

مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار سیکلی و پتانسیل تولید فشار آب حفره ای ماسه کربناتی بوشهر

یاسر جعفریان^{۱*} و مهران رخشنده^۲

۱. استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

yjafaranm@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۱۰/۱۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۶/۲۳]

چکیده- روانگرایی پدیده‌ایست که در اثر گسترش اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک‌های اشباع موقعی که تحت بارگذاری سیکلی (تناوبی) قرار می‌گیرند ایجاد می‌شود. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای روی رفتار سیکلی ماسه‌های سیلیسی صورت گرفته است اما رفتار سیکلی ماسه-های کربناتی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. به همین منظور در این پژوهش چندین آزمایش سه محوری سیکلی کرنش-کنترل با تحکیم همسان و ناهمسان روی ماسه کربناتی بوشهر انجام شده است. پارامترهایی که اثر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: تراکم نسبی و تنش محصورکننده. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت روانگرایی با افزایش تراکم نسبی و تنش محصور کننده افزایش می‌یابد. علاوه بر این با انجام آزمایش‌های چندمرحله‌ای مقدار کرنش آستانه برای این ماسه ارزیابی و با نتایج دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. پتانسیل تولید فشار آب حفره‌ای برای این ماسه کربناتی در فضای تعداد سیکل نرمال شده و انرژی کرنشی با محدوده‌های پیشنهادی دیگر پژوهشگران، که برای ماسه‌های سیلیکاتی ارائه شده، مقایسه شده است.

واژگان کلیدی- روانگرایی، سه محوری سیکلی، ماسه کربناتی، کرنش آستانه برشی.

۱- مقدمه

روانگرایی پدیده‌ای است که هنگام وقوع زلزله در خاک‌های سست اشباع اتفاق می‌افتد. نیروی ارتعاشی زلزله منجر به تغییر چیدمان ذرات خاک سست در کنار یکدیگر می‌شود و در حالت زهکشی نشده باعث می‌شود که ذرات تمایل داشته باشند تا در وضعیت جدید متراکم‌تر از وضعیت قبلی خود قرار گیرند و فضای کمتری را اشغال کنند. این امر سبب می‌شود که فشار آب منفذی درون ماسه زیاد و فشار بین ذره‌ای کم شود. زمانی که این اضافه فشار برابر با تنش موثر اولیه خاک قبل از وقوع زلزله شود اصطلاحاً پدیده روانگرایی رخ داده است. به سبب همین کاهش تنش موثر، خاک مقاومت خود را از دست

داده و توان تحمل بار سازه‌هایی که روی آن‌ها قرار دارند را نخواهد داشت.

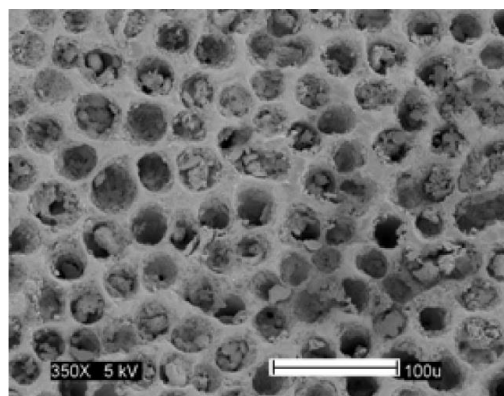
پس از وقوع زلزله سال ۱۹۶۴ نیگاتا و خرابی‌های چشمگیر بوجود آمده حاصل از آن، بسیاری از پژوهشگران جنبه‌های مختلف پدیده روانگرایی را با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکلی، برش ساده سیکلی و استوانه توخالی سیکلی مورد مطالعه قرار دادند که نتیجه بسیاری از این مطالعات ثابت می‌کند که مقاومت روانگرایی نمونه‌های ماسه‌ای بازسازی شده در آزمایشگاه تحت تاثیر عواملی چون تنش محصورکننده اولیه، شدت ارتعاش یا تنش برشی سیکلی، تعداد سیکل‌های تنش سیکلی و نسبت تخلخل یا تراکم نسبی قرار دارد.

سپس مطالعه آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش شرح داده شده و در ادامه نتایج به دست آمده در ارتباط با پتانسیل روانگرایی و تولید اضافه فشار آب حفره‌ای ماسه کربناتی بوشهر ارائه می‌شود. با توجه به محدوده‌های ارائه شده برای ماسه‌های سیلیکاتی به وسیله‌ی پژوهشگران پیشین، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده با کارهای گذشته مقایسه می‌شود.

۲- مطالعات پیشین

پژوهش صورت گرفته به وسیله سیلور و سید [۲] یکی از نخستین مطالعاتی بود که نشان داد کرنش برشی سیکلی بیشتر از تنش برشی سیکلی تراکم و تغییر حجم ماسه‌ها و احتمالاً پاسخ فشار آب منفذی را کنترل می‌کند. سید [۳] راهنمای کلی مبنی بر کاهش نسبت مقاومت سیکلی بر اثر فشار محدودکننده در محدوده ۱۵۰ تا ۸۰۰ کیلو پاسکال ارائه داد. نتایج کاسترو و پولوس [۴] نیز به کاهش نسبت مقاومت سیکلی منجر به روانگرایی بر اثر افزایش فشار محدودکننده در محدوده ۵۰ تا ۶۰۰ کیلو پاسکال اشاره دارد. وید و همکاران [۵] با انجام آزمایش‌های برش ساده سیکلی زهکشی نشده با فشار محدودکننده بالا تا ۲۵۰۰ کیلو پاسکال روی ماسه نشان دادند که افزایش فشار محدودکننده سبب کاهش نسبت مقاومت سیکلی به شکل قابل ملاحظه‌ای می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که افزایش تراکم نسبی سبب افزایش مقاومت روانگرایی می‌شود. براندس [۶] با انجام یک سری آزمایش برش ساده مونوتونیک و سیکلی روی چند نمونه ماسه کربناتی و سیلیسی نشان داد که افزایش فشار محدودکننده و تراکم نسبی به ترتیب سبب کاهش و افزایش نسبت مقاومت سیکلی می‌شود و همچنین مقاومت اصطکاکی بسیج شده و مقاومت سیکلی ماسه‌های کربناتی آزمایش شده بیش‌تر از ماسه‌های سیلیسی آزمایش شده است. درخشندی و همکاران [۱۸] آزمایش‌های سه محوری سیکلی زهکشی نشده به صورت کنترل کرنش روی ماسه‌های مخلوط با ریزدانه‌ی پلاستیک (کائولن) انجام دادند. آنها ضمن معرفی مزایای روش کنترل کرنش نسبت به

خاک‌های ماسه‌ای کربناتی نتیجه تجزیه شیمیایی یا هوازدگی فیزیکی بخش‌هایی از موجودات زنده‌ی دریایی است. در طول تجزیه شیمیایی، کربنات کلسیم محلول، در آب دریا رسوب می‌کند. هوازدگی فیزیکی اسکلت باقیمانده جانداران دریایی از قبیل نرم تنان مثل حلزون، مرجان‌ها، جلبک‌ها و خزها را در اندازه ذرات ماسه‌ها می‌شکند. خاک‌های کربناتی دو ویژگی دارند که آن‌ها را از ماسه‌های کوارتزی متمایز می‌کند. اول آنکه ماسه‌های کربناتی دارای ذرات تیز گوشه است و دوم آنکه ذرات ماسه‌های کربناتی دارای حفره‌های بین ذره‌ای چشم‌گیر است (شکل ۱). به گونه‌ای که با وجود داشتن چگالی دانه‌های جامد بالا، وزن مخصوص خشک کمتری نسبت به ماسه‌های کوارتزی دارند. ماسه‌های کربناتی به دلیل تیز گوشگی ذرات معمولاً پتانسیل روانگرایی کمتری نسبت به ماسه‌های کوارتزی از خود نشان می‌دهند.



