



مطالعه آزمایشگاهی رفتار سیکلی ماسه سیمانته زئولیتی

میثم سعادت، مهدی درخشندی*، امین بهمن پور، نوید گنجیان

دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

سه محوری سیکلی
ماسه بابلسر
مدول برشی
سیمان
زئولیت

خلاصه: مدول برشی یکی از مهم‌ترین خصوصیات دینامیکی خاک در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است. جایگزینی بخشی از سیمان که تولید آن یکی از مهم‌ترین منابع انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در جهان است با مصالح طبیعی همچون زئولیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر، رفتار سیکلی ماسه تمیز با رفتار سیکلی ماسه سیمانته با سیمان و زئولیت مقایسه می‌شود. ماسه به کار برده شده در این تحقیق، ماسه بابلسر بوده که بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفایند از نوع ماسه بد دانه بندی شده می‌باشد. اثرات فشار همه جانبه، کرنش برشی و جایگزینی زئولیت به جای سیمان بر مدول برشی ماسه بابلسر تثبیت شده با سیمان و زئولیت مطالعه می‌شود. تمامی نمونه‌ها به روش تراکم مرطوب ساخته شده و آزمایش‌های سه محوری سیکلی با سه فشار همه جانبه متفاوت ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در محدوده کرنش برشی متوسط انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر مدول برشی نمونه‌های ماسه سیمانته با نسبت آب به سیمان ۱، در تمامی محدوده کرنش‌های برشی، بزرگ‌تر از مقادیر مدول برشی نمونه ماسه تمیز است. مقادیر مدول برشی با جایگزینی زئولیت به جای سیمان در نمونه‌های سیمانته، افزایش یافت. بنابراین جایگزینی زئولیت به جای سیمان از لحاظ زیست محیطی می‌تواند مورد توجه باشد. از طرفی با افزایش فشار همه جانبه، مقادیر مدول برشی نمونه‌های ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی افزایش یافت. این افزایش برای نمونه‌های سیمانته و سیمانته زئولیتی در محدوده فشار همه جانبه بزرگ‌تر قابل ملاحظه است.

۱- مقدمه

مقابل بارگذاری سیکلی، افزودن سیمان به آن است که شامل روش‌های اختلاط عمیق و روش پیش مخلوط می‌باشد. روش اختلاط عمیق کاربرد گسترده‌ای در بهسازی خاک دارد که موارد استفاده آن بیشتر برای افزایش مقاومت خاک و کاهش پتانسیل روانگرایی است. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در مورد تثبیت ماسه با استفاده از تزریق سیمان [۷-۱]، تثبیت ماسه با دانه‌های خرده لاستیک [۸]، تثبیت ماسه با نانو [۹] به منظور تقویت ویژگی‌های خاک انجام شده است

یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های دانه‌ای که سبب ایجاد تغییرات مهمی در خواص خاک از جمله پارامترهای مقاومت برشی و مدول‌های تغییر شکل می‌شود پدیده سیمانی شدن است. سیمانی شدن طبیعی خاک‌های دانه‌ای پدیده‌ای است که به مرور زمان بر اثر تراکم و رسوب مواد شیمیایی طبیعی در بین ذرات خاک پدید می‌آید. در بخش وسیعی از نواحی ساحلی شمال ایران که مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران در پهنه با خطر نسبی زیاد زلزله واقع شده اند جنس خاک از نوع ماسه با تراکم کم و دانه بندی یکنواخت و اندازه متوسط دانه‌ها $D_{60} \approx 0.3 \text{ mm}$ می‌باشد. در حین زلزله و بارگذاری سیکلی زهکشی نشده، احتمال کاهش مقاومت این خاک‌های ماسه‌ای که اشباع نیز هستند زیاد است. از آنجا که در مناطق شهری امکان روش‌های بهسازی نظیر تراکم دینامیکی وجود ندارد، بنابراین یکی از روش‌های بهسازی زمین در این مناطق برای خاک‌های ماسه‌ای اشباع ضعیف در

کلاف و همکاران [۱۰] با انجام مطالعه بر روی ماسه سیمانته طبیعی و مصنوعی دریافتند که سمناسیون سبب افزایش چسبندگی خاک می‌شود به طوری که در خاک سیمانته مصنوعی با ۴ درصد سیمان میزان چسبندگی حدود ۳ برابر مقدار چسبندگی در خاک با ۲ درصد سیمان است. لد و همکاران [۱۱] با انجام آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده فشاری در محدوده فشارهای محصور کننده زیاد (از صفر تا ۱۰ مگاپاسگال) و با انجام تمهیداتی در انتخاب خاک پایه و نمونه سازی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.derakhshandi@gmail.com



که بیشترین اثر سمناسیون مصنوعی را نشان می دهد دریافتند که افزایش سمناسیون سبب افزایش چسبندگی موثر می شود.

دنو و همکاران [۱۲] با انجام آزمایش های تک محوری، کشش برزیلی و سه محوری در محدوده فشارهای ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه های خاک ماسه سیلتی یکنواخت ریزدانه و نیز ماسه شندار سیلیسی- کربناته تزریق شده با دوغاب سیمان دریافتند که بسته به مقدار سیمان موجود در تزریق و نسبت آب به سیمان، چسبندگی موثر- کولمب افزایشی بین ۰/۱ تا ۰/۵ مگاپاسکال خواهد داشت.

عسگری و همکاران [۱۳] اثر سمناسیون بر مقاومت برشی خاک ماسه ای شن دار تهران را بررسی نمودند. در پژوهش خود از آهک هیدراته Ca(OH)_2 با مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد استفاده کرده و دریافتند که سمناسیون سبب افزایش مقاومت برشی اوج شده و مقدار چسبندگی اوج با افزایش آهک افزایش می یابد. همچنین نتایج آنان بیانگر آن است که چسبندگی نهایی خیلی کمتر از چسبندگی اوج می باشد.

لی و همکاران [۱۴] با انجام آزمایش های ستون تشدید بر روی نمونه های ماسه تزریق شده (شامل ۳ نوع تزریق مختلف سوسپانسیون سیمان ریزدانه با نسبت آب به سیمان ۲، محلول اکریلیک و محلول سیلیکات سدیم) به بررسی تاثیر نوع تزریق، فشار همه جانبه بر روی خصوصیات دینامیکی ماسه اتاوا پرداختند. نتایج آنان نشان می دهد سوسپانسیون سیمان ریزدانه، مقادیر مدول دینامیکی بزرگتری در محدوده الاستیک در مقایسه با محلول های شیمیایی نشان می دهد.

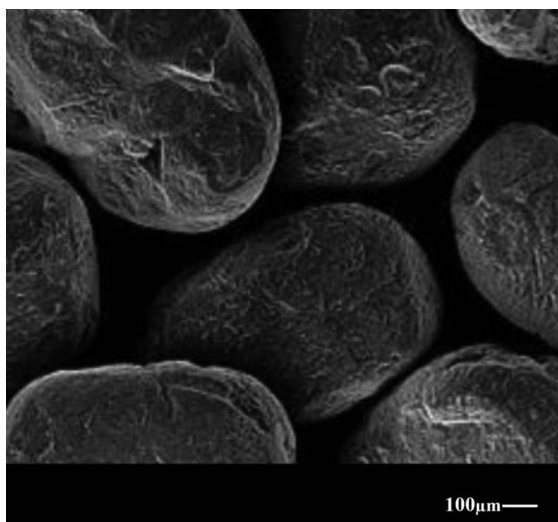
پانتازوپولوس [۶] با انجام آزمایش های ستون تشدید و المان خمشی به بررسی خصوصیات دینامیکی ماسه های تزریق شده با سیمان های معمولی و ذرات خیلی ریز پرداختند. تاثیر فشار همه جانبه، کرنش برشی، نسبت آب به سیمان تزریق، نوع و درجه بندی سیمان بر روی خصوصیات دینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهش خود از سه نوع سیمان پرتلند، کامپوزیت پرتلند و سیمان پوزولانی استفاده نمودند. همچنین خصوصیات دینامیکی را در محدوده کرنش کوچک ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ درصد ارائه نمودند. نتایج آنان نشان می دهد مدول برشی و مدول یانگ با افزایش فشار همه جانبه و کاهش کرنش برشی، افزایش می باشد در حالی که نسبت میرایی رفتار متفاوتی داشته است.

آکار و همکاران [۱۵] با بررسی خواص دینامیکی ماسه های سیمانته دریافتند که پدیده سمناسیون سبب افزایش مدول برشی در کرنش های کم می شود.

