بررسی خواص مکانیکی ماسه تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت با استفاده از آزمایش برش ساده مونوتونیک

ایمان امیری[۱]، عبدالحسین حداد*[۲]، یاسر جعفریان[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
[۳] دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

(دریافت: ۹۹/۱/۱۶، پذیرش: ۹۹/۱۰/۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۰/۸)

چکیده

این مقاله نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی بر روی مقاومت برشی ماسه سیمانته (Cemented Sand) و نیز تأثیر جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان را ارائه می‌دهد. تعدادی آزمایش برش ساده مونوتونیک (Monotonic) بر روی نمونه‌های ماسه‌ای ترکیب‌شده با سیمان و نیز ماسه ترکیب‌شده با سیمان و زئولیت و در فواصل ۷ و ۹۰ روزه انجام گردید. این نمونه‌ها با درصد سیمان‌های ۲، ۴ و ۶ درصد و همچنین با درصد جایگزینی‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد زئولیت به‌جای سیمان ساخته شدند و تحت تنش‌های سربار ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند. برای دستیابی به این هدف از زئولیت معدنی، سیمان تیپ دو شاهرود و ماسه بابلسر استفاده شد. نتایج حاصله از آزمایش برش ساده مونوتونیک نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی وزنی زئولیت به‌جای سیمان تا ۳۰ درصد و در مدت عمل‌آوری ۹۰ روزه، مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت تقریباً تا ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: آزمایش برش ساده مونوتونیک، سیمان، زئولیت، مقاومت برشی.

۱- مقدمه

تحقیقات بسیاری جهت فهم بهتر تأثیر سیمانتاسیون[۱] بر روی خصوصیات مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای انجام شده است (Hausmann، ۱۹۹۰؛ Finn، ۲۰۰۲). سیمانتاسیون یکی از زیرمجموعه‌های اصلاح خاک می‌باشد که در دسته اصلاح فیزیکی و شیمیایی قرار می‌گیرد که موجب اتصال ذرات خاک به یکدیگر و جلوگیری از فروپاشی اسکلت خاک و در نتیجه سبب افزایش مقاومت برشی و مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای می‌گردد. دلیل این امر را می‌توان به‌خاطر مواد معدنی سیمانته هیدارته[۲] شده دانست که ذرات خاک را در بر می‌گیرند (Consoli و همکاران، ۲۰۰۹؛ Saberian و Khabiri، ۲۰۱۷). با استفاده از آزمایش برش ساده می‌توان به بررسی رفتار و شناخت پارامترهای مقاومتی خاک پرداخت. تنش‌های برشی موجود در خاک را می‌توان به دو حالت استاتیکی و دینامیکی تقسیم نمود (Li و همکاران، ۲۰۱۶؛ Jafarzadeh و Sadeghi، ۲۰۱۲؛ Kim، ۲۰۰۹). استفاده از روش‌های بهسازی (روش‌هایی مانند تزریق به کمک ریزشمع‌ها) در خاک‌های ماسه‌ای سست، که مستعد روانگرایی نیز می‌باشند و مقاومت برشی و پایداری حجمی پایینی دارند، امری لازم و ضروری می‌باشد. معمولاً جهت بهبود این پارامترها از روش افزودن سیمان (سیمانتاسیون) استفاده می‌کنند. مقاومت ترکیب خاک و سیمان تحت تأثیر خواص مکانیکی خاک، مقدار سیمان، تخلخل، مقدار رطوبت، درجه تحکیم و مدت زمان عمل‌آوری قرار دارد (Cardoso و همکاران، ۲۰۱۷). در ماسه‌ها عوامل سیمانتاسیون طبیعی غالباً به‌صورت سیلیکات‌ها، سیلیس آمورف[۳]، اکسید آهن و کربنات کلسیم می‌باشند (Clough، ۱۹۸۱). یکی از راهکارهای مناسب جهت کاهش مصرف و تولید سیمان، استفاده از مواد پوزولانیک[۴]، به‌خصوص پوزولان‌های طبیعی و جایگزینی آن به‌جای سیمان می‌باشد. پوزولان‌ها عمدتاً شامل سیلیکون یا

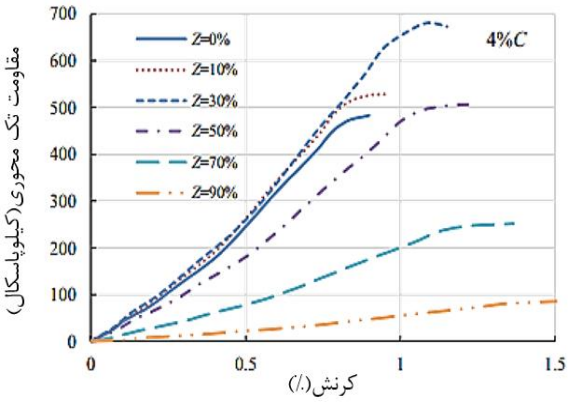
1. Cementation
2. Hydrated
3. Amorphous
4. Pozzolanic Materials

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۳۰۶۶۲۱۰

آدرس ایمیل: imanamiri@semnan.ac.ir (ا. امیری)، ahadad@semnan.ac.ir (ع. حداد)، yjafarianm@iiees.ac.ir (ی. جعفریان).