شکل (۱) ساختار بسیار متخلخل دانه ماسه کربناتی

از آنجایی که بسیاری از مطالعات روی ماسه‌های سیلیسی و آزمایش‌های تنش-کنترل تمرکز داشتند، در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکلی کرنش-کنترل به بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه کربناتی بوشهر پرداخته می‌شود. یکی از مزیت‌های روش کرنش کنترل نسبت به روش تنش-کنترل این است که روش اول، اثر روش آماده‌سازی نمونه روی پاسخ سیکلی خاک‌های اشباع را کمینه می‌کند [۱]. از طرفی در آزمایش کرنش-کنترل، امکان بررسی کرنش آستانه برای تولید اضافه فشار حفره‌ای وجود دارد. در بخش‌های بعدی به بررسی ادبیات فنی در حوزه پتانسیل روانگرایی و تولید فشار آب حفره‌ای خاک‌های دانه‌ای پرداخته می‌شود.

بیشتر می شود. بازیار و شرفی [۸] یک سری آزمایش استوانه توخالی سیکلی روی ماسه انجام دادند. نتایج آزمایش بیانگر این حقیقت بود که افزایش فشار محدود کننده و تراکم نسبی سبب افزایش انرژی ظرفیت می شود. آن ها هم چنین نشان دادند که افزایش فشار محدود کننده و تراکم نسبی به ترتیب باعث کاهش و افزایش نسبت تنش سیکلی می شود.

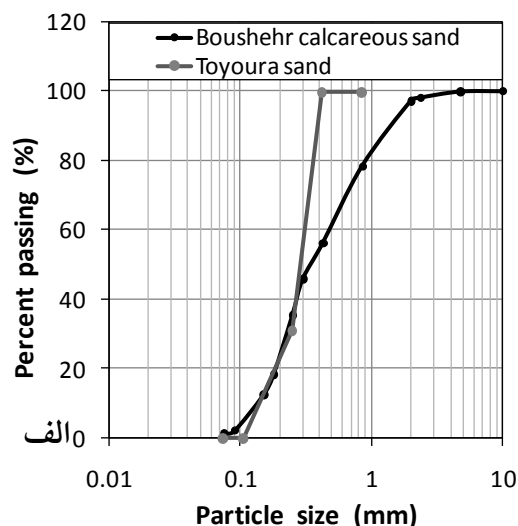
بررسی مطالعات پیشین حاکی از آن است که تراکم نسبی نمونه و تنش های اعمال شده بر آن از جمله عوامل مهم موثر بر مقاومت روانگرایی است. همچنین همان گونه که توضیح داده شد بیشتر مطالعاتی که در زمینه مقاومت روانگرایی ماسه ها صورت گرفت، روی ماسه های سیلیسی بوده و تمرکز کمتری روی ماسه های کربناتی بوده است. با توجه به وجود نهشته های گسترده ی خاک های کربناتی در جنوب کشور از جمله بوشهر و هرمز از اینرو در این پژوهش سعی بر آن است تا مقاومت روانگرایی ماسه کربناتی بوشهر در شرایط تنش و تراکم نسبی متفاوت مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج به دست آمده با نمودارهای ارائه شده به وسیله ی پژوهشگران پیشین که برای ماسه های سیلیکاتی کاربرد دارند مقایسه می شوند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

ماسه مورد استفاده در این پژوهش ماسه کربناتی ساحل بوشهر است. در شکل (۲) تصویر ماسه کربناتی بوشهر و نمودار دانه بندی آن در کنار ماسه تایورا (ماسه استاندارد ژاپن) نشان داده شده است. منحنی دانه بندی و مشخصات مکانیکی ماسه مورد استفاده نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به منحنی دانه بندی، ماسه کربناتی بوشهر به علت دانه بندی یکنواخت می تواند مستعد روانگرایی باشد. تراکم بیشینه (Dr_{max}) و کمینه (Dr_{min}) به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254 به دست آمده است.

آزمایش ها با استفاده از دستگاه سه محوری ساخت شرکت GDS کشور انگلستان، در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه

کنترل تنش اثر ریزدانه را بر کرنش آستانه سیکلی بررسی نمودند. بر اساس آن مطالعه، افزایش درصد وزنی کائولن تا ۲۰ درصد تاثیر ناچیزی بر مقدار کرنش آستانه می گذارد.



شکل (۲) (الف) مقایسه نمودار دانه بندی ماسه کربناتی بوشهر و ماسه کوارتزی تایورا (ب) عکس ماسه بوشهر

جعفریان و همکاران [۷] با انجام یک سری آزمایش های برش ساده سیکلی با استفاده از دستگاه استوانه توخالی کرنش-کنترل روی ماسه ی استاندارد ژاپن (تایورا) نشان دادند که با افزایش فشار محدود کننده، مقدار انرژی کرنشی تجمعی جذب شده در واحد حجم تا لحظه روانگرایی، W_{liq} (انرژی ظرفیت) به صورت خطی افزایش پیدا می کند و با افزایش تراکم نسبی انرژی ظرفیت به شکل غیرخطی افزایش پیدا می کند به گونه ای که با افزایش تراکم نرخ افزایش انرژی

اولیه خیلی پایین بودند به گونه ای که اثر دست خوردگی آنها روی نمونه بسیار ناچیز بوده است و تاثیر بسیار ناچیزی روی نتایج حاصل از بارگذاری در مراحل دیگر می گذاشت. در پنج مرحله اول نمونه ها تا سیکل دهم بارگذاری شدند اما در سطح کرنش آخر که خیلی بزرگ تر بود بارگذاری تا آنجا به نمونه اعمال شد که نمونه روانگرا شود. البته برای بعضی از نمونه ها که روانگرا نشدند (به علت شرایط بارگذاری عملا تنش موثر صفر نشد) بارگذاری در انتهای سیکل صدم قطع شد.



شکل (۳) نمونه آماده شده قبل از قرار دادن سلول و پر کردن سلول از آب

با توجه به محدودیت دستگاه که اجازه بارگذاری با فرکانس های بالا را نمی داد، بارگذاری با فرکانس کم و با پریودی برابر ۳۶ ثانیه صورت گرفت. البته فرکانس پایین بارگذاری تاثیری بر نتیجه آزمایش ها نمی گذارد چون مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته به وسیله دستگاه برش حلقه [۹] و سه محوری سیکلی [۱۰] نشان داد که فرکانس بارگذاری اثر ناچیزی روی مقاومت روانگرایی خاک های دانه ای دارد (شکل ۴). در شکل ۴ مشاهده می شود که محدوده وسیعی از فرکانسهای بارگذاری تاثیر بسیار کمی بر مقاومت روانگرایی ماسه دارد. همچنین پژوهش های صورت گرفته به وسیله ی [۱۶] Yasuda and Soga (شکل ۵) نیز این مسئله را تایید می کنند. بر اساس این مطالعه، نمونه های تهیه شده برای آزمایش سیکلی با فرکانس های مختلف ۰/۰۵ تا ۱ هرتز تحت بارگذاری قرار

سمنان صورت گرفتند. این آزمایش ها به صورت کرنش-کنترل انجام شدند و برای صرفه جویی در زمان و هزینه (نمونه سازی کمتر) از روش چندمرحله ای^۱ استفاده شده است. در مجموع ۱۲ آزمایش در دو تراکم نسبی و دو تنش موثر محدودکننده در شرایط تحکیم همسان و ناهمسان و هر کدام در چند مرحله انجام شد که مشخصات آن ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱) مشخصات ماسه کربناتی بوشهر

γ_{min} (g/cm ³)	γ_{max} (g/cm ³)	G _s	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)
1.4344	1.6160	2.70	0.14	0.23	0.35	0.48

۴- چگونگی انجام آزمایش ها

در این پژوهش از نمونه هایی به قطر ۳۸ میلی متر استفاده شده و روش نمونه سازی روش پاشش خشک^۲ بوده است. به دلیل آن که باید نمونه ها در پایان مرحله تحکیم به تراکم مورد نظر می رسیدند، تراکم اولیه برای نمونه سازی کمتر از مقدار نهایی بود و این مقدار اختلاف تراکم به تنش محدودکننده وابسته است که قبلا با انجام چند تست آزمایشی حدود تقریبی آن برای تنش های محدودکننده اولیه به دست آمد. در شکل ۳ نمونه آماده شده قبل از قرارگیری سلول سه محوری و پر کردن سلول از آب نشان داده شده است. پس از پایان نمونه سازی برای اشباع کردن نمونه، مقدار تقریبی ۴ لیتر آب هواگیری شده^۳ از نمونه عبور داده شد. پس از آن برای رسیدن به درجه اشباع بیش از ۹۵ درصد چند گام اشباع سازی با استفاده از پس فشار روی نمونه صورت گرفت. در پایان، نمونه ها با تنش محدودکننده مورد نظر تحت تحکیم قرار گرفتند و سپس بارگذاری چندمرحله ای اعمال شد. برای هر آزمایش از ۶ سطح کرنش مختلف استفاده شد. بارگذاری به این شکل بود که پس از هر مرحله بارگذاری یک مرحله تحکیم صورت گرفته و سپس مرحله بعدی بارگذاری صورت می گرفت. پنج سطح کرنش