با رشد روز افزون و توسعه اقتصادی و صنعتی در دنیا به ویژه در کشورهای در حال توسعه، نیاز به بهینه سازی در مصالح و اجزا تشکیل دهنده مواد افزودنی در علم تثبیت خاک را در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر با توجه به این رشد و نیاز به وجود آمده، بحران انرژی و منابع طبیعی بیش از حد خودنمایی می کند. همچنین اهمیت مسئله حفظ محیط زیست بشر نیز قابل چشم پوشی نیست. برای تولید سیمان انرژی فراوانی مصرف شده و موجب تولید ۷ درصد CO_2 تولید شده در جهان است [۱۶]. علاوه بر آن خاک های تثبیت شده با سیمان رفتار تردد و شکننده های از خود نشان داده اند [۲۱-۱۷]. بنابراین نیاز به بهینه سازی در مصالح و اجزا تشکیل دهنده مواد افزودنی در علم تثبیت خاک را در پی خواهد داشت. استفاده از مواد پوزولانی خصوصا پوزولان های طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می تواند گزینه در خور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد. زئولیت به عنوان یکی از پوزولان های طبیعی است که استفاده این ماده در بتن رایج و دارای ویژگی های تبادل یونی و جذب سطحی می باشد.

زئولیت ماده معدنی با ارزشی است که کاربردهای فراوانی در صنعت دارد و به مقدار زیاد و باکیفیت مناسب در کشور ایران یافت می شود. با توجه به این موضوع و مشکلات موجود در تولید و مصرف سیمان و تخریب و خرابی زودرس سیمان به خصوص در مناطق ساحلی کشور به علت دوام کم سیمان تحت شرایط محیطی شدید، لزوم استفاده از زئولیت به عنوان یکی از پوزولان های طبیعی برای اصلاح الگوی مصرف سیمان در تثبیت خاک بیشتر نمایان می شود [۲۲]. زئولیت های طبیعی (NZ) به دلیل ویژگی های منحصر به فرد و جذاب خود از جمله ظرفیت بالای تبادل کاتیون و سطح ویژه و همچنین توانایی آن ها برای ذخیره گرما بین چرخه های هیدراتاسیون و کم آبی، در بسیاری از مناطق از کاربردهای صنعتی استفاده می شود. کلینوپتیلولیت، نوعی NZ، آلومینوسیلیکات با ساختار چارچوب ریز است. ساختار کلینوپتیلولیت توسط یک اسکلت سه بعدی تشکیل شده از تراشرون های سیلیکونی که توسط اتم های اکسیژن با بخشی از اتم های سیلیکون که توسط اتم های آلومینیوم جایگزین شده اند، به هم پیوسته است. مقادیر زیادی SiO_2 واکنش پذیر و Al_2O_3 در زئولیت واکنش شیمیایی با Ca(OH)_2 از هیدراتاسیون سیمان پرتلند برای تشکیل ژل های اضافی C-S-H و C-A-H دارد، بنابراین بهبود ساختار سیمان سخت شده را نشان می دهد [۲۳].

با توجه به خصوصیات شیمیایی، سازگاری با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن زئولیت، این ماده جدید در چندین تحقیق ژئوتکنیکی به کار رفته



شکل ۱. تصویر ساختار ماسه بابلسر [۳۰]

Fig. 1. SEM images of Babolsar sand

همانطور که بیان شد در مطالعات پیشین تا حدودی به بررسی اثر افزودن زئولیت به سیمان جهت تثبیت خاک های ماسه ای در بارگذاری استاتیکی انجام شده است. در پژوهش حاضر، مدول برشی ماسه سیلیکاتی بابلسر بهسازی شده با زئولیت و سیمان پرتلند در دامنه کرنش برشی متوسط با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی مورد بررسی قرار میگیرد. تاثیر جایگزینی زئولیت به جای سیمان، فشار همه جانبه و کرنش برشی بر مدول برشی نمونه تجزیه و تحلیل می شود.

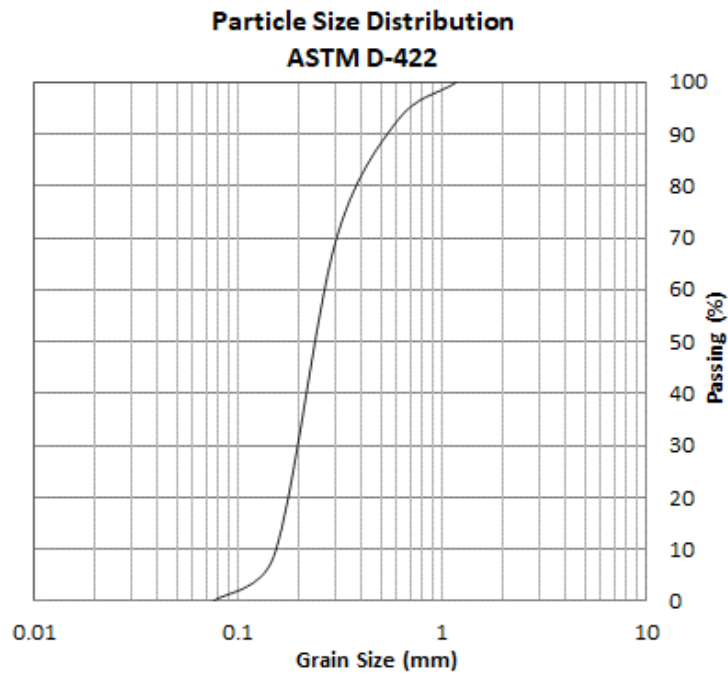
۲- مراحل انجام آزمایش

۲-۱- مصالح مورد استفاده در آزمایش ها

بابلسر یکی از شهرهای استان مازندران در شمال ایران است که در سواحل جنوبی دریای خزر واقع شده است. خاک این نواحی عموماً از نوع ماسه سیلیکاتی بوده و لرزه خیزی این منطقه نیز زیاد است. در سال های اخیر با توجه به ساخت و ساز بیش از اندازه و بلند مرتبه سازی در این نواحی، بهسازی خاک به روش های اجرای ریز شمع و اختلاط عمیق انجام می شود. بنابراین موارد مذکور لزوم انجام تحقیقات گسترده جهت بررسی رفتار دینامیکی ماسه سیمانته سیلیکاتی بابلسر را روشن می سازد. ماسه مورد استفاده در این پژوهش، ماسه سیلیکاتی دریای خزر واقع در شمال کشور ایران در شهرستان بابلسر می باشد. تصاویر میکروسکوپی (scanningelec- (SEM) images (tron microscope) در شکل ۱، اندازه و شکل دانه های ماسه را نشان می دهد. منحنی دانه بندی ماسه بابلسر در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس مقادیر C_c ، C_u و سیستم طبقه بندی یونیفاید،

است. در سال های اخیر، برخی محققان به منظور بهبود خواص بتن [۲۶-۲۴] و خاک، از زئولیت به عنوان ماده افزودنی سیمان پرتلند استفاده کرده اند. شی [۲۷] از سیمان- زئولیت برای تثبیت نمونه های سیلت رسی و ماسه شنی با استفاده از روش اختلاط استفاده کرد. نتایج مطالعات وی نشان می دهد که میزان مقاومت محصور نشده (UCS) مخلوط های سیمان- زئولیت و خاک در سن ۹۰ روز با درصد زئولیت ۱۰٪ بزرگتر از مقادیر UCS تمام نمونه های (۷، ۲۸، ۹۰ روز) و کلیه درصد های زئولیت (۲/۵٪، ۵٪ و ۱۰٪) در ماسه شنی و سیلت رسی به دست آمده است. ملاعباسی و همکاران [۲۸] تاثیر زئولیت بر UCS نمونه ماسه سیمانته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که تا سن ۹۰ روز UCS با افزایش زئولیت افزایش یافته و پس از دستیابی به سطح بهینه زئولیت کاهش می یابد. کردنابیج و همکاران [۲۹] با انجام آزمایش المان خمشی به بررسی مقادیر مدول برشی حداکثر نمونه ماسه سیمانته زئولیتی پرداختند. نتایج آنان نشان می دهد که مقادیر مدول برشی حداکثر نمونه های تزریق شده ماسه فیروزکوه با افزایش مقدار جایگزینی با زئولیت تا ۳۰٪ زیاد می شود و پس از آن افزایش در میزان زئولیت سبب کاهش مدول برشی حداکثر می شود.