ترکیب سیلیس و آلومینیوم می‌باشند. پوزولان‌ها به‌طور گسترده‌ای در سیمان‌ها و صنعت بتن مورداستفاده قرار می‌گیرند (Rahgozar و همکاران، ۲۰۱۸). میکروسیلیس[5]، پرلیت[6]، متاکائولن[7] و زئولیت[8] از شناخته‌شده‌ترین پوزولان‌های طبیعی محسوب می‌شوند.

ازآنجایی‌که هزینه تهیه سایر پوزولان‌ها به‌جز زئولیت تقریباً بالا می‌باشد، بنابراین استفاده آن‌ها در مقیاس بزرگ مقرون به‌صرفه نخواهد بود. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، زئولیت یکی از پوزولان‌های طبیعی است که در صنعت بتن مورداستفاده قرارگرفته است. زئولیت عمدتاً حاوی سیلیس، اکسید آلومینیم می‌باشد، که با اکسید کلسیم واکنش داده و در نتیجه موجب افزایش مقاومت ترکیب حاصل می‌گردد. علاوه بر این افزودن زئولیت خواص ساختار فضایی زئولیت را بهبود می‌بخشد، همچنین تخلخل مخلوط خمیر سیمان حاصل را کاهش می‌دهد (El Mir و Nehme، ۲۰۱۷). برای تثبیت بسترهای ماسه‌ای و خاک‌ریزهای ماسه‌ای می‌توان از ترکیب سیمان و زئولیت استفاده کرد. هنگامی‌که ترکیب آب و سیمان در تماس با ماده معدنی زئولیت قرار می‌گیرد، ساختار سیلیکاته[9] آلومینیم موجود در زئولیت، تحت واکنش با یون‌های OH^- در محیطی با pH بالا، شروع به تجزیه شدن می‌کند. پس‌ازاین تجزیه، $[SiO(OH)3]^-$ و $[AlO(OH)4]^-$ تولید می‌گردد که با کلسیم واکنش داده و ترکیب هیدراته سیلیکات کلسیم و سیلیکات آلومینیم تشکیل می‌گردد (Shi، ۲۰۰۰). مطابق شکل (۱) افزودن زئولیت حتی به‌مقدار کم، مقاومت مخلوط سیمان و ماسه را در زمان عمل‌آوری ۲۸روزه افزایش می‌دهد (Shooshpasha، ۲۰۱۶).



شکل ۱- نمودار تنش- کرنش ماسه تثبیت‌شده با سیمان در درصد جایگزینی‌های مختلف زئولیت به‌جای سیمان (Shooshpasha، ۲۰۱۶)

۲- روش تحقیق

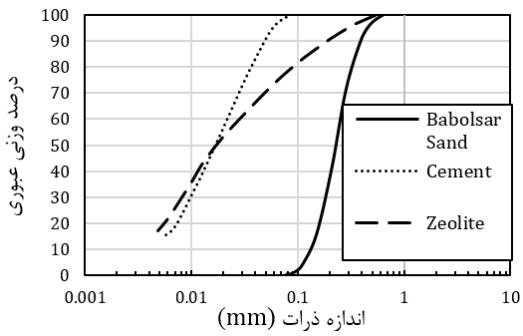
امروزه استفاده از زئولیت در بیشتر کشورها، مخصوصاً کشورهای پیشرفته و صنعتی، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. قیمت ارزان و معادن فراوان زئولیت در ایران (به‌ویژه در استان سمنان) و نیز کاهش مخاطرات محیط زیستی، باعث گردید تا از این ماده به‌عنوان ماده افزودنی به ماسه سیمانته استفاده گردد. بنابراین در این تحقیق از زئولیت به‌عنوان ماده افزودنی به ماسه بابلسر تثبیت‌شده با سیمان استفاده شده است (خلقی، ۱۳۴۹). برای بررسی تأثیر زئولیت بر پارامترهای مقاومتی ماسه تثبیت‌شده با سیمان یک سری برنامه آزمایشگاهی شامل معرفی مصالح مصرفی و طرح اختلاط آن، نمونه‌سازی و روند آزمایش طرح شد.

۲-۱- مصالح مورداستفاده انجام آزمایش

مصالح استفاده‌شده در این مطالعه شامل خاک ماسه‌ای بابلسر، زئولیت و سیمان پرتلند تیپ دو تولیدشده در کارخانه شاهرود می‌باشد. ماسه استفاده‌شده از نوع SP بوده که دارای ذرات مابین مدور و زاویه‌دار می‌باشد. مشخصات فیزیکی ماسه بابلسر در ۰جدول (۱) ذکر شده است، و همچنین منحنی دانه‌بندی این نوع ماسه، زئولیت و سیمان در ۰شکل (۲) آورده شده است. تخلخل بیشینه و کمینه ماسه بابلسر بر اساس استاندارد ASTM D 4253-4 محاسبه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ماسه بابلسر

ویژگی	استاندارد	مقدار
G_S	ASTM-D854-92	۲/۷۲
e_{max}	ASTM-D4253-4	۰/۸۶
e_{min}	ASTM-D4253-4	۰/۵۸
D_{50}(mm)	ASTM-C136	۰/۲۴
C_U		۱/۹
C_C		۰/۸۸
طبقه‌بندی ماسه	ASTM D2487	SP



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه بابلسر، زئولیت و سیمان

5. Microsilica
6. Perlite
7. Metakaolin
8. Zeolite
9. Silicate Structure

در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه شاهرود واقع در استان سمنان مورداستفاده قرار گرفته است. کاربرد اصلی آن در پروژه‌هایی است که حرارت هیدراتاسیون[10] متوسط موردنیاز بوده و حملهٔ سولفات‌ها نیز در حد متوسط می‌باشد. سطح مخصوص ویژه این سیمان ۳۰۶۰ گرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان شاهرود در ۰جدول (۲) آمده است (www.shahroudcement.com).