1 multi stage
2 dry deposition method
3 de-aired water

گرفتند. تعداد سیکل‌های لازم برای وقوع کرنش دو دامنه ی ۵ درصد در ۲۰ سیکل بارگذاری برای نمونه‌های مختلف بسیار به هم نزدیک بود. این مسئله عدم تاثیر فرکانس بارگذاری بر مقاومت سیکلی ماسه‌ها را نشان می‌دهد. پژوهش‌گران دلیل عدم وابستگی رفتار خاک‌های دانه‌ای به فرکانس بارگذاری را عدم وجود مولفه‌های وابسته به نرخ بارگذاری (مانند

پلاستیسیته) در این خاک‌ها دانسته‌اند. تنها عامل وابسته به نرخ بارگذاری در ماسه‌های اشباع نیروی کشش سطحی آب روی دانه‌هاست. لکن به علت اینکه این عامل سهم ناچیزی در جذب انرژی و رفتار خاک به لحاظ مقدار دارد بنابراین با دقت خوبی می‌توان رفتار خاک‌های غیرچسبنده را مستقل از نرخ بار وارد شده دانست.

جدول (۲) شرایط آزمایشهای انجام شده

Test ID	Dr ₀ (%)	Dr _c (%)	Back pressure (kPa)	B value (%)	σ' _m (kPa)	α	N _L	W _{liq} (kPa)
TUC804000	53.6	84.2	130	> 96.0	400	0	-	15.201
TUC80400	71.8	77.5	130	> 95.0	40	0	52.1	1.545
TUC504000	4.3	46	160	> 98.3	400	0	-	12.803
TUC50400	45.4	53	160	> 97.5	40	0	13.1	0.609
TUC803530.2	45.1	74.4	160	> 96.8	400	0.2	-	19.021
TUC803260.4	43.5	74.5	170	> 98.9	410	0.4	-	16.504
TUC80350.2	77.9	83.3	160	> 97.8	40	0.2	19.1	0.908
TUC80320.4	41.5	48.8	160	> 98.5	40	0.4	37.1	1.448
TUC50350.2	37.5	44.4	160	> 98.1	40	0.2	12.1	0.675
TUC50320.4	43.4	49.7	160	> 95.7	40	0.4	9.1	0.576
TUC503530.2	2.6	46.3	160	> 98.7	400	0.2	-	13.538
TUC503160.4	5.7	49.7	160	> 99.7	400	0.4	-	14.241

Dr₀= تراکم نسبی نمونه قبل از مرحله تحکیم

Dr_c= تراکم نسبی نمونه پس از مرحله تحکیم

Back pressure= پس فشار در مرحله تحکیم

B value= ضریب اشباع اسکمپتون

σ'_m= تنش موثر میانگین در مرحله تحکیم

α= ضریب ناهمسانی تحکیم (تنش برشی تقسیم بر تنش موثر محدودکننده)

N_L= سیکل بارگذاری که روانگرایی در آن رخ داد

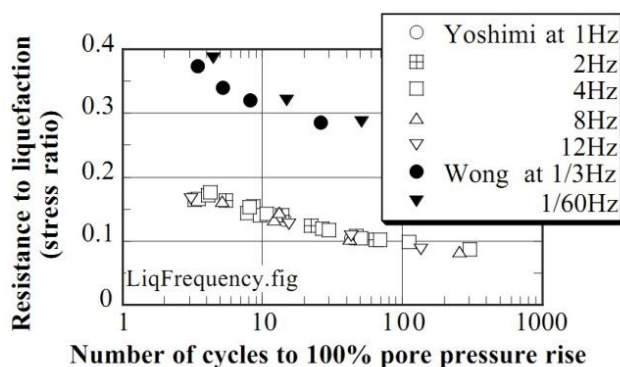
W_{liq}= انرژی کرنشی تجمعی در لحظه روانگرایی (انرژی ظرفیت)

درصد و تنش موثر همه جانبه ۴۰۰ کیلوپاسکال با تحکیم همسان است. نمودارهای (ه) تا (ح) نیز مربوط به نمونه ناهمسان تحکیم یافته با تراکم ۵۰ درصد و تنش موثر میانگین ۴۰ کیلو پاسکال است. نمودارهای (الف) و (ه) تنش انحرافی را در مقابل تعداد سیکل نشان می‌دهد و همان‌گونه که دیده می‌شود به دلیل کرنش-کنترل بودن بارگذاری، در سیکل‌های ابتدایی مقدار تنش تحمل شده به وسیله‌ی المان خاک زیاد است و با افزایش بارگذاری مقدار آن کاهش یافته و در پایان به مقدار ثابتی می‌رسد. نمودارهای (ب) و (و) لوپ‌های هیستریزس را برای دو نمونه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ (ب) مشاهده می‌شود به دلیل آنکه این نمونه در شرایط همسان تحکیم یافت، نمودار تنش - کرنش از مبدا مختصات آغاز می‌شود، اما در نمودار (و) که مربوط به نمونه ناهمسان تحکیم یافته است، بارگذاری از نقطه‌ای همراه با تنش برشی اولیه آغاز می‌شود. نمودارهای (ج) و (ز) مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی را در مقابل تعداد سیکل‌ها نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه با تنش موثر ۴۰۰ کیلوپاسکال با وجود ادامه بارگذاری تا سیکل صدم روانگرا نشده است اما نمونه دیگر پس از ۱۰ سیکل بارگذاری روانگرا شده است. نمودارهای (د) و (ح) مسیر تنش موثر را برای دو نمونه نشان می‌دهند.

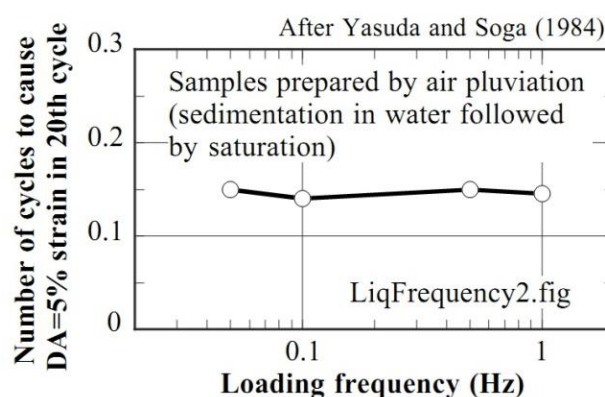
۵- تحلیل نتایج

۵-۱- نتایج اولیه

رابطه بین تنش-کرنش برای خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی به صورت لوپ‌های هیستریزس است. سطح داخلی این لوپ‌ها معادل انرژی تلف شده یا به عبارتی انرژی جذب شده به وسیله‌ی المان خاک است. سطح تجمعی این لوپ‌ها از ابتدای بارگذاری تا شروع روانگرایی معرف انرژی لازم برای روانگرا کردن المان خاک است. بدین ترتیب خاکی که انرژی بیشتری برای روانگرا شدن جذب می‌کند مقاومت روانگرایی بالاتری



شکل (۴) اثر فرکانس بارگذاری بر نمودار مقاومت روانگرایی ماسه [۱۷]



شکل (۵) اثر فرکانس بارگذاری بر نسبت تنش در ۲۰ سیکل [۱۷]

مقدار جابه‌جایی تک‌دامنه برای ۶ سطح بارگذاری مختلف به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۷، ۰/۰۱۳، ۰/۰۲۹، و ۰/۲۳۰ میلی‌متر است. ارتفاع نمونه‌ها تقریباً ۷۲ میلی‌متر بود که با توجه به ارتفاع نمونه‌ها و این که در آزمایش سه محوری زهکشی نشده روی نمونه‌های اشباع مقدار کرنش برشی ۱/۵ برابر کرنش طولی است، مقدار تقریبی کرنش برشی برای هر سطح بارگذاری تقریباً برابر با ۰/۰۰۴۲، ۰/۰۰۸۴، ۰/۰۱۴۷، ۰/۰۲۷۲، ۰/۰۶۰۸ و ۰/۵ درصد است. در شکل (۶) نتایج مربوط به آزمایش‌های TUC50320.4 و TUC804000 نشان داده شده است. نمودارهای (الف) تا (د) مربوط به نمونه با تراکم ۸۰

دارد.