پارامترهای دینامیکی استفاده گسترده های در تحلیل و طراحی سازه های ژئوتکنیکی دارند. این پارامترها شامل مدول برشی و نسبت میرایی است. تغییرات این پارامترها با کرنش برشی یکی از مهم ترین پارامترهای لازم برای پاسخ لایه های خاک به بارهای دینامیکی است. ارزیابی صحیح این پارامترها هم درک اساسی از رفتار خاک و هم برای استفاده در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه های از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۲. منحنی دانه بندی ماسه بابلسر

Fig. 2. Grain size distribution curve of Babolsar sand

جدول ۱. مشخصات ماسه بابلسر مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. Characteristics of the Babolsar sand used in this research

Soil properties	
C_u	۰/۸۹
C_c	۱/۷۸
D_{50} (mm)	۰/۲۴۱
G_s	۲/۶۸
e_{min}	۰/۵۳
e_{max}	۰/۷۹
Soil Classification	SP

در پژوهش حاضر از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا در استان مازندران استفاده شد. این نوع سیمان به طور عمده در بهسازی ماسه های سواحل دریای خزر در اجرای ریز شمع ها و روش اختلاط عمیق استفاده می شود.

ماسه بابلسر از نوع دانه بندی بد (SP) می باشد. تراکم بیشینه (Dr_{max}) و کمینه (Dr_{min}) به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D۴۲۵۳ و ASTM D۴۲۵۴ به دست آمده است. مشخصات فیزیکی ماسه بابلسر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۲. اجزای تشکیل دهنده ی سیمان پرتلند و زئولیت معدنی مورد استفاده در این تحقیق

Table 2. Characteristics of Portland cement and mineral zeolite used in this research

Chemical properties	Cement (%)	Zeolite (%)
Calcium oxide (CaO)	۶۳/۳	۱/۲۴
Silicon dioxide (SiO ₂)	۲۱/۹۰	۶۷/۴۴
Potassium oxide (K ₂ O)	-	۴/۳۹
Magnesium oxide (MgO)	۱/۱۵	۰/۳۳
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	۴/۸۶	۱۰/۸
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	۳/۳۰	۰/۸۴
Sodium oxide (Na ₂ O)	-	۳/۷۱
Sulfur trioxide (SO ₃)	۲/۱۰	-
TiO ₂	-	۰/۱۹
LOI	-	۱۱/۰۵
S	-	۰/۴۷
Loos on ignition	۲/۴۰	-

زده شده تا درگیری مناسبتری با خاک لایه بعدی در محل فصل مشترک آن‌ها ایجاد شود.

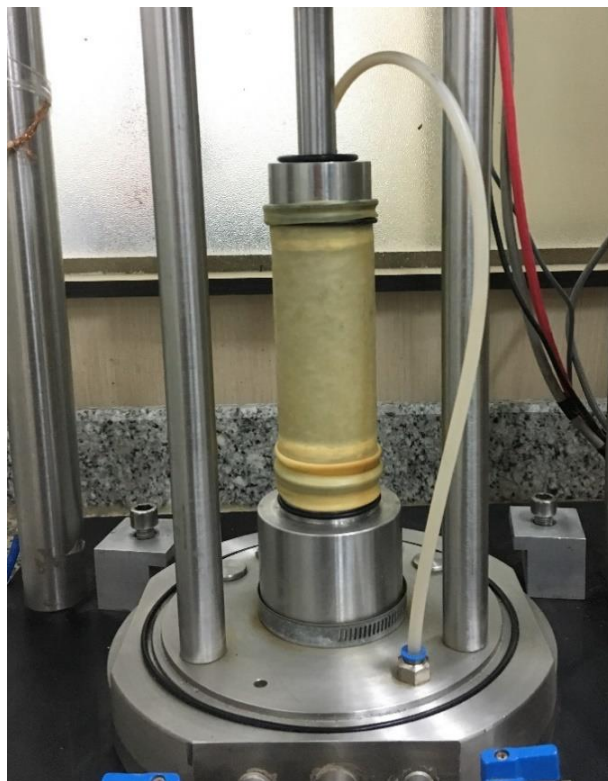
نمونه های دارای سیمان با اضافه نمودن درصد سیمان به مقدار ۴٪ به نسبت وزنی خاک پایه، اختلاط خشک مجموعه به صورت دستی و نهایتاً اضافه نمودن رطوبت مورد نیاز و اختلاط مجدد در لایه های یکسان ساخته شدند. رطوبت مورد نیاز هم به صورت مجموع رطوبت لازم جهت تراکم دانه‌های ماسه در انرژی مشخص و تراکم معلوم (W=۵٪ تمامی نمونه) به علاوه آب لازم برای هیدراته شدن ذرات سیمان با نسبت آب به سیمان محاسبه می شد که البته $W/C = ۱$ به منظور رفع اثر تبخیر آب حین اختلاط ۱ میلی گرم آب اضافی به مخلوط هر لایه اضافه می گردید.

نتایج مطالعات ملاحظه‌ای و همکاران [۲۸] که با انجام آزمایش فشاری محصور نشده به بررسی تاثیر میزان زئولیت بر پارمترهای مقاومتی مخلوط ماسه-سیمان-زئولیت پرداختند. نشان می دهد با جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقاومت فشاری محصور نشده ابتدا افزایش و سپس با درصد جایگزینی بیشتر، کاهش می یابد. نتایج بیانگر آن است که درصد زئولیت

زئولیت مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلینوپتیولیت است. این نوع زئولیت از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان (منطقه افتر) به عنوان ماده پوزولانی و افزودنی به سیمان استفاده می شود. زئولیت مطابق با سیستم طبقه بندی متحد در رده ML با سطح ویژه حدود ۱۰۰۰۰ گرم بر سانتی متر مربع و جذب آب ۶۰ درصد حجمی و ظرفیت تبادل یونی ۲/۶ gr/meq می باشد. مشخصات تشکیل دهنده سیمان و زئولیت در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۲- نمونه سازی

به منظور تهیه نمونه هایی با تراکم یکنواخت در ارتفاع، هنگام ساخت تمامی نمونه ها روش کوبش مرطوب با تراکم کاهش یافته مطابق روش ارائه شده توسط لد [۳۱] به کار گرفته شد. مقدار رطوبت اضافه شده به تمامی نمونه های خاک پایه ۵٪ رطوبت بوده که پس از اضافه شدن به ماسه در هر لایه به صورت دستی مخلوط می شد. ضمناً برای اتصال بهتر لایه های مختلف، سطح لایه کوبیده شده قبلی پس از رسیدن به ارتفاع مورد نظر شیار



