی، که در جعبه برش مکعبی به کار گرفته شده است، نسبت های تنشی که تحت مسیرهای تنش برشی خالص منجر به روانگرایی شده اند حدود ۳۵٪ بزرگتر از حالتی است که از مسیر تنش آزمایش سه محوری مرسوم استفاده شده است.
- از نتایج آزمایش فشار آب منفذی می توان این گونه نتیجه گرفت که سیماناسیون ماسه ها، موجب کاهش فشار آب میان منفذی شده و در نتیجه موجب می شود که خاک در مقابل روانگرایی مقاومت بهتری را از خود نشان دهد.

## مراجع

- Amini Y and Hamidi A (2014) Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*
- Chang T and Chang H (2010) Improvement of liquefaction resistance of reclaimed sand in water: an experimental study, *Journal of GeoEngineering*, 5(2): 39-49
- Clough G, Iwabuchi J, Rad N and Kuppasamy T (1989) Influence of cementation on liquefaction of sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(8): 1102-1117
- DaFonseca A, Cruz R and Consoli N (2009) Strength properties of sandy soil-cement admixtures, *Geotechnical and geological engineering*, 27(6): 681-686
- DeJong J, Fritzes M and Nüsslein K (2006) Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11): 1381-1392
- Hamidi A and Haeri S (2008) Stiffness and deformation characteristics of a cemented gravelly sand, *International Journal of Civil Engineering*, 6(3): 159-173
- Montoya B, Dejang J and Boulanger R (2012) Seismic Response of Liquefiable Sand Improved by Microbial Induced Calcite Precipitation, *B.M Montoya Geotechnic*, North Carolina State University, Raleigh
- Porcino D, Marciandò V and Granata R (2012) Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10): 1117-1133
- Reddy K and Saxena (1992) Liquefaction resistance of cemented sands under multidirectional cyclic loading, *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6): 989-993
- Saxena S, Reddy K and Avramidis A (1988) Liquefaction resistance of artificially cemented sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(12): 1395-1413