برای آزمایش سه محوری سیکلی مساحت جمععی لوپ‌ها از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\Delta W = 0.5 \sum (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i}) (\varepsilon_{a,i+1} - \varepsilon_{a,i}) \quad (1)$$

که در آن σ_d و ε_a به ترتیب برابر با تنش انحرافی و کرنش محوری نمونه است.

برای ۴ نمونه همسان تحکیم یافته نمودار انرژی جذب شده در واحد حجم خاک در مقابل تعداد سیکل بارگذاری ترسیم شده است (شکل ۷). شکل‌های ۷ الف و ب به ترتیب مربوط به نمونه‌هایی با تنش موثر محدودکننده ۴۰۰ و ۴۰ کیلوپاسکال است. همان‌گونه که در هردو شکل مشاهده می‌شود نمونه‌هایی با تراکم نسبی بالاتر انرژی کرنشی بیشتری را در طول بارگذاری جذب می‌کنند. یعنی تراکم بیشتر سبب افزایش مقاومت روانگرایی می‌شود و این روند با مطالعات سایر پژوهشگران کاملاً سازگار است.

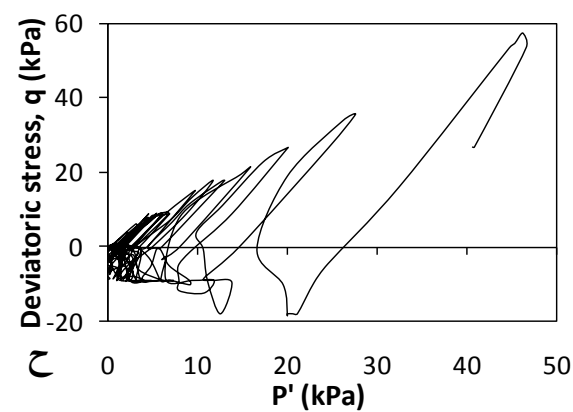
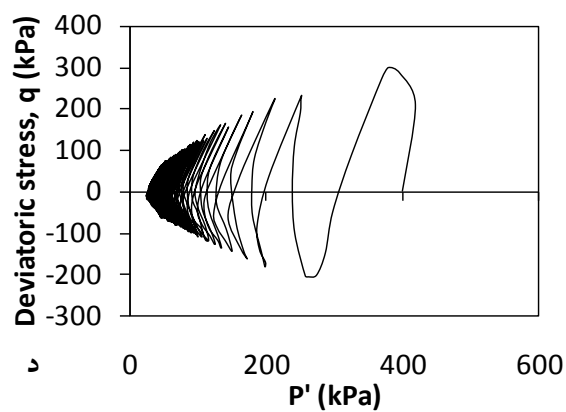
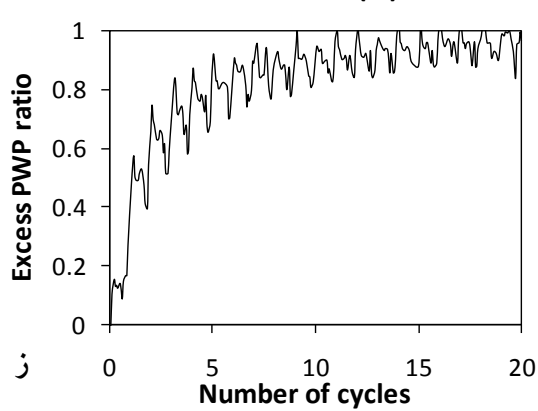
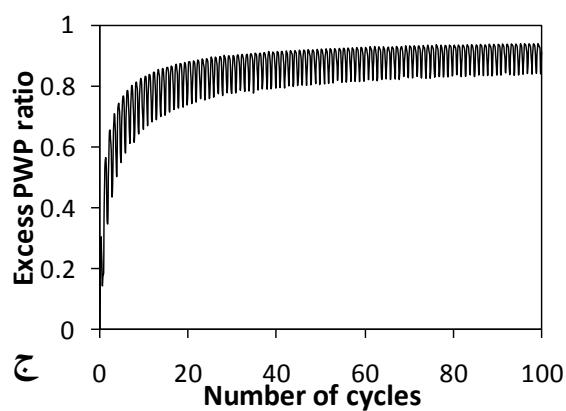
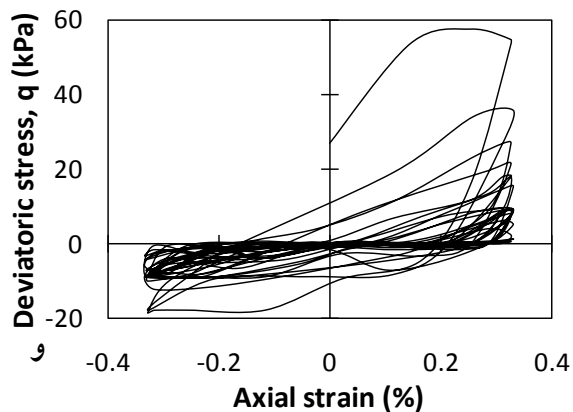
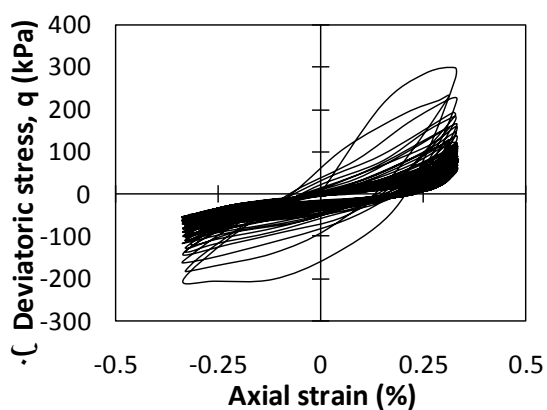
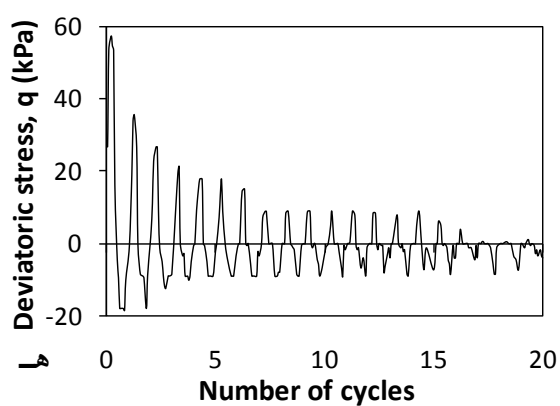
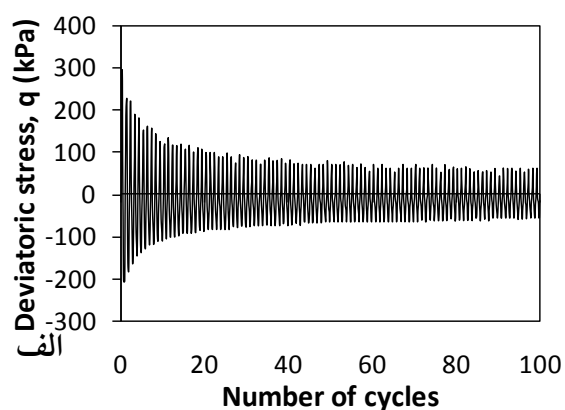
از طرفی دیگر برای نمونه‌هایی با تنش موثر میانگین اولیه ۴۰۰ کیلوپاسکال با وجود عدم روانگرایی کامل، مقدار انرژی جذب شده خیلی بیشتر از نمونه‌های روانگرا شده تحت تنش موثر ۴۰ کیلوپاسکال است و بیانگر این حقیقت است که افزایش تنش موثر سبب افزایش مقاومت روانگرایی می‌شود.