زئولیت مورداستفاده در این تحقیق از معدنی واقع در شمال سمنان برداشت شده است که مطابق با سیستم طبقه‌بندی متحد در رده ML قرار دارد. با سطح ویژه حدود ۱۰۰۰۰ گرم بر سانتی-مترمربع و جذب آب ۶۰ درصد حجمی که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در ۰جدول (۳) آورده شده است (www.zeomed.ir).

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان شاهرود

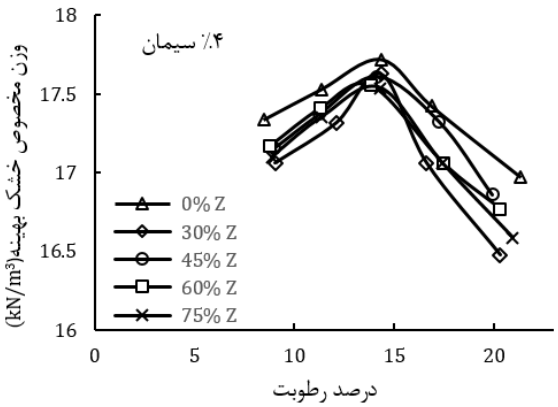
ترکیب شیمیایی	تیپ ۲	
	نتایج آزمایش(٪)	استاندارد ایران ISIRI389
SiO_2 (اکسید سیلیسیوم)	۲۱/۱۱	_
Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم)	۴/۴۲	_
Fe_2O_3 (اکسید آهن)	۳/۹۶	_
CaO (اکسید کلسیم)	۶۳/۳۶	_
MgO (اکسید منیزیم)	۱/۵۱	< ۵
SO_3 (انیدریک سولفوریک)	۲/۶۱	< ۳
K_2O (اکسید پتاسیم)	۰/۵۱	_
Na_2O (اکسید سدیم)	۰/۳۸	_
Free CaO (آهک آزاد)	۱/۲۳	_
Blaine (سطح مخصوص) (cm^2/gr)	۳۰۵۵	>۲۸۰۰

جدول ۳- مشخصات زئولیت معدنی

مشخصات	زئولیت
جذب آب	۶۰ درصد حجمی
سطح ویژه (gr/cm^2)	۱۰۰۰
وزن واحد حجم در حالت طبیعی (gr/cm^3)	۱/۱۹۲
ظرفیت تبادل یونی (gr/meq)	۲/۵۶
چگالی دانه‌های جامد	۲/۱۷

۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح اختلاط

به‌منظور بررسی اثر زئولیت بر پارامترهای مقاومت برشی مخلوط ماسه و سیمان و زئولیت، از نمونه‌های که از روش کوبش مرطوب ساخته شده‌اند، استفاده شده است. کلیه نمونه‌ها دارای قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۵ میلی‌متر می‌باشند. در مقایسه با نمونه‌های مورداستفاده در آزمایش سه‌محوری، با صرف‌نظر از تغییرات چگالی در ارتفاع، نمونه را می‌توان در یک لایه تهیه نمود. در ساخت این نمونه‌ها از قالب‌های با قطر داخلی ۷۰ میلی‌متر استفاده گردید. جهت رسیدن به یکنواختی مناسب در ساخت نمونه‌ها، مصالح تشکیل‌دهنده را به چهار بخش تقسیم نموده و هر بخش را جداگانه به‌خوبی مخلوط کرده تا درنهایت به ترکیبی با یکنواختی بیشتر حاصل گردد. مقدار آب موردنیاز جهت ساخت نمونه‌ها از انجام آزمایش تراکم و تعیین رطوبت بهینه تعیین شده است. در ادامه نتایج حاصل از انجام آزمایش تراکم برای طرح اختلاط ۴ درصد سیمان و درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان در شکل (۳) ارائه شده است، که می‌توان به‌مقدار رطوبت بهینه تقریبی ۱۴ درصد اشاره نمود. آزمایش تراکم بر روی ماسه تثبیت‌شده با سیمان در طرح اختلاط‌های ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصدهای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد زئولیت جایگزین نیز انجام شد، که مقدار درصد رطوبت بهینه آن‌ها تقریباً در محدوده بین ۱۴ و ۱۴/۵ قرار گرفت.



شکل ۳- تراکم اختلاط ۴ درصد سیمان و درصدهای مختلف زئولیت با سیمان

پس از انجام آزمایش‌های متعدد مشاهده گردید که افزایش سیمان موجب افزایش مقدار وزن مخصوص بیشینه خشک خاک می‌شود. این امر را می‌توان به ریزتر بودن سیمان و پر کردن فضای خالی بین ذرات ماسه مرتبط دانست. همچنین با افزایش مقدار زئولیت به‌طورکلی مقدار تراکم نمونه‌ها سیر نزولی پیدا می‌کند که به نظر می‌رسد پایین‌تر بودن وزن مخصوص دانه‌های زئولیت موجب پیدایش این روند نزولی می‌باشد. نمونه‌های از پیش ساخته‌شده با اختلاط‌های ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان به‌عنوان نمونه مبنا تهیه شدند. برای زئولیت نیز مقدار جایگزینی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد به‌جای سیمان در نظر گرفته شد. برنامه آزمایش‌ها در ۰ آورده شده است. این تعداد نمونه برای سه تنش سربار ۱۰۰،