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

Fig. 3. The sample is prepared before placing the cell

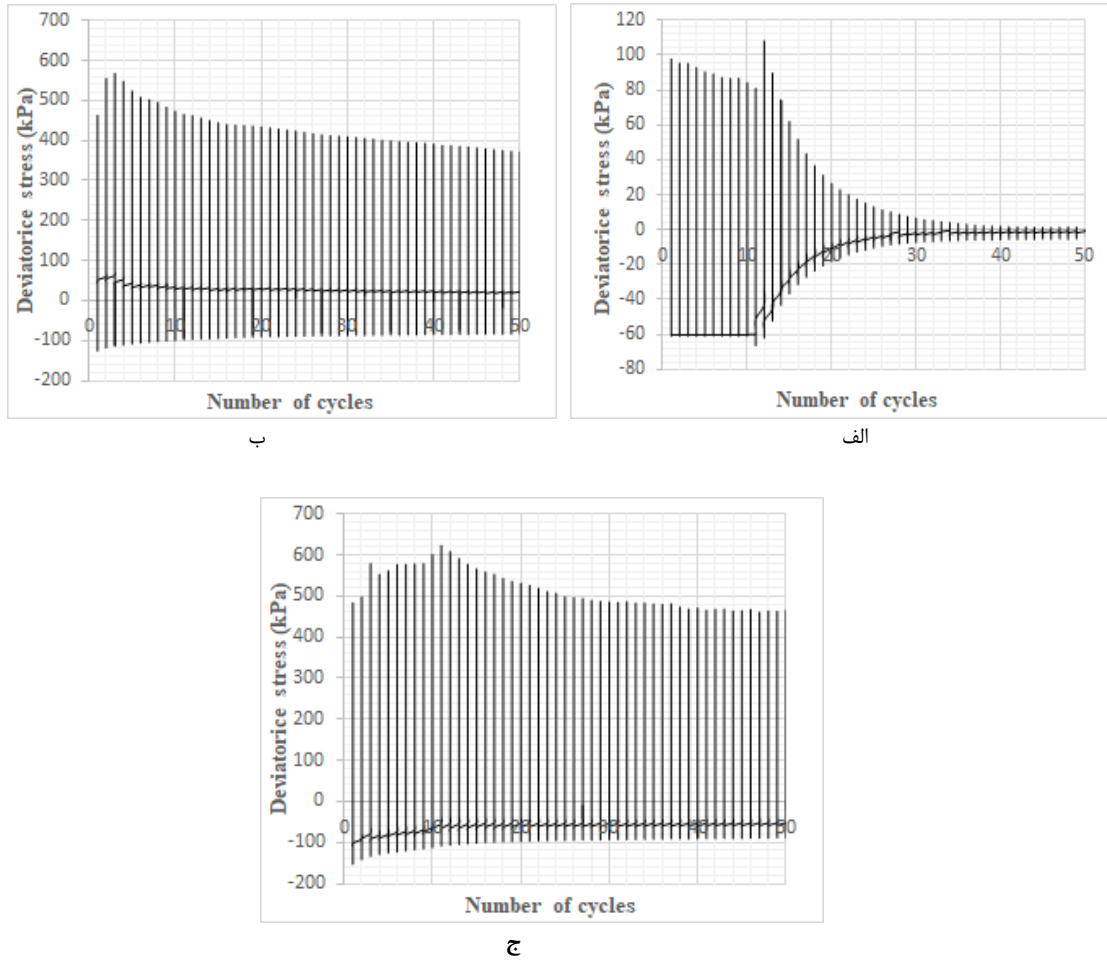
سه محوری و پر کردن سلول از آب نشان داده شده است. پس از پایان نمونه سازی برای اشباع کردن نمونه، به ترتیب دی اکسیدکربن و آب بدون هوا از نمونه عبور داده شد. پس از آن برای رسیدن به درجه اشباع بیش از ۹۵٪ برای نمونه خاک پایه و ۹۲٪ برای نمونه سیمانته و زئولیتی چند گام اشباع سازی با استفاده از پس فشار روی نمونه صورت گرفت. پس فشار اعمال شده برای اشباع نمونه ماسه خالص حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال و برای نمونه سیمانته حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوپاسکال بود. در پایان، نمونه ها اعم از ماسه خالص و سیمانته و زئولیتی به صورت همه جانبه و همسان و تحت سه فشار همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال (با توجه به محدودیت تعداد آزمایش ها و برای مطالعه محدوده وسیع تر) تحکیم داده شده و سپس تحت بارگذاری سیکلی تا ۵۰ سیکل با فرکانس ۱ هرتز و دامنه کرنش های مختلف قرار گرفتند.

به منظور به دست آوردن مقادیر مدول برشی، تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی در شرایط زهکشی نشده و همسان بر روی نمونه ماسه خالص، سیمانته و زئولیتی با تراکم نسبی ۵۰٪ انجام شد. بعد از انجام هر آزمایش نمودار هیستریزس خاک با استفاده از داده های خام رسم گردید.

بهبینه برای افزایش مقاومت حدود ۳۰ درصد می باشد. در پژوهش حاضر درصد زئولیت جایگزینی سیمان برابر با ۳۰ درصد نسبت وزنی سیمان در نظر گرفته شده است. تمامی نمونه های دارای سیمان و زئولیت در همه آزمایش بدون آن که تحت فشار سربار قرار بگیرند در داخل قالب و پس از قرار دادن در کیسه های آب بند (به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت موجود در داخل نمونه) به مدت ۲۸ روز در محیط مرطوب (وان آب) نگهداری شدند.

۲-۳- چگونگی انجام آزمایش

در این پژوهش نمونه های به قطر ۷۱ میلی متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی متر برای نمونه خاک پایه و نمونه های به قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر برای نمونه سیمانته به روش تراکم مرطوب جهت انجام آزمایش های سه محوری سیکلی تهیه شدند. 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 محصور کننده وابسته است که قبلا با انجام چند تست آزمایشی حدود تقریبی آن برای تنش های محدود کننده اولیه به دست آمد. در شکل ۳ نمونه آماده شده قبل از قرارگیری سلول



شکل ۴. نتایج تنش انحرافی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری (الف) نمونه ماسه تمیز، (ب) ماسه سیمانته، (ج) ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 4. Results of the deviatoric stress versus number of loading cycles a) clean sand, b) cemented sand, c) zeolite-cemented sand sample with relative density of 50%, effective confining pressure of 200 kPa

به آن که آزمایش در شرایط زهکشی نشده و نمونه کاملاً اشباع می‌شود، مقدار ضریب پواسون برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. بعد از رسم منحنی هیسترتیک، مدول برشی با استفاده از شیب حلقه‌های هیسترتیک محاسبه گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج اولیه

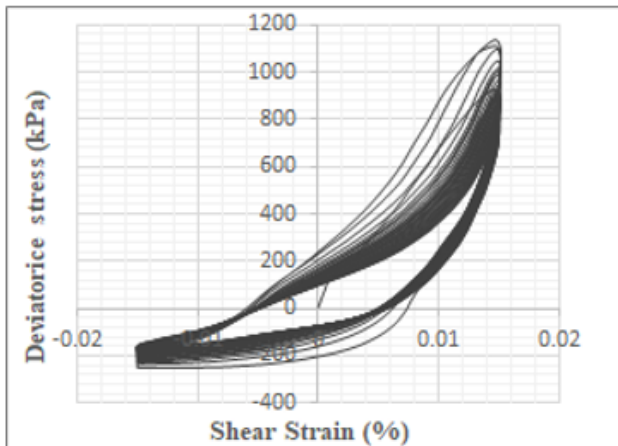
شکل ۴ نتایج تنش انحرافی را در مقابل تعداد سیکل بارگذاری نمونه ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم نسبی ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با تحکیم همسان را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود در شکل ۴-الف برای ماسه تمیز به دلیل کرنش - کنترل بودن بارگذاری، در سیکل‌های نخست مقدار تنش تحمل

برای رسم نمودار هیستریزس باید تنش برشی بر حسب کرنش برشی رسم گردد. از آنجا که در آزمایش‌های سه محوری سیکلی انجام شده فقط کرنش محوری و تنش محوری را می‌توان اندازه‌گیری کرد، مقادیر تنش برشی و کرنش برشی از طریق تنش و کرنش محوری به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

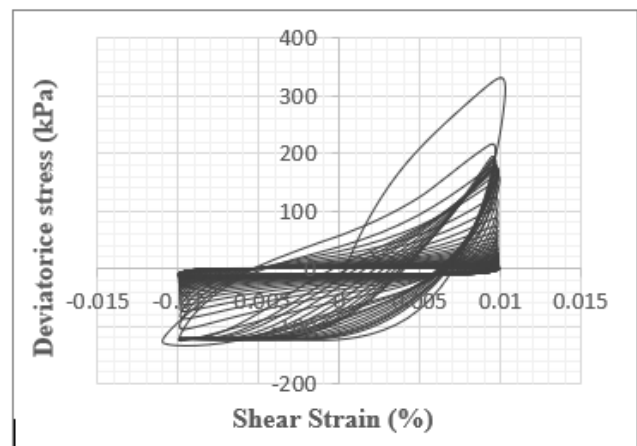
$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{q_a}{2} \quad (1)$$

$$\gamma = (1 + \nu)\varepsilon_a \quad (2)$$

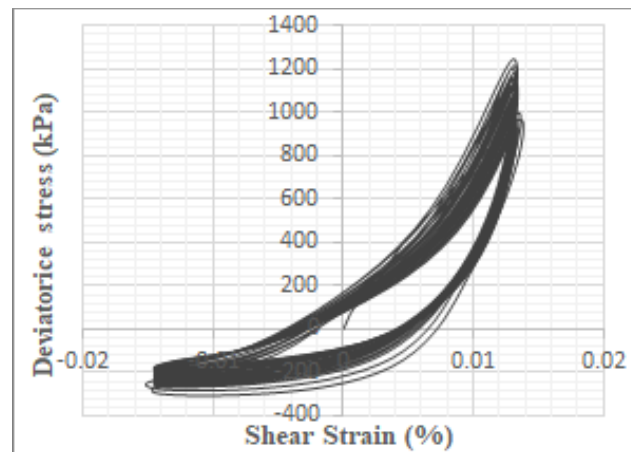
در رابطه فوق τ تنش برشی، σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی، γ کرنش برشی، ε_a کرنش محوری و ν ضریب پواسون می‌باشد. در رابطه ۲ با توجه