البته افزایش مقاومت روانگرایی با افزایش فشار محدودکننده در نگاه اول با نتیجه مطالعات پیشین مغایرت دارد. علت این تفاوت چگونگی محاسبه مقاومت روانگرایی با استفاده از نسبت تنش سیکلی ($CSR = \tau_{cyc} / \sigma'_{3c}$) است. در آزمایش‌های تنش-کنترل معیار تعیین مقاومت روانگرایی نسبت تنش سیکلی است. نسبت تنش سیکلی از تقسیم تنش برشی سیکلی بر تنش موثر همه جانبه اولیه به دست می‌آید. وجود تنش موثر همه جانبه در مخرج کسر سبب می‌شود که در تنش‌های همه جانبه موثر بالاتر به وجود آنکه مقدار تنش برشی سیکلی بیشتر می‌شود، مقدار CSR کاهش می‌یابد. چون مقدار افزایش تنش برشی سیکلی کمتر از مقدار افزایش تنش موثر همه جانبه

است. بنابراین از آنجا که نسبت تنش سیکلی به وسیله تنش موثر محدودکننده نرمالیزه می‌شود طبیعی است که با استفاده از این تعریف، افزایش فشار محدودکننده سبب کاهش نسبت تنش سیکلی شود. در آزمایش‌های کرنش-کنترل به دلیل ثابت بودن کرنش و متغیر بودن تنش نمی‌توان از CSR استفاده کرد چون در عمل CSR وجود ندارد. ولی اگر به جای استفاده از نسبت تنش سیکلی از تنش برشی سیکلی برای تعیین مقاومت روانگرایی استفاده شود، مشخص می‌شود همان‌گونه که افزایش فشار محدودکننده سبب افزایش انرژی کرنشی تلف شده می‌شود، سبب افزایش مقاومت روانگرایی از دیدگاه تنش سیکلی نیز می‌شود.

یکی دیگر از مزیت‌های آزمایش‌های کرنش-کنترل نسبت به آزمایش‌های تنش-کنترل، حساسیت کمتر آن‌ها برای تعیین دقیق لحظه روانگرایی است. در آزمایش‌های کرنش-کنترل چون سیکل‌های کرنش برشی با دامنه یکسان به المان خاک وارد می‌شود، مقدار دامنه تنش برشی سیکلی در سیکل‌های ابتدایی بارگذاری زیاد بوده و به مرور بر اثر بارگذاری، مدول برشی خاک کمتر می‌شود و این بدان معنی است که سطح لوپ‌های هیستریزس در سیکل‌هایی ابتدایی بیشتر از سیکل‌های پایانی است. به‌گونه‌ای که در سیکل‌های پایانی منجر به روانگرایی مقدار انرژی تلف شده در هر سیکل در مقایسه با انرژی تلف شده کل بسیار ناچیز است. بنابراین اگر یک یا حتی چند سیکل، کمتر یا بیشتر از لحظه دقیق روانگرایی انتخاب شود تغییر چندانی در مقدار انرژی ظرفیت (W_{liq}) ایجاد نمی‌شود.

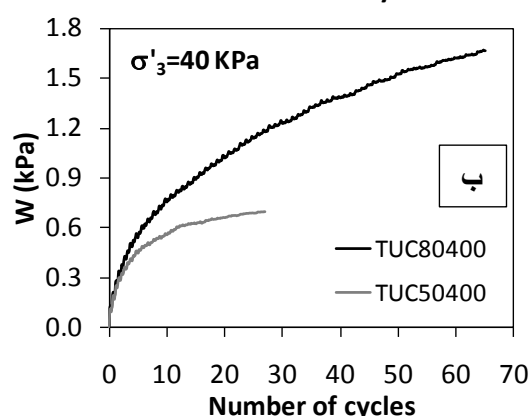
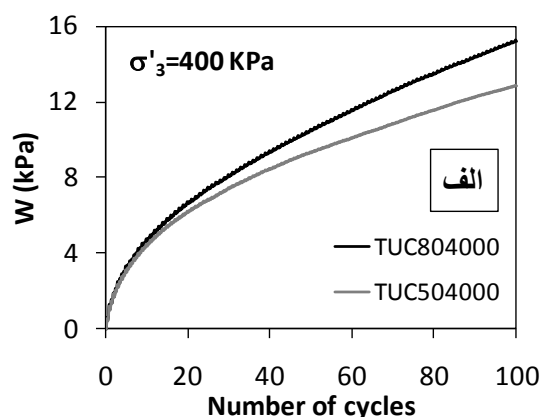
اما در روش تنش-کنترل عکس این حالت رخ می‌دهد و به علت ایجاد کرنش‌های زیاد و ناگهانی در سیکل‌های پایانی منجر به روانگرایی سطح لوپ‌های تشکیل شده در هر یک از سیکل‌های پایانی بخش قابل توجهی از مقدار انرژی ظرفیت را تشکیل می‌دهد به‌گونه‌ای که حتی انتخاب کمتر یا بیشتر یک یا حتی کسری از یک سیکل به عنوان لحظه روانگرایی منجر به اختلاف فاحشی در اندازه انرژی ظرفیت می‌شود.



شکل (۶) نتیجه آزمایشهای TUC804000 (الف تا د) و TUC50320.4 (هـ تا ح)

شکل ۸ نمودار فشار آب حفره‌ای اضافی بر حسب تعداد سیکل‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فشار آب حفره‌ای اضافی و تعداد سیکل در زمان روانگرایی برای آزمایش‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است و به همین دلیل پراکندگی زیادی در نمودار مشاهده می‌شود. توجه شود که این نمودارها تا لحظه روانگرایی ترسیم شده‌اند. برای از بین بردن این پراکندگی محور افقی و قائم نمودار نرمال می‌شوند. به این صورت که محور افقی (تعداد سیکل‌ها) بر شماره سیکل روانگرایی تقسیم و محور قائم نیز بر تنش موثر همه‌جانبه تقسیم می‌شوند تا هر دو محور بدون بعد شوند و به این ترتیب نمودار شکل (۹) حاصل می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود نمودار مربوط به ۶ آزمایش صورت گرفته محدوده نسبتاً باریکی را اشغال کرده‌اند.

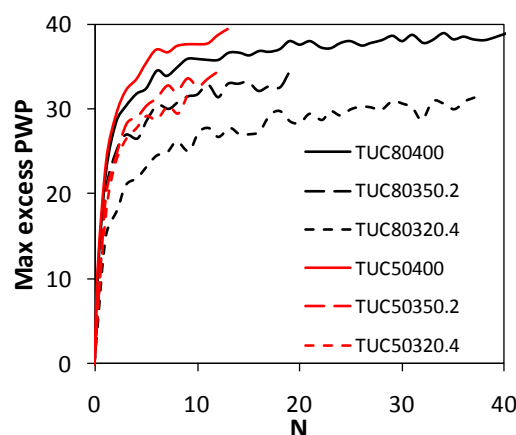
در شکل (۹) علاوه بر نمودار مربوط به ۶ آزمایش یاد شده دو نمودار دیگر نیز مشاهده می‌شود که این دو نمودار مربوط به مطالعات صورت گرفته به وسیله سید و همکاران است [۱۵]. سید و همکاران [۱۵] نمودار نسبت فشار آب حفره‌ای در مقابل تعداد سیکل‌های نرمال شده را برای تعداد زیادی از نمونه‌های آزمایش سه محوری سیکلی تنش-کنترل رسم کردند که دو نمودار نشان داده شده در شکل (۹) مربوط به حد بالا و پایین آن آزمایش‌ها است. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود بین ۶ آزمایش انجام شده در این پژوهش و نتایج سید و همکاران [۱۵] اختلاف زیادی وجود دارد. علت این اختلاف، تفاوت در روش بارگذاری است. در روش کرنش-کنترل (مطالعه حاضر) بیشترین مقدار تنش و انرژی در سیکل‌های ابتدایی به نمونه وارد می‌شود و به همین دلیل بخش ابتدایی نمودار با شیب تند افزایش می‌یابد و پس از آن به آرامی و با شیب ملایم به عدد یک می‌رسد. اما در روش تنش-کنترل در سیکل‌های ابتدایی کرنش‌های کمی در نمونه ایجاد می‌شود اما در سیکل‌های بعدی کرنش‌های بیشتر و در نتیجه انرژی بیشتری به وسیله‌ی المان خاک در سیکل‌های پایانی جذب می‌شود. به همین دلیل است که مقدار فشار آب حفره‌ای به آرامی افزایش یافته و در پایان به عدد یک می‌رسد. در واقع در نمودارهای سید و همکاران [۱۵] نرخ رشد تولید فشار آب



شکل (۷) نمودار انرژی کرنشی تجمعی در برابر تعداد سیکل. (الف) در تنش موثر محدودکننده ۴۰۰ کیلوپاسکال. (ب) در تنش موثر محدودکننده ۴۰ کیلوپاسکال

۲-۵- تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای

برای آن دسته از نمونه‌هایی که روانگرا شدند ۶ آزمایش با تنش موثر ۴۰ کیلوپاسکال، نمودار فشار آب حفره‌ای بر حسب تعداد سیکل و نمودار بیشینه نسبت فشار آب حفره‌ای بر حسب تعداد سیکل نرمال شده رسم و با نتیجه سایر پژوهشگران مقایسه شده‌است.