10. Hydration Heat

۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال ساخته شدند. مصالح موردنظر جهت ساخت نمونه ابتدا کاملاً در گرم‌خانه خشک و سپس مقدار آن‌ها مطابق با وزن واحد حجم خشک ماکزیمم به‌دست آمدند. از هر طرح اختلاط تعداد شش عدد نمونه ساخته شد که برای جلوگیری از تغییرات چشمگیر درصد رطوبت قبل از آزمایش در محفظه‌های مخصوصی جهت تکمیل روند عمل‌آوری، نگهداری شدند. از شروع ساخت نمونه تا عمل‌آوری و نگهداری آن و در انتها جایگذاری نمونه در داخل غشا (شکل (۴)). که سه عدد آن‌ها در فاصله ۷ روزه و سه عدد دیگر در فاصله ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند (۱۸۰ عدد نمونه).

جدول ۴- برنامه آزمایش‌ها

سری آزمایش	ترکیبات نمونه	سن نمونه ساخته‌شده (روز)	درصد وزنی سیمان	درصد زئولیت جایگزین سیمان	درصد وزنی زئولیت	شماره نمونه
سری اول	ماسه و سیمان	۷ روزه و ۹۰ روزه	۲	۰	۰	۲-۱
			۴	۰	۰	۴-۳
			۶	۰	۰	۶-۵
سری دوم	ماسه و سیمان و زئولیت	۷ روزه و ۹۰ روزه	۱/۴	۳۰	۰/۶	۸-۷
			۱/۱	۴۵	۰/۹	۱۰-۹
			۰/۸	۶۰	۱/۲	۱۲-۱۱
			۰/۵	۷۵	۱/۵	۱۴-۱۳
			۲/۸	۳۰	۱/۲	۱۶-۱۵
			۲/۲	۴۵	۱/۸	۱۸-۱۷
			۱/۶	۶۰	۲/۴	۲۰-۱۹
			۱	۷۵	۳	۲۲-۲۱
			۴/۲	۳۰	۱/۸	۲۴-۲۳
			۳/۳	۴۵	۲/۷	۲۶-۲۵
			۲/۴	۶۰	۳/۶	۲۸-۲۷
			۱/۵	۷۵	۴/۵	۳۰-۲۹

شکل ۴- مراحل ساخت، عمل‌آوری و جایگذاری نمونه در دستگاه برش ساده

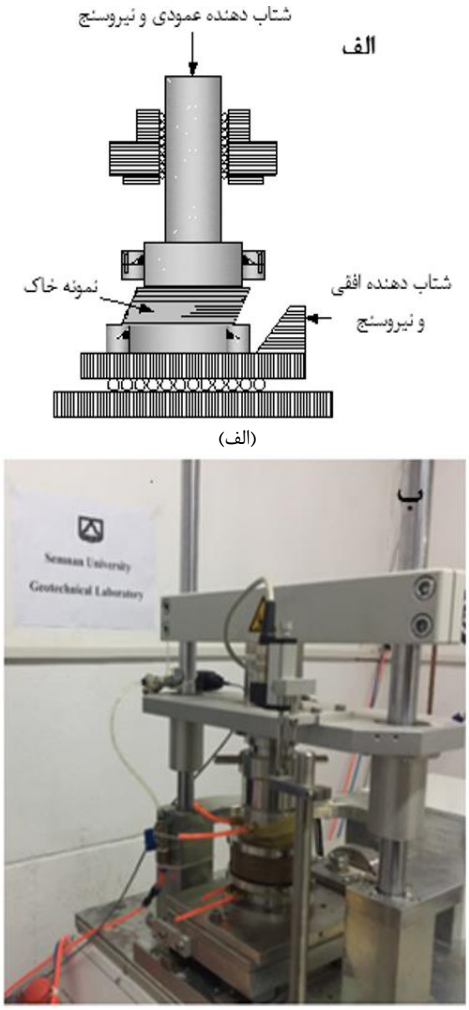
مطابق با استاندارد ASTM D 6528-00 جهت انجام برش ساده بر روی نمونه‌های از پیش‌ساخته شده، لازم است از کلاهک-هایی با زائده و برجستگی در بالا و پایین استفاده نمود. همان‌گونه که در ۰شکل (۵) مشاهده می‌شود. نمونه‌های از پیش‌ساخته شده، پس از ایجاد شیارهایی مطابق با زائده‌های موجود بر روی کلاهک-ها، روی آن‌ها قرارگرفته و کاملاً ثابت می‌شوند.

شکل ۵- زائده‌های ایجادشده بر روی کلاهک‌های بالا و پایین و نمونه شکسته شده تحت آزمایش برش ساده مونوتونیک

۳- دستگاه برش ساده سیکلی (CSS) [11]

نخستین دستگاه برش ساده در سال ۱۹۵۳ توسط رُسکو[12] در دانشگاه کمبریج ساخته و سپس توسط سایر محققین آن دانشگاه تکمیل گردید (Roscoe، ۱۹۵۳).