ب



الف



ج

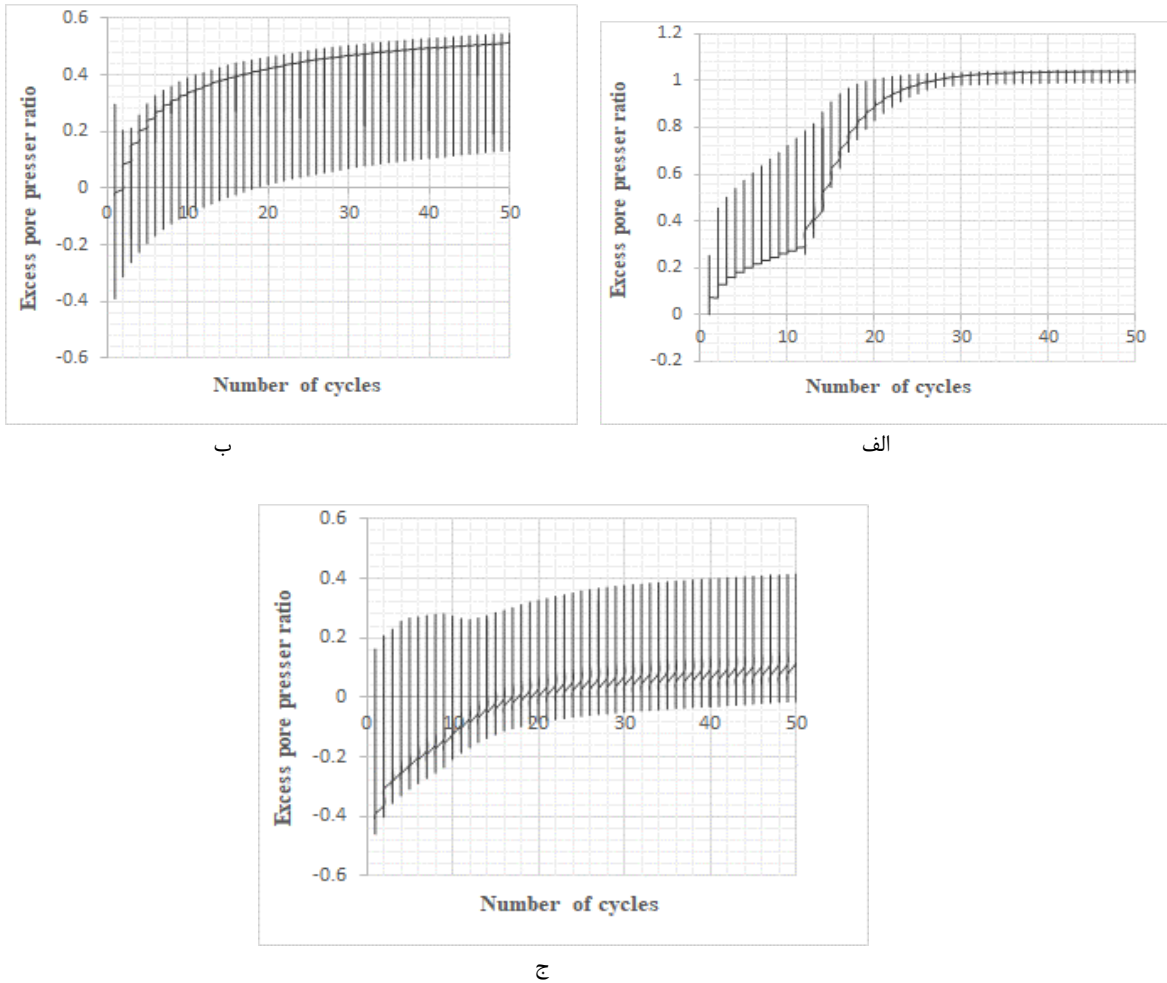
شکل ۵. نتایج حلقه هیستریزیس بر حسب تعداد سیکل بارگذاری الف) نمونه ماسه تمیز، ب) ماسه سیمانته، ج) ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 5. Results of the hysteresis loop versus number of loading cycles a) clean sand, b) cemented sand, c) zeolite-cemented sand sample with relative density of 50%, effective confining pressure of 200 kPa

نشان می دهد به دلیل آن که این نمونه ها در شرایط همسان تحکیم یافتند، نمودار تنش- کرنش از مبدا مختصات آغاز می شود. همانطور که در شکل ۵-الف مشاهده می شود برای نمونه ماسه خالص، حلقه هیستریزیس بعد از اعمال بارگذاری به حالت افقی شده و خاک روانگرا شده است در حالی که در نمودار ۵-ب و ۵-ج برای نمونه های ماسه سیمانته شده در کرنش برشی متناظر ۰/۱۵٪، سختی زیادی از خود نشان داده و نمونه بعد از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری روانگرا نشده است.

شده به وسیله ی المان خاک زیاد است و با افزایش بارگذاری مقدار آن کاهش یافته و در پایان به مقدار ثابتی میرسد. در حالی که برای نمونه های سیمانته با توجه به سختی زیاد ناشی از سیمانتاسیون، تنش تحمل شده بعد از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری تقریباً ثابت می باشد.

نتایج حلقه هیستریزیس آزمایش سه محوری نمونه ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم نسبی ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با تحکیم همسان در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج



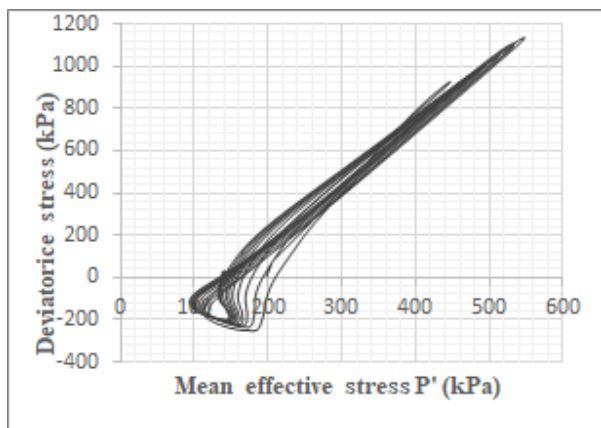
شکل ۶. نتایج نسبت فشار آب حفره ای اضافی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری الف) نمونه ماسه تمیز، ب) ماسه سیمانته، ج) ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 6. Results of the excess pore water pressure versus number of loading cycles a) clean sand, b) cemented sand, c) zeolite-cemented sand sample with relative density of 50%, effective confining pressure of 200 kPa

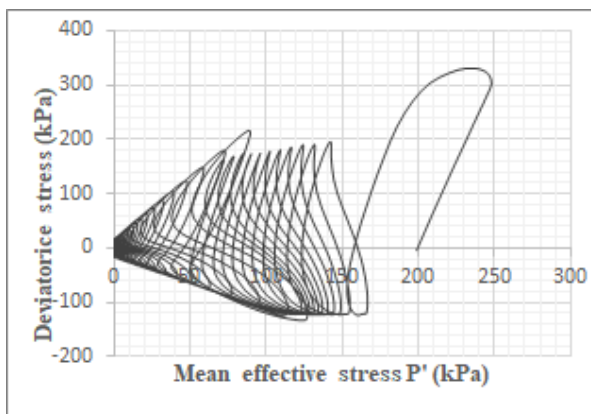
می‌شود و با اعمال تنش، نمونه تمایل به افزایش حجم و فشار آب حفره‌ای منفی دارد و رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد. این پدیده در اثر پر کردن فضای بین دانه‌های ماسه با مصالح ریزدانه و سخت شدن آن‌ها در بین مصالح ریزدانه می‌باشد.

شکل ۷ نتایج مسیر تنش موثر نمونه ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم نسبی ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با تحکیم همسان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود نمودار p-q در انتها به میدا مختصات رسیده که بیانگر روانگرایی نمونه ماسه تمیز می‌باشد. در حالی که این موضوع در نمونه‌های ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی صدق نمی‌کند.