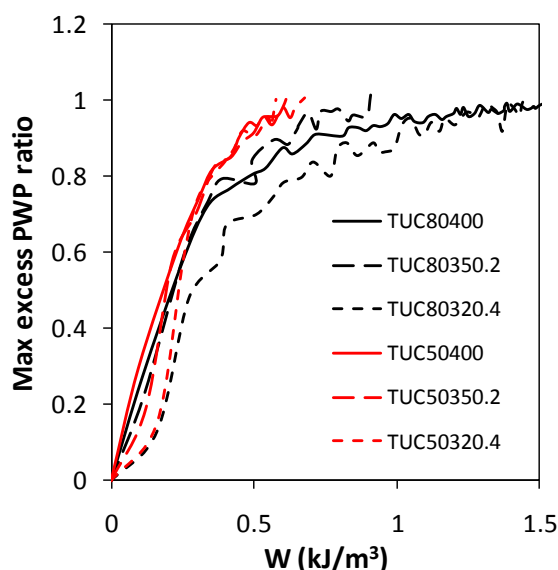


شکل (۸) نمودار بیشینه فشار آب حفره‌ای اضافی در برابر تعداد سیکل بارگذاری

پیشنهاد کردند که متغیرهای آن تراکم نسبی و انرژی کرنشی نرمال شده است. بر اساس رابطه پیشنهادی به وسیله جعفریان و همکاران [۷] نمودار مربوط به تراکم ۵۰ و ۸۰ درصد رسم شده و در کنار نمودار ۶ آزمایش این پژوهش نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۱۱) دیده می شود، با وجود تفاوت میان نوع آزمایش و نوع ماسه نتایج آزمایش ها به خوبی با یکدیگر هماهنگ است.

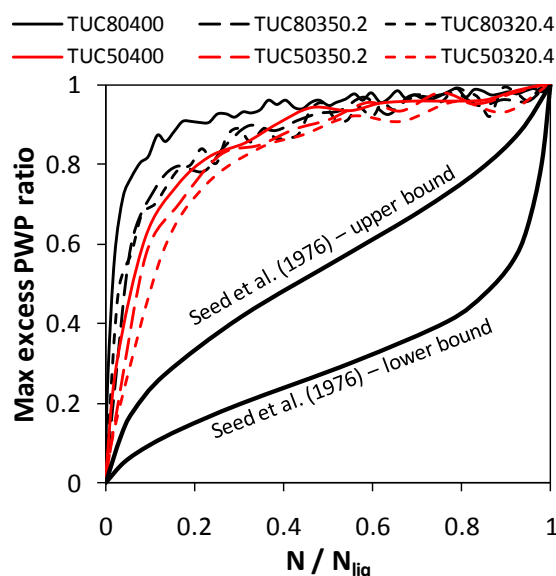
۵-۳- کرنش برشی آستانه

برای خاک ها دو نوع کرنش آستانه وجود دارد: کرنش آستانه خطی و کرنش آستانه حجمی. کرنش آستانه خطی کرنشی است که به ازای مقادیر کمتر از آن رفتار خاک کاملاً خطی است و به ازای مقادیر بیشتر از آن خاک رفتار غیرخطی از خود نشان می دهد این سطح کرنش با علامت γ_{tl} نشان داده می شود. کرنش آستانه حجمی که معمولاً به اختصار کرنش آستانه برشی نیز گفته می شود کرنشی است که به ازای سطوح کرنش پایین تر از آن در بارگذاری با شرایط زهکشی شده هیچ گونه تغییر حجمی رخ نمی دهد و در بارگذاری با شرایط عدم زهکشی شاهد افزایش فشار آب منفذی نخواهیم بود و با علامت γ_{tv} نشان داده می شود [۱۱].



شکل (۱۰) نمودار بیشینه نسبت فشار آب حفره ای اضافی در برابر انرژی کرنشی تجمعی

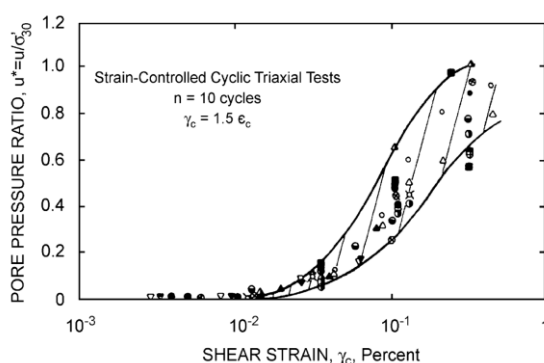
حفره ای در پایان آزمایش از ابتدای آن بیشتر است در حالیکه در نمودارهای حاصل از مطالعه حاضر این روند برعکس است.



شکل (۹) نمودار حداکثر فشار آب حفره ای اضافی در برابر تعداد سیکل های بارگذاری نرمال شده

برای آنکه اثر روش بارگذاری حذف شود می توان در محور افقی به جای تعداد سیکل ها از انرژی کرنشی استفاده کرد. همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می شود محور قائم همان نسبت اضافه فشار آب حفره ای است، اما محور افقی انرژی کرنشی جذب شده به وسیله ی المان خاک است و همان گونه که پیش تر گفته شد نمونه هایی با تراکم بیشتر انرژی بیشتری را تا لحظه روانگرایی جذب کرده اند. البته این نمودار نیز دارای پراکندگی است که برای رفع این مشکل مانند قبل عمل کرده و محور افقی نمودار را نرمال می کنیم. برای این کار مقدار انرژی برای هر نمونه را بر انرژی ظرفیت آن نمونه تقسیم می کنیم. نمودار نرمال شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل نتیجه ۶ آزمایش با تنش موثر میانگین ۴۰ کیلو پاسکال با نتیجه آزمایش های جعفریان و همکاران [۷] مقایسه شده است. جعفریان و همکاران [۷] چندین آزمایش استوانه توخالی کرنش-کنترل روی نمونه های بازسازی شده ماسه تایورا انجام دادند و بر اساس آن رابطه ای برای میزان فشار آب حفره ای تولید شده در طول بارگذاری بر حسب مقدار انرژی کرنشی

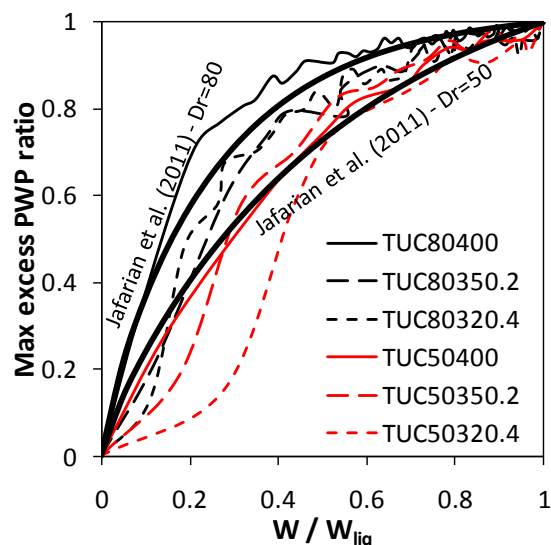
تولید می‌کند (شکل ۱۲). داده‌های نشان داده شده در شکل (۱۲) حاصل از نتیجه آزمایش‌هایی از خاک‌های مختلف، در تراکم نسبی متفاوت، آماده شده به روش‌های مختلف و تحت تنش‌های همه جانبه متفاوت است [۱۴] اما با وجود این تفاوت‌ها هنوز هم داده‌ها در محدوده نسبتاً باریکی واقع می‌شوند. این مطالعات مانند مطالعه صورت گرفته به وسیله‌ی لد و همکاران [۱] نشان می‌دهند که وقتی بارگذاری با کرنش برشی توصیف می‌شود، روش نمونه‌سازی اثر چندانی روی پاسخ فشار آب حفره‌ای ندارد.