کاربرد این دستگاه بررسی خصوصیات رفتاری و تعیین پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد. دستگاه برش ساده به‌دلیل به‌وجود آوردن شرایط آزمایش به واقعیت، بیشتر موردتوجه محققین قرار گرفته است. این دستگاه امکان بررسی تغییر شکل و کرنش برشی (در حین اعمال تنش برشی) را فراهم می‌کند و صفحه لغزش به نمونه خاک تحمیلی نمی‌گردد. دستگاه برش ساده سیکلی (CSS) مورداستفاده در این تحقیق ساخت شرکت Wille آلمان می‌باشد. طرح شماتیک و عکس این دستگاه در شکل (۶-الف) و (۶-ب) ارائه شده است.



شکل ۶- دستگاه برش ساده: الف) شکل شماتیک دستگاه، ب) نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه

همان‌طور که نشان داده است، نمونه درون یک سری رینگ فلزی صلب و تقریباً بدون اصطکاک (اصطکاک ناچیز) و در داخل غشای لاستیکی قرار می‌گیرد. که می‌توان آن را تحت بارگذاری قائم و افقی قرار داد. وجود رینگ‌های صلب باعث محصور شدن نمونه می‌گردد و این امر شرایط تحکیم در حالت سکون (k_0) را به‌وجود می‌آورد که شرایطی واقعی‌تر را شبیه‌سازی می‌کند.

نیروهای قائم و افقی به‌وسیله محرک‌های پنوماتیک[13] (بادی) به نمونه موجود در بین رینگ و غشا اعمال می‌شود. نیروسنج‌های به‌کار رفته در دستگاه مذکور دارای ظرفیت ۵ کیلونیوتن (5kN) بوده و همچنین دستگاه توان اعمال فرکانس تا ۷۰ هرتز را دارا می‌باشد. داده‌های به‌دست‌آمده حاصل از اعمال بار و فرکانس به‌وسیله سیستم (رایانه) متصل به دستگاه جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار ژئوسیس[14] ثبت و ذخیره می‌گردد تا در مراحل بعدی مورد تحلیل قرار بگیرند.