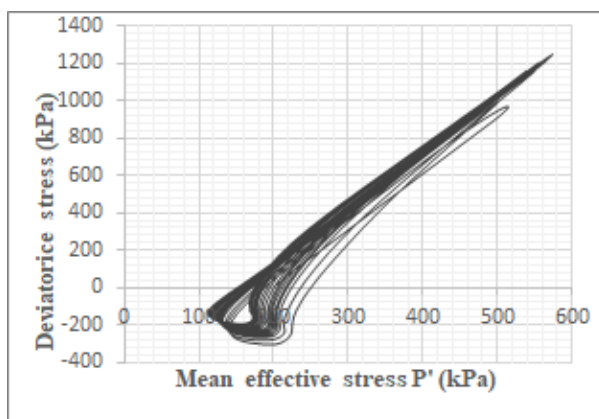
شکل ۶ مقادیر نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی (r_u) را در مقابل تعداد سیکل نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ نمونه ماسه تمیز پس از اعمال حدود ۲۰ سیکل بارگذاری روانگرا شده است، $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_c} = 1$. در حالی که در نمونه ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی پس از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری، نسبت فشار آب حفره‌ای به ترتیب به مقادیر حدود ۰/۴۲ و ۰/۵۵ رسیده و نمونه روانگرا نشده است. همانطور که از شکل ۶-الف مشاهده می‌شود در شرایط ماسه تمیز با دانسیته ۵۰ درصد بافت نمونه در صورت اعمال تنش به صورت فرو ریزشی و تمایل به کاهش حجم دارد بنابراین فشار آب حفره‌ای به صورت مثبت ظاهر می‌شود. در حالی که در شکل ۶-ب و ۶-ج در شرایط سیمانته شدن امکان تمایل به کاهش حجم که خودش را به صورت زهکشی نشده با افزایش فشار آب حفره‌ای نشان می‌دهد کمتر



ب



الف



ج

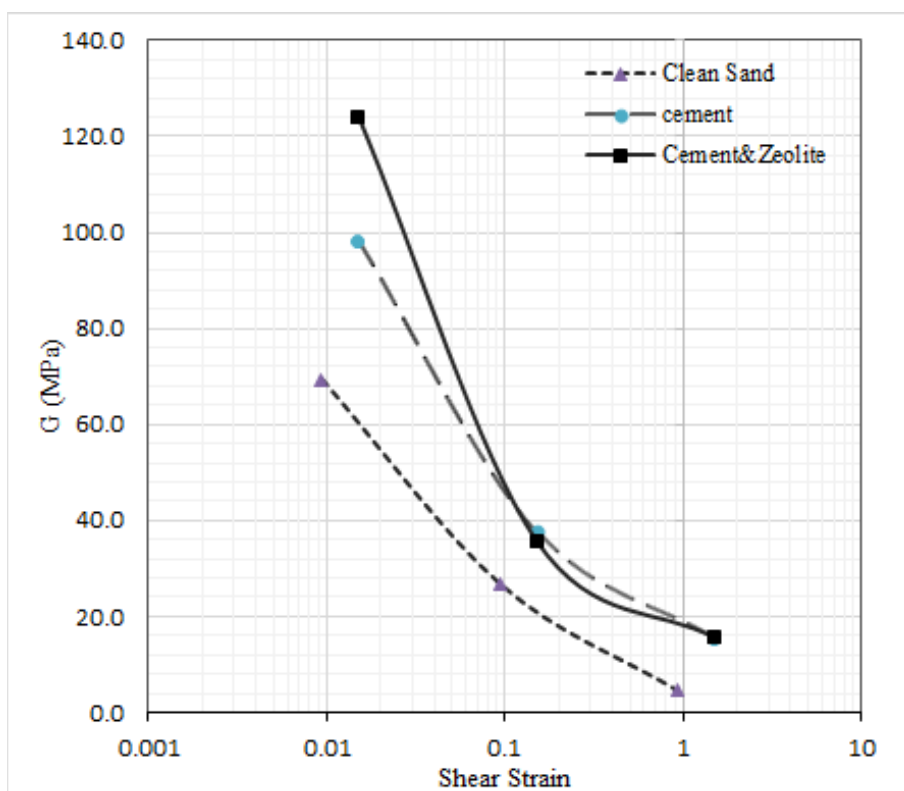
شکل ۷. نتایج مسیر تنش موثر الف) نمونه ماسه تمیز، ب) ماسه سیمانته، ج) ماسه سیمانته زئولیتی با تراکم ۵۰ درصد و تنش موثر همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 7. Results of the effective stress path pressure versus number of loading cycles a) clean sand, b) cemented sand, c) zeolite-cemented sand sample with relative density of 50%, effective confining pressure of 200 kPa

الی ۱۵/۴ مگاپاسکال و ۱۲۴/۲ الی ۱۵/۶ مگاپاسکال در محدوده کرنش برشی حدود ۰/۰۱۵ الی ۱/۵ درصد است. همانطور که مشخص است برای تمامی نمونه ها اعم از نمونه ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی با افزایش کرنش برشی، مقادیر مدول برشی کاهش می یابد. مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه سیمانته در تمامی محدوده کرنش های برشی بزرگتر از مقادیر مدول برشی نمونه ماسه تمیز به دست آمده است. شکل ۸ نیز نشان می دهد با جایگزینی زئولیت به میزان ۳۰ درصد به جای سیمان در نمونه های سیمانته، مقادیر مدول برشی افزایش می یابد. این افزایش در مقدار کرنش برشی کوچکتر (۰/۰۱۵٪) به وضوح قابل مشاهده است. این رفتار مشابه مطالعاتی که کردناییج و همکاران با انجام آزمایش المان خمشی به بررسی مدول برشی ماکزیمم نمونه ماسه سیمانته زئولیتی پرداختند، می باشد. هر چند نتایج به دست آمده از پژوهش کردناییج و همکاران [۲۹]

۳-۲- مدول برشی

به منظور بررسی تاثیر سیمانتهسیون در بهبود خواص دینامیکی و تاثیر جایگزینی زئولیت به جای سیمان آزمایشهای سه محوری سیکلی بر روی نمونه های ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی با نسبت آب به سیمان ۱ انجام شده است. در تمامی آزمایش های سه محوری سیکلی انجام شده درصد سیمان مصرفی برای نمونه های سیمانته، ۴ درصد نسبت وزنی خاک پایه و درصد زئولیت مصرفی برای نمونه سیمانته زئولیتی، ۳۰ درصد نسبت وزنی سیمان می باشد. همانطور که در شکل ۸ دیده می شود مقادیر مدول برشی نمونه ماسه تمیز برای فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال ۶۹/۴ الی ۴/۵ مگاپاسکال در محدوده کرنش برشی حدود ۰/۰۱ الی ۱ درصد است. در حالی که مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی برای فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۹۸/۱



شکل ۸. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی، فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

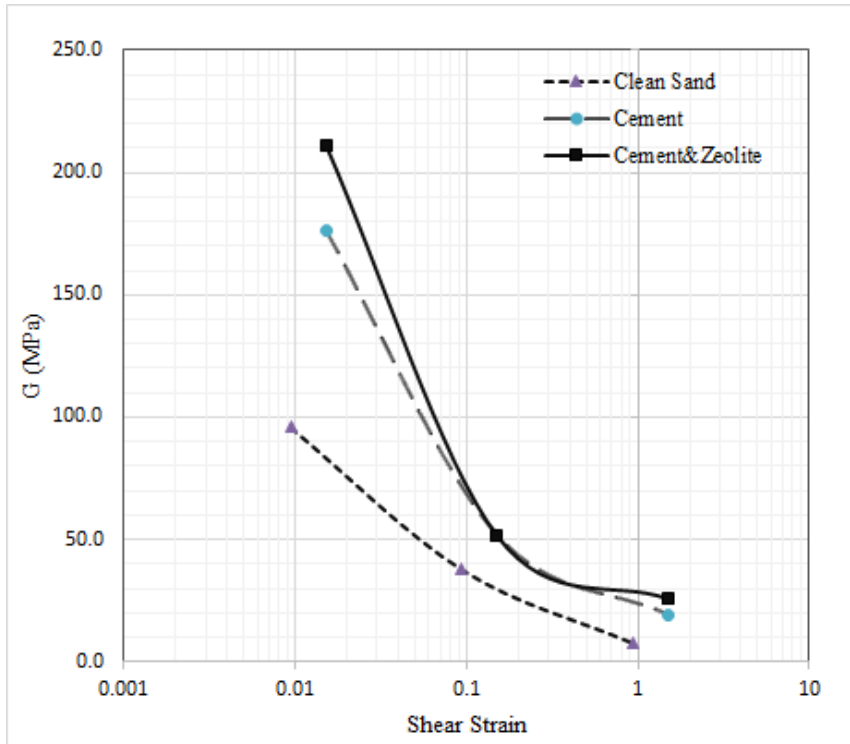
Fig. 8. Variation of the shear modulus with shear strain, confining pressure of 100 kPa

نتایج مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی برای فشار همه جانبه ۳۰۰ در محدوده کرنش های برشی مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که از اشکال ۸ الی ۱۰ مشاهده می شود با افزایش تنش همه جانبه در یک دامنه کرنش برشی مشخص، مقدار مدول برشی افزایش می یابد.