شکل (۱۲) نسبت فشار آب حفره‌ای بر حسب کرنش برشی بر اساس آزمایش‌های سه محوری کرنش-کنترل [۱۴]

شکل (۱۳) مقدار r_u بر حسب γ برای ۱۲ آزمایش مختلف در ۶ سطح کرنش متفاوت را در کنار نمودار دابری [۱۴] نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مقادیر به دست آمده در محدوده پایین نمودار دابری [۱۴] قرار می‌گیرند که البته این امر بدیهی است چرا که داده‌های نمودار دابری مربوط به تراکم نسبی ۲۰ تا ۸۰ درصد و تنش موثر همه‌جانبه ۲۵ تا ۱۹۰ کیلوپاسکال است. با توجه به این که حد بالای نمودار دابری مربوط به داده‌هایی با تنش موثر و تراکم پایین و حد پایین آن مربوط به داده‌هایی با تنش موثر و تراکم بالاست در نتیجه طبیعی است که داده‌های ۱۲ آزمایش صورت گرفته که تنش موثر و تراکم نسبی نسبتاً بالایی نسبت به داده‌های دابری دارند در محدوده پایین نمودار دابری قرار گیرند.

بخشی از نمودار شکل (۱۳) برای وضوح بیش‌تر در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که در شکل (۱۴) مشاهده

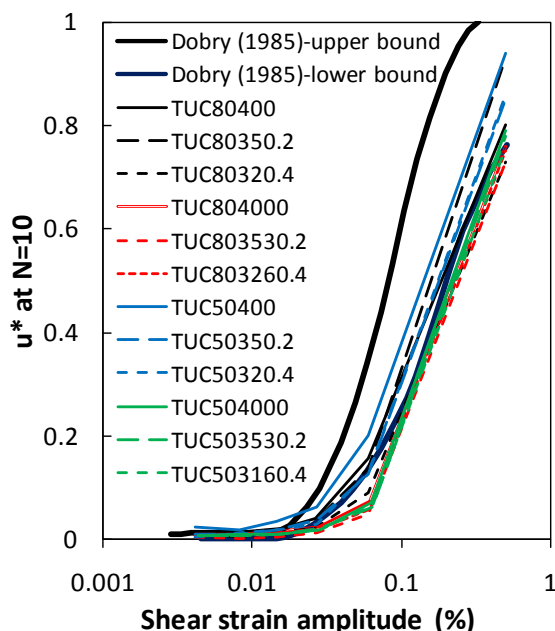


شکل (۱۱) نمودار بیشینه نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در برابر انرژی کرنشی تجمعی نرمال شده

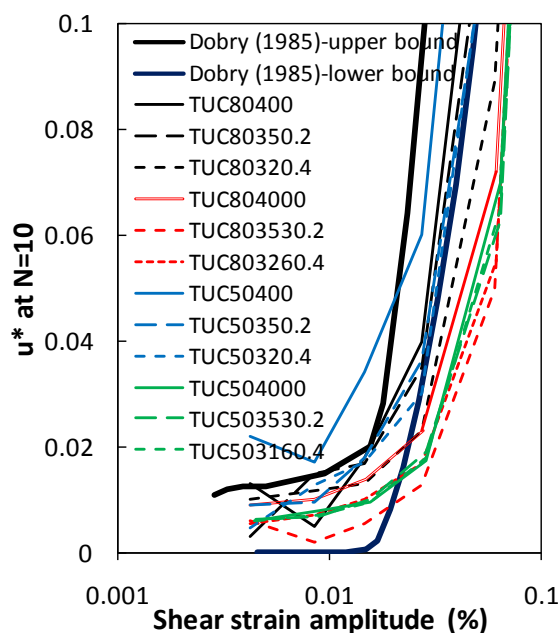
برای ماسه تمیز مقدار کرنش آستانه برشی ۰/۰۱٪ اندازه‌گیری شده است [۱۱]. هدف ما در این پژوهش به دست آوردن کرنش آستانه برشی حجمی است و از این به بعد به اختصار به آن کرنش آستانه می‌گوییم.

تعریف مشخصی برای سطح اضافه فشار حفره‌ای یا تغییر حجمی که نشان دهد نمونه از کرنش آستانه عبور کرده است وجود ندارد. لد و همکاران [۱] فشار آب حفره‌ای اضافی پس از ۱۰ سیکل را مدنظر قرار دادند در حالی که یاود [۱۲] تغییر نسبت تخلخل پس از تعداد سیکل‌های متفاوتی را گزارش کرده است. سو و وستیک [۱۳] از نمودار r_u - γ برای بهتر نشان دادن کرنش آستانه استفاده کردند. شکل (۱۲) گسترش اضافه فشار آب حفره‌ای حاصل از داده‌های دابری [۱۴] را برای ۱۰ سیکل بارگذاری نشان می‌دهد. در این پژوهش نیز اضافه فشار حفره‌ای پس از سیکل دهم را برای هر سطح کرنش مدنظر قرار می‌دهیم. مقدار r_u در نمودار دابری [۱۴] بیانگر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در پایان سیکل دهم به مقدار تنش موثر اولیه قبل از بارگذاری است. نتایج مطالعات دابری نشان می‌دهد که تولید اضافه فشار آب حفره‌ای به ازای کرنش‌های بزرگتر از ۰/۰۱٪ شروع می‌شود، نسبت اضافه فشار حفره‌ای در کرنش‌های بزرگتر از کرنش آستانه به سرعت افزایش پیدا می‌کند و کرنشی بین ۰/۳٪ تا ۱٪ نسبت اضافه فشار حفره‌ای نزدیک به ۱

کرنش آستانه می توان گفت که کرنش آستانه جایی است که به- ازای کرنش های بزرگتر از آن عملاً لوپ های هیستریزس تشکیل می شود.



شکل (۱۳) نمودار مقایسه ای نسبت فشار آب حفره ای بر حسب کرنش برشی بر اساس آزمایش های سه محوری کرنش-کنترل



شکل (۱۴) نمودار مقایسه ای نسبت فشار آب حفره ای بر حسب کرنش برشی بر اساس آزمایش های سه محوری کرنش-کنترل

می شود مقدار r_u به ازای کرنش های کمتر از ۰/۰۱۵ درصد ناچیز است و به ازای کرنش های بزرگتر از آن ناگهان افزایش پیدا می کند. با توجه به شکل (۱۴) می توان محدوده ای در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ درصد را به عنوان کرنش برشی آستانه برای ماسه کربناتی بوشهر در نظر گرفت.

برای تعیین دقیق تر کرنش آستانه برشی از نمودار مقدار انرژی کرنشی نرمال شده به واحد حجم خاک در پایان سیکل دهم در برابر کرنش برشی برای ۱۲ آزمایش استفاده شده است (شکل ۱۵).

همان گونه که در نمودار مشاهده می شود استفاده از مقدار انرژی در پایان سیکل دهم به جای مقدار نسبت اضافه فشار آب حفره ای نقطه دقیق تری را برای کرنش برشی آستانه به دست می دهد. یعنی به جای استفاده از مقدار نسبت فشار آب حفره ای اضافی در پایان سیکل دهم از مقدار انرژی کرنشی تجمعی در پایان سیکل دهم استفاده شده است. در شکل (۱۳) نمودارها محدوده نسبتاً باریکی را اشغال می کنند و تفکیک آنها از یکدیگر دشوار است. اما استفاده از انرژی کرنشی به جای فشار آب حفره ای اضافی باعث می شود که نمودارها از یکدیگر قابل تفکیک باشند و در عین حال می توان با دقت بیشتری کرنش برشی آستانه را تعیین کرد. همان گونه که مشاهده می شود، در شکل (۱۴) به ازای یک دامنه کرنش برشی مشخص (که همان کرنش برشی آستانه است)، نمودارها ناگهان با شیب زیادی افزایش پیدا می کنند در حالی که این تغییر شیب در شکل (۱۵) کمتر دیده می شود.