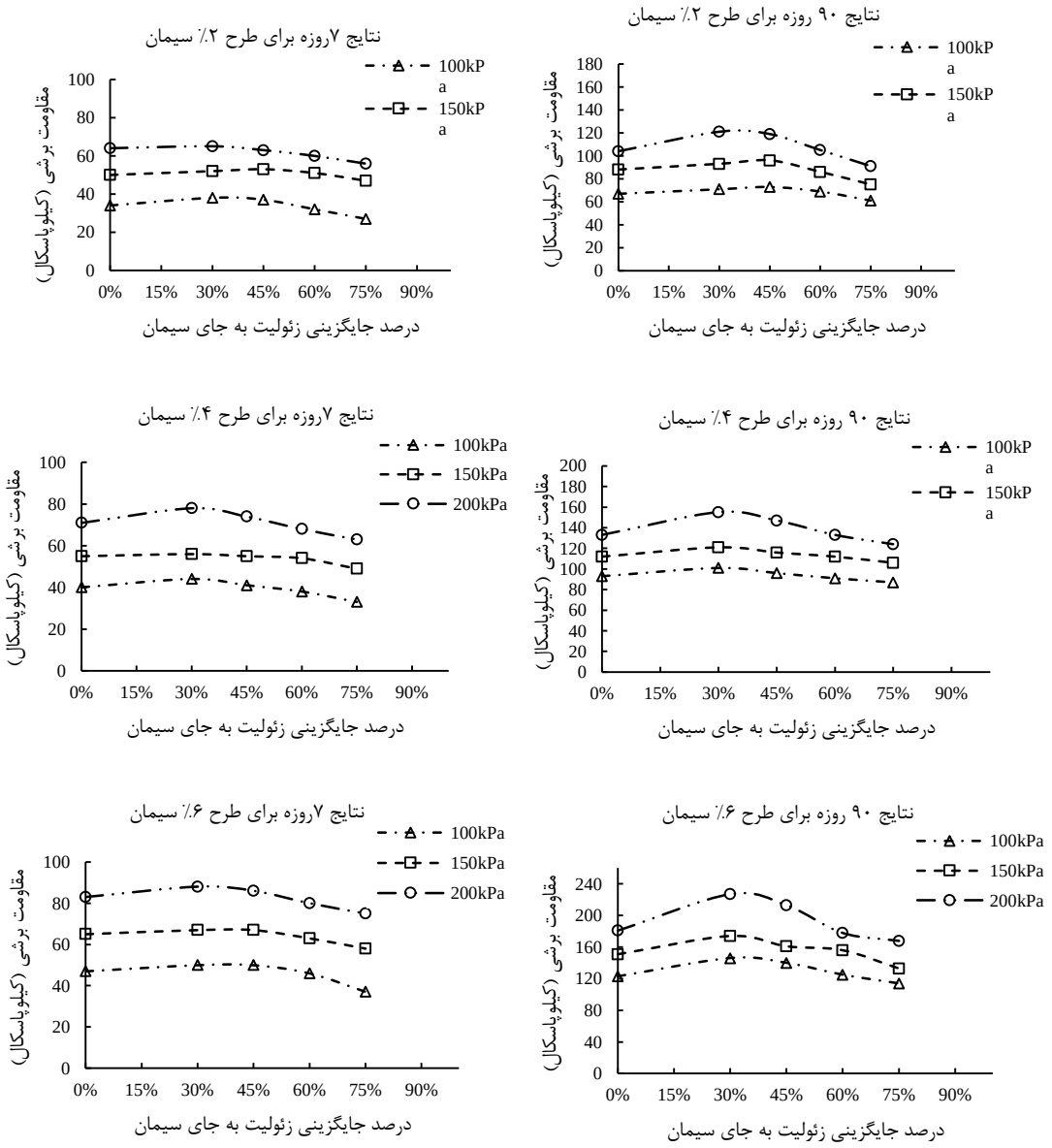
۴- نتایج و بحث

آزمایش برش ساده مونوتونیک بر روی نمونه‌های از پیش‌ساخته با زمان عمل‌آوری یکسان (۷ و ۹۰ روز) بر اساس استاندارد ASTM D 6528-00 انجام گرفت. بدین منظور تعداد ۹۰ عدد نمونه از ۱۵ طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفتند. که بر هرکدام از طرح اختلاط‌ها تنش نرمال ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع اعمال گردید. آزمایش‌های انجام‌شده بر اساس روش کرنش- کنترل انجام گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در ۰شکل (۷) آورده شده است. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش برش می‌توان اطلاعات مربوط به پارامترهای G_{50} و G_{sec} را استخراج نمود، که در شکل (۸) روش محاسبه این پارامترها مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان نتایج حاصل از انجام آزمایش برش ساده مونوتونیک را از منظر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی موردبررسی قرار داد. در شکل (۹) مشاهده می‌گردد که مقادیر به‌دست‌آمده چسبندگی در مدت ۹۰ روز، برخلاف مدت ۷ روز، دارای مقادیری قابل‌ملاحظه و بیشتری می‌باشد و تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت برشی دارد، که دلیل این امر را می‌توان به تکمیل واکنش‌های بین سیمان و زئولیت مرتبط دانست. واکنش‌هایی مانند واکنش بین اکسید کلسیم در سیمان و سیلیس موجود در زئولیت. البته لازم به‌ذکر است که افزایش اندکی در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی نیز مشاهده می‌شود که می‌توان دلیل آن را مدت عمل‌آوری کافی برای سیمان و اتمام فرآیندهای پیوندی، بین

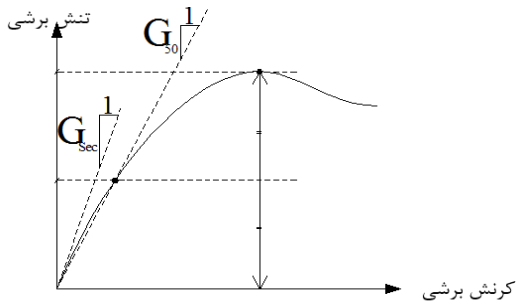
11. Cyclic Simple Shear
12. Roscoe
13. Pneumatic Actuators
14. Data Logger

سیمان و ماسه و زئولیت و نیز کامل شدن فرآیند سیمانتاسیون (نسبت به‌مدت عمل‌آوری ۷ روزه) دانست.

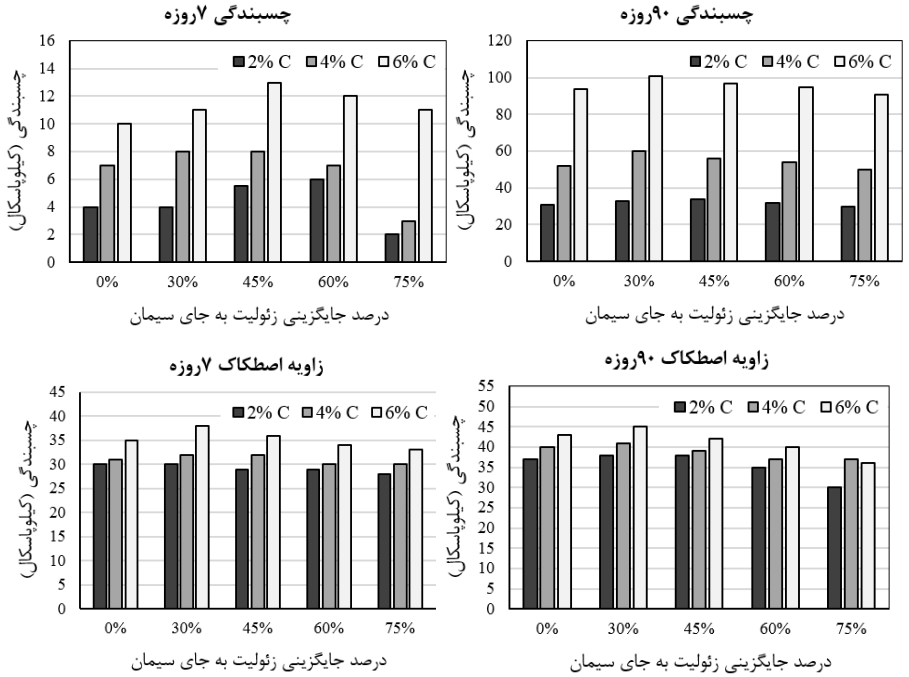
در شکل (۱۰) به‌طور جداگانه نمودارهای تنش- کرنش حاصل از انجام آزمایش برش ساده مونوتونیک با تنش سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های با درصدهای سیمان و جایگزینی زئولیت مختلف مشاهده می‌گردد.