به طور کلی مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 در مقابل CaO در هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی سیمان تاثیر قابل توجهی در مقاومت نمونه سیمانته شده دارند. در شرایط کافی CaO ، افزایش مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 منجر به واکنش پوزولانی فعالتر و در نتیجه افزایش سختی نمونه ماسه سیمانته شده می شود. با جایگزینی ۳۰ درصدی زئولیت به جای سیمان محتوای سیمان کاهش می یابد. این بدان معناست که SiO_2 و Al_2O_3 افزایش یافته در حالی که مقدار CaO کاهش می یابد. بنابراین در پروژه های بهسازی خاک با جایگزین نمودن بخشی از سیمان با پوزولان های طبیعی همچون زئولیت که به راحتی قابل استخراج و با محیط سازگار بوده و افزایش قابل توجهی در سختی خاک ایجاد میکند از اهمیت بالایی برخوردار است.

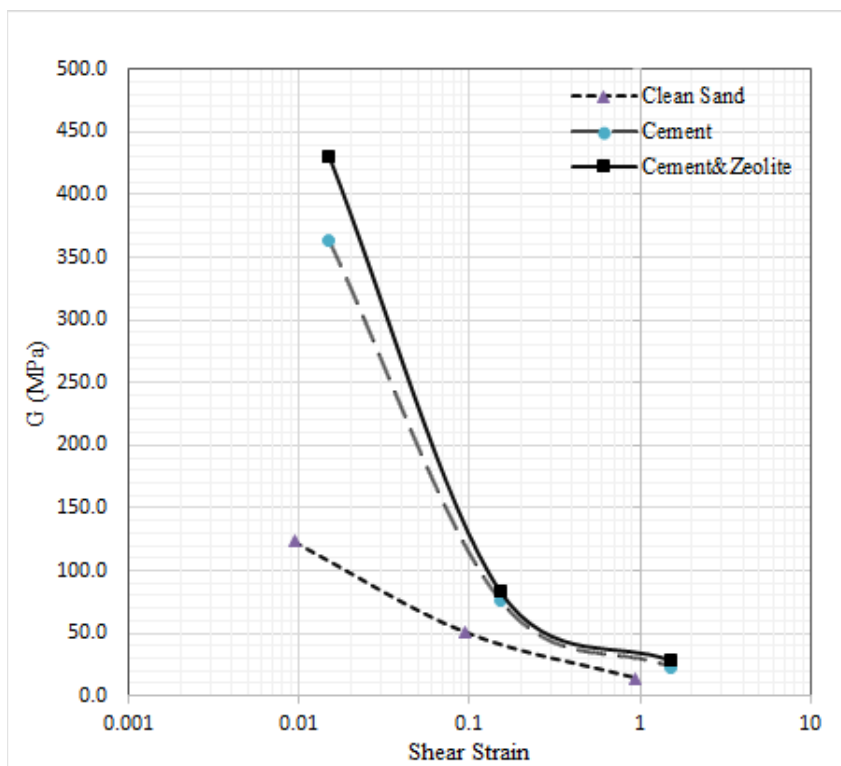
ضریب بزرگتری از نسبت مدول برشی ماسه سیمانته زئولیتی به ماسه تمیز را نشان میدهد که علت آن مقدار سیمان بیش از ۲۰ درصد نسبت وزنی ماسه پایه می باشد. در حالی که در پژوهش حاضر محتوای سیمان در نمونه های پایه، ۴٪ است.

شکل ۹ مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی برای فشار همه جانبه ۲۰۰ در محدوده کرنش های برشی مختلف نشان می دهد. مقادیر مدول برشی نمونه ماسه سیمانته و نمونه ماسه سیمانته زئولیتی نسبت به مقادیر مدول برشی نمونه ماسه تمیز در کرنش برشی کوچک تر به ترتیب حدود ۸۴٪ و ۱۲۰٪ بزرگ تر است. همچنین مقادیر مدول برشی با افزایش کرنش برشی کاهش می یابد که برای نمونه های سیمانته ناشی از کاهش سختی که میتوان به تضعیف پیوند بین دانه های ماسه و سیمان نسبت داد. این رفتار مشابه مطالعاتی که بر روی ماسه سیمانته توسط ماهر و همکاران [۳۲] و ماسه های تزریق شده با سیمان های خیلی ریز توسط ریبای و همکاران [۷] است.



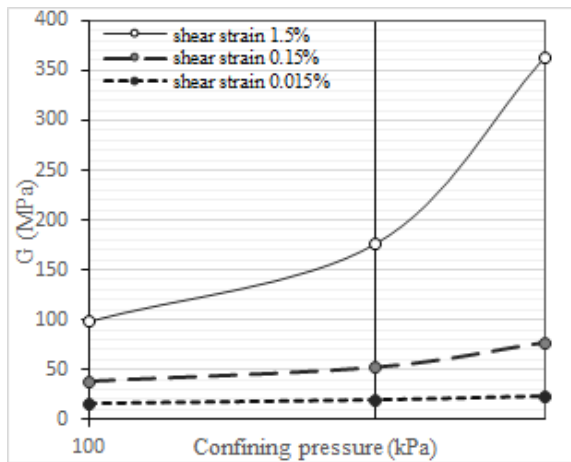
شکل ۹. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی، فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 9. Variation of the shear modulus with shear strain, confining pressure of 200 kPa

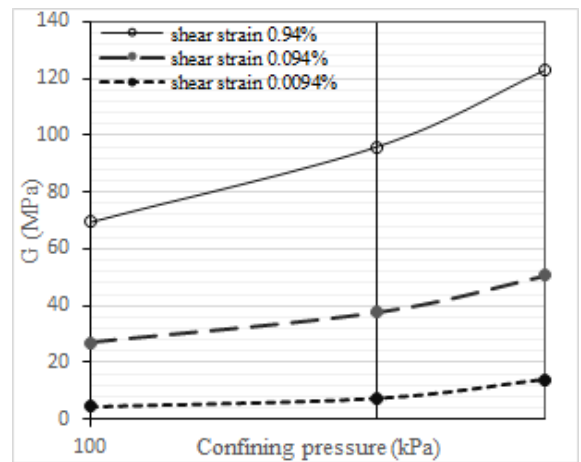


شکل ۱۰. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی، فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال

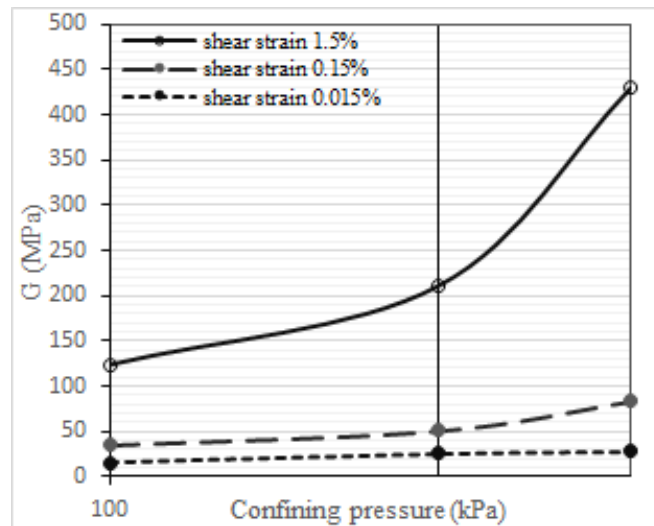
Fig. 10. Variation of the shear modulus with shear strain, confining pressure of 300 kPa



ب



الف



شکل ۱۱. تغییرات مدول برشی بر حسب لگاریتم فشار همه جانبه، الف) نمونه ماسه تمیز، ب) ماسه سیمانته، ج) ماسه سیمانته زئولیتی

Fig. 11. Variation of the shear modulus versus confining pressure a) clean sand, b) cemented sand, c) zeolite-cemented sand sample

ترتیب برای ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی نشان میدهد. نتایج بیانگر آن است برای نمونه های سیمانته شده نسبت به نمونه ماسه تمیز، افزایش فشار همه جانبه تاثیری بیشتری در افزایش سختی در کرنش های برشی کوچک دارد. به طور مثال در کرنش برشی کوچک با افزایش فشار همه جانبه از ۲۰۰ به ۳۰۰ کیلوپاسکال، مدول برشی ۲۸، ۱۰۶ و ۱۰۳٪ به ترتیب برای ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته زئولیتی افزایش می یابد.