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود استفاده از مقدار انرژی در پایان سیکل دهم به جای مقدار نسبت اضافه فشار آب حفره ای نقطه دقیق تری را برای کرنش آستانه برشی به دست می دهد.

همان گونه که دیده می شود مقدار انرژی کرنشی تا قبل از کرنش ۰/۰۱۵ درصد خیلی ناچیز است اما به ازای کرنش های بزرگتر از آن این مقدار ناگهان افزایش می یابد. بنابراین با توجه به نمودار می توان عدد ۰/۰۱۵ درصد را برای کرنش برشی ماسه کربناتی بوشهر انتخاب کرد. با توجه به این نمودار و مقادیر بسیار پایین انرژی کرنشی برای کرنش های کمتر از

نرمال شده مورد بررسی قرار گرفت و با رابطه پیشنهادی به وسیله‌ی دیگر پژوهشگران مقایسه شد. بر اساس مقایسه‌های صورت گرفته مشخص شد که اگر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی بر اساس تعداد سیکل‌های بارگذاری با دیگر مطالعات مقایسه شود، نتایج با یکدیگر همخوانی ندارند، چرا که روش بارگذاری (تنش-کنترل یا کرنش-کنترل) تاثیر زیادی در نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی دارد. اما مقایسه نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی بر اساس انرژی کرنشی تجمعی نرمال شده نتایج مطلوبی می‌دهد، چرا که استفاده از مفهوم انرژی اثر بسیاری از پارامترها از جمله روش بارگذاری و نوع آزمایش را از بین می‌برد.

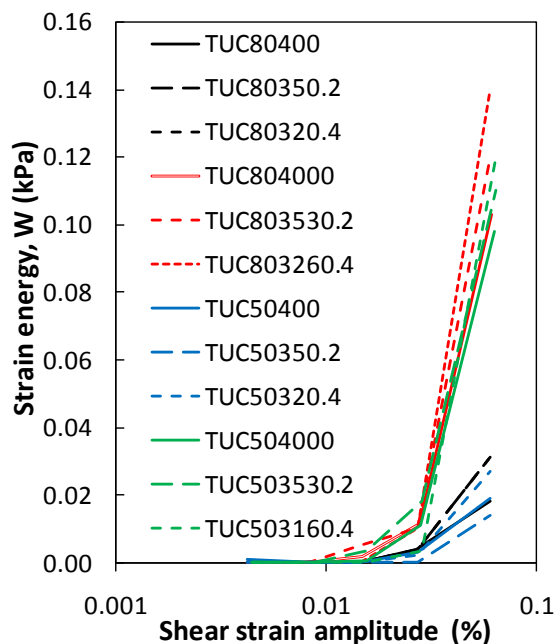
علاوه بر بررسی مقاومت روانگرایی با انجام آزمایش‌های چند-مرحله‌ای مقدار کرنش آستانه برشی لازم برای تولید فشار آب حفره‌ای اضافی نیز برای ماسه کربناتی بوشهر مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار آن در حدود ۰٫۰۱۵ درصد محاسبه شد که این مقدار تقریباً برابر کرنش آستانه برشی سایر ماسه‌ها است.

۷- قدردانی

این مقاله در راستای پروژه پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۳ و کد پروژه ۵۴۵ تهیه و ارسال شده است. همچنین آزمایش‌های سیکلی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه سمنان انجام شده است که بدین وسیله از همکاران گرامی قدردانی به عمل می‌آید.

۸- مراجع

1. Ladd, R.S., Dobry, R., Dutko, F.Y., Yokel, F.Y. and Chung, R.M. (1989), "Pore-water pressure buildup in clean sands because of cyclic straining," *Geotech Testing J ASTM* 1989;12(1):77-86.
2. Silver, M.L. and Seed, H.B. (1971), "Volume changes in sands during cyclic loading," *J Soil Mech Found Division ASCE* 1971;97(239):1171-85.
3. Seed, H.B. (1981), "Earthquake-Resistant Design of Earth Dams," *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. III, St. Louis, Mo., 1981, pp. 1157-1173.



شکل (۱۵) نمودار مقدار انرژی کرنشی واحد حجم خاک در پایان سیکل دهم در برابر کرنش برشی

۶- نتیجه گیری

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی بسیاری برای ارزیابی اثر عوامل مختلف بر روی رفتار سیکلی و مقاومت روانگرایی ماسه‌ها صورت گرفته است، اما بیشتر این مطالعات روی ماسه‌های سیلیسی بوده‌اند. به همین دلیل در این مقاله سعی شد تا با انجام ۱۲ آزمایش سه محوری کرنش-کنترل با تحکیم همسان و ناهمسان اثر فشار محدودکننده و تراکم نسبی بر مقاومت روانگرایی ماسه کربناتی بوشهر مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این کار با استفاده از روش انرژی، سطح داخلی لوپ‌های هیستریزیس که در واقع همان انرژی کرنشی جذب شده واحد حجم المان خاک است، محاسبه شده و از مقایسه مقدار آن در آزمایش‌های مختلف برای تعیین میزان مقاومت روانگرایی آزمایش‌های مختلف استفاده شده است.

نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که میزان انرژی کرنشی جذب شده با افزایش فشار محدودکننده و تراکم نسبی افزایش پیدا می‌کند، به گونه‌ای که نمونه‌های با تنش موثر بالا حتی پس از صد سیکل بارگذاری روانگرا نشدند. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌ها رابطه بین نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی با تعداد سیکل‌های نرمال شده و انرژی کرنش تجمعی جذب شده

- Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M. and Powell, D. (1982), "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method," National Bureau of Standards Building Science, Series 138, 1982. 150pp.
11. Youd, T.L. (1972), "Compaction of sands by repeated shear straining," J Soil Mech Found Division ASCE 1972;98(SM):709–25.
12. Hsu, C.C. and Vucetic, M. (2006), "Threshold shear strain for cyclic pore-water pressure in cohesive soils," J Geotech Geoenviron Eng ASCE 2006;132(10):1325–35. Dobry, R. (1985), "Liquefaction of soils during earthquakes," National Research Council (NRC), Committee on Earthquake Engineering, Report no. CETS-EE-001, Washington, DC, 1985.
13. Seed, H.B., Martin, P.P., Lysmer, J. (1976). Pore-water pressure changes during soil liquefaction. J Geotech Engng Div, ASCE;102(GT4): 323–46.
14. Yasuda, S. and Soga, M. (1984). Effect of frequency on undrained strength of sands, Proc. 19th National Conf. Soil Mech. Found. Engrg, pp.549_550.
15. Towhata, I. (2008). Geotechnical Earthquake Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
16. Derakhshandi, M., Rathje, E.M., Hazirbaba, K. and Mirhosseini, S.M. (2008), "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands" Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28 (2008) 376-386.
4. Castro, G., and Poulos, S. (1977), "Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, June, 1977, pp. 501-516.
5. Vaid, Y., Chern, J. and Tumi, H. (1985). "Confining Pressure, Grain Angularity, and Liquefaction." J.Geotech. Engrg., 111(10), 1229–1235. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1229)
6. Brandes, H.G. (2011), "Simple shear behavior of calcareous and quartz sands," Geotech Geol Eng (2011) 29:113–126. Doi:10.1007/s10706-010-9357-x □
7. Jafarian, Y., et al. (2011), "Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments," Soil Dynamics and Earthquake Engineering (2011), doi:10.1016/j.soildyn.2011.11.006
8. 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 (2011), doi:10.1016/j.soildyn.2010.12.014□
9. Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1975), "Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand," Soils and Foundations 1975;15(3): 27–40.
10. Wong, R.T., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1975), "Cyclic loading liquefaction of gravelly soils," Proceedings of the ASCE 1975;101(GT6):571–83