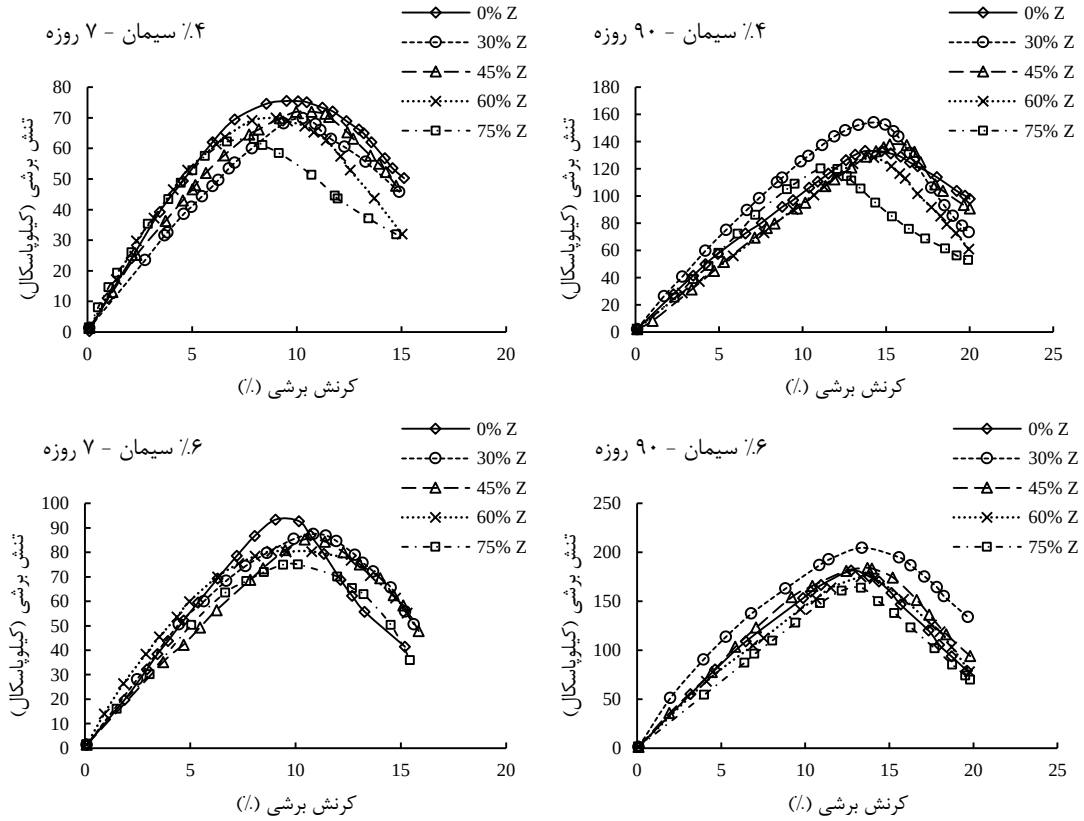
شکل ۷- نمودار نتایج آزمایش برش ساده مونوتونیک با دوره عمل‌آوری ۷ و ۹۰ روزه



شکل ۸- طریقه محاسبه پارامترهای G_{50} و G_{Sec}



شکل ۹- نمودار تغییرات زاویه اصطکاک دالی و چسبندگی حاصل از آزمایش برش ساده مونوتونیک



شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش برش ساده مونوتونیک با تنش سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال

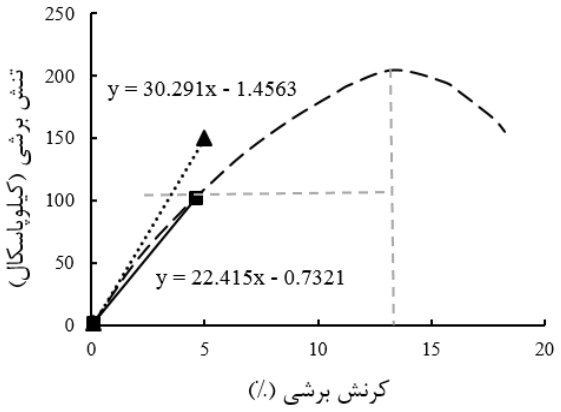
با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت که به‌طورکلی در نمونه‌های ۷ روزه با افزایش مقدار جایگزینی زئولیت، مقدار تنش برشی بیشینه تقریباً با روند نزولی مواجه می‌گردد. درحالی‌که در مدت عمل‌آوری ۹۰ روزه، نمونه‌های با جایگزینی زئولیت تقریباً ۳۰ درصد، تنش برشی بیشتری را نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهند.

پس از بررسی نمودارهای فوق می‌توان دریافت که افزایش مقدار جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان در کوتاه‌مدت تأثیر اندکی بر نمونه سیمانته می‌گذارد، به‌طوری‌که بیش‌ترین اثر آن در حالت ۳۰ درصد جایگزینی می‌باشد، که تقریباً افزایش مقاومت برشی به‌میزان ۱۰ درصد (نسبت به نمونه بدون زئولیت) در پی دارد. البته با افزایش مقدار جایگزینی زئولیت، افزایش مقاومت برشی تقریباً ناچیز بوده و در برخی از حالات جایگزینی حتی نسبت به نمونه فقط سیمانته مقاومت برشی کم‌تر می‌گردد. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در کل این افزایش مقاومت را می‌توان به زمان گیرش سیمان و نیز واکنش بین زئولیت، سیمان و آب و همچنین به‌وجود آمدن پیوندهای سیلیکاتی و پیوستگی بین ذرات و درنهایت بهبود ساختار آن‌ها مرتبط دانست.