از طرفی می توان با جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقادیر مصرفی سیمان در پروژه های بهسازی را کاهش داده تا گام کوچکی در کاهش تولید گاز دیاکسیدکربن ناشی از تولید سیمان برداشت.

۳-۳- تاثیر فشار همه جانبه

به منظور بررسی تاثیر فشار همه جانبه بر افزایش سختی نمونه های ماسه تمیز و سیمانته شده، مدول برشی بر حسب فشار همه جانبه ترسیم شد. شکل ۱۱ مقادیر مدول برشی بر حسب لگاریتم فشار همه جانبه را به

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار سیکیلی ماسه سیلیکاتی بابلسر بهسازی شده با ژئولیت و سیمان پرتلند در دامنه کرنش برشی متوسط با استفاده از دستگاه سه محوری سیکیلی پرداخته شد و خلاصه نتایج به شرح ذیل ارائه می گردد.

- برای تمامی نمونه ها اعم از نمونه ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته ژئولیتی با افزایش کرنش برشی، مقادیر مدول برشی کاهش می یابد.

- با افزایش کرنش برشی، سختی ایجاد شده در نقاط تماس بین دانه ای کاهش یافته و موجب سست شدن و گسیختگی پیوندهای سیمانی می گردد. این به نوبه خود موجب آزاد شدن محصور شدگی حاصل از سختی شده و نهایتاً سبب کاهش سریع تر مدول برشی با افزایش کرنش ها می شود.

- مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه سیمانته با نسبت آب به سیمان ۱، در تمامی محدوده کرنش های برشی بزرگ تر از مقادیر مدول برشی نمونه ماسه تمیز به دست آمده است.

- با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان به میزان ۳۰ درصد در نمونه های سیمانته، مقادیر مدول برشی افزایش می یابد. به عبارتی با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، مقدار CaO کاهش و مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 افزایش می یابد. به طوری که افزایش SiO_2 و Al_2O_3 تا مقادیر مشخص، تاثیر قابل توجهی در افزایش سختی نمونه سیمانته شده دارد.

- با افزایش فشار همه جانبه، مقادیر مدول برشی نمونه های ماسه تمیز، ماسه سیمانته و ماسه سیمانته ژئولیتی افزایش مییابد و این افزایش برای نمونه های سیمانته و سیمانته ژئولیتی در محدوده فشار همه جانبه ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال قابل توجه است.

- برای نمونه های سیمانته نسبت به نمونه ماسه تمیز، افزایش فشار همه جانبه تاثیر بیشتری در افزایش سختی در کرنش های برشی کوچک دارد.

منابع

- sands, Geotechnical and Geological Engineering, 31(4) (2013) 1041–1058.
- [3] M. Yildiz, A.S. Soganci, Improvement of the strength of soils which comprises granular pumice by injection of cement under low pressure, Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering, 22(1) (2015)81–89.
- [4] P.L. Lovelady, M. Picornell, 'Sample coupling in resonant column testing of cemented soils', In: Wolfenden A (ed.) Dynamic elastic modulus measurements in materials, ASTM, (1990) pages 180-94.
- [5] A.L. Fernandez, J.C. Santamarina, Effect of cementation on the small-strain parameters of sands, Canadian Geotechnical Journal, 38 (2001) 191–9.
- [6] I.A. Pantazopoulos, D.K. Atmatzidis, Dynamic properties of microfine cement grouted sands, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 42 (2012) 17–31.
- [7] E. Delfosse-Ribay, I. Djeran-Maigre, R. Cabrillac, D. Gouvenot, Shear modulus and damping ratio of grouted sand, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 (2004) 461–71.
- [8] A. Nakhaei, S.M. Marandi, S.S. Kermani, M.H. Bagheripour, Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43 (2012) 124-132.
- [9] A.J. Choobbasti, A. Vafaei and S.S. Kutanaei, Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica, Open Engineering, 5(1) (2015) 111–116.
- [10] G.W. Clough, N. Sitar, R.C. Bachus, N. Shafii Rad, Cemented sands under static loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT6) (1981) 799-817.
- [11] P.V. Lad, D.D. Overton, Cementation effects in frictional materials, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(10) (1989) 1373-1387.
- [12] C. Dano, P.Y. Hicher, S. Tailiez, Engineering properties of grouted sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(3) (2004)328-338.
- [1] M. Mollamahmutoglu, Y. Yilmaz, Engineering properties of medium-to-fine sands injected with microfine cement grout, Marine Georesources & Geotechnology. 29(2) (2011) 95–109.
- [2] I.N. Markou, A.I. Droudakis, Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted

- Zeolite Mixtures, Published in *Teknik Dergi*, 17(3) (2006) 3879-3892.
- [24] M. Azhdarizadeh, S.F. Sajedi, Evaluation of natural zeolite effect on the mechanical properties of concrete containing coarse masonry recycled aggregates, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Online publishing, (1399) (In Persian).
- [25] R.A. Izadifard, M. Abdi-Moghadam, Experimental evaluation of substitution various content of zeolite with cement on improving the mechanical and durability of concrete at high temperatures, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Online publishing, (1398) (In Persian).
- [26] F. Abdolshah, O. Rezayfar, M. Gholhaki, Mechanical properties of concrete incorporating bentonite and zeolite as replacement of cement, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Online publishing, (1399) (In Persian).
- [27] J.X. Shi, The applications of zeolite in sustainable binders for soil stabilization, *Applied Mechanics and Materials*. 256 (2013) 112–5.
- [28] H. Mola-Abasi, I. Shooshpasha, Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (2016)746-752.
- [29] A. Kordnaeij, R. Ziaie Moayed, M. Soleimani, Small strain shear modulus of sands grouted with zeolite-cement suspension, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Online publishing, (1397) (In Persian).
- [30] A.J. Choobbasti, A. Vafaei S.S. Kutanaei, Static and Cyclic Triaxial Behavior of Cemented Sand with Nanosilica, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10) (2018)04018269.
- [31] R.S. Ladd, (1978) Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, 1(1) (1978) 16-23.
- [32] M.H. Maher, K.S. Ro, J.P. Welsh, High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 13 (1994) 131–8.
- [13] E. Asghari, D.G. Toll, S.M. Haeri, Effect of cementation on the shear strength of Tehran gravely sand using triaxial tests, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 15(1) (2004) 65-71.
- [14] N. Li, R.D. Woods, Dynamic behavior of grouted sand, In: Cakmak, AS, (ed.) *Soil structure interaction*, Amsterdam, Elsevier, (1987) pages 221-41.
- [15] Y.B. Acar, A. El-Tahir, Low strain dynamic properties of artificially cemented sand, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 11 (1986) 1001–1015.
- [16] P.K. Mehta, *Concrete technology for sustainable devolepment Concrete Technology for a Sustainable devolepment in the 21st Century*, CRC Press, Boca Raton, (1999) p 83.
- [17] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12) (2011) 1244–56.
- [18] K.L. Scrivener, A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41 (2011) 651–65.
- [19] A.A. Ramezani-pour, A. Kazemian, M. Sarvari, B. Ahmadi, Use of natural zeolite to produce self consolidating concrete with low Portland cement content and high durability, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5) (2012) 589–96.
- [20] H. Mola-Abasi, B. Kordtabar, A. Kordnaeij, Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5) (2016) 1539–51.
- [21] H. Mola-Abasi, B. Kordtabar, A. Kordnaeij, Parameters controlling strength of zeolite– cement sand mixture, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1) (2017) 72–9.
- [22] B. Ahmadi, Investigation and feasibility study of using zeolite as pozzolan in concrete. *Technical Engineering Faculty University of Tehran*, (1986) (In Persian).
- [23] A. Kaya, S. Durukan, A.H. Oren, Y.Y. Aksoy, Determining the Engineering Properties of Bentonite

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Saadati, M. Derakhshandi, A. Bahmanpour, N. Ganjian, Experimental investigation of cyclic behavior of zeolite cemented sand, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5441-5456.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18843.6978](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18843.6978)