افزایش مقاومت در درصدهای جایگزینی ۳۰ تا ۴۵ درصد دارای رشد بیشتری می‌باشد، به‌طوری‌که در جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان، بیش‌ترین افزایش مقاومت برشی مشاهده می‌شود (مقداری تقریباً معادل ۲۵ درصد). از دیدگاه دیگر می‌توان در مورد تأثیر افزودن زئولیت بر نسبت نرم‌شوندگی نمونه‌های از پیش‌ساخته شده بحث نمود.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود مقاومت بیشینه نمونه‌ها با سن عمل‌آوری ۷ روز، در کرنش تقریباً ۱۰ درصد اتفاق می‌افتد، این در حالی است که این مقدار برای نمونه‌های با سن عمل‌آوری ۹۰ روز مقداری تقریباً برابر ۱۵ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های موجود بعد از گذراندن مدت زمان کامل عمل‌آوری و کامل شدن واکنش‌های بین سیمان و زئولیت، نسبت نرم‌شوندگی بیشتری دارا می‌باشند. طریقه محاسبه مدول برشی (G_{50} و G_{sec}) در شکل (۱۱) برای ۶ درصد سیمان و درصد جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان و در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه این پارامتر آورده شده است.

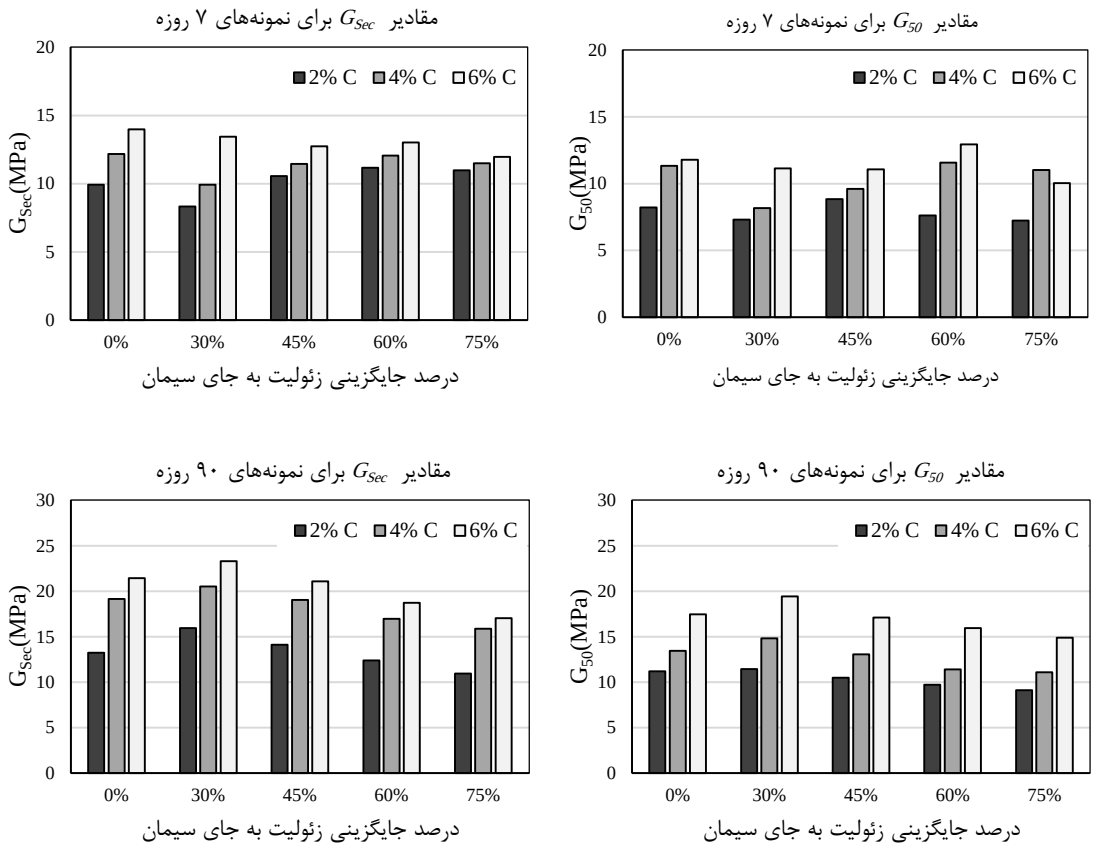
مقادیر به‌دست آمده G_{50} و G_{sec} حاصل از نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی (۰ (۱۰)) بر حسب میزان جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان در شکل (۱۲) و شکل (۱۳) ارائه شده است. در جدول (۵) رابطه آماری و ضریب همبستگی استخراج شده میان مدول برشی مخلوط و درصد زئولیت جایگزین شده با سیمان در مخلوط ماسه- سیمان ارائه شده است. همچنین به‌منظور مقایسه، خلاصه نتایج آزمایش‌ها در جدول(۶) و جدول (۷) گردآوری شده است. با افزایش درصد سیمان، سختی مخلوط‌ها حاوی زئولیت تا حدود ۳۰ درصد، روند افزایشی دارند به‌نحوی‌که می‌توان دلیل آن را به کم شدن فضای بین دانه‌ها، کاهش طول پیوندها و همچنین افزایش پیوندهای بین زئولیت و ماسه و سیمان، و در نتیجه افزایش استحکام در ساختار مخلوط نسبت داد. همچنین همان‌طور که در شکل (۱۲) می‌توان مشاهده نمود، در زمان عمل‌آوری ۷ روزه تأثیر زئولیت آنچنان ملموس نمی‌باشد ولی در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه به‌وضوح مشاهده می‌گردد که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان بیشترین افزایش در مقدار G_{50} و G_{sec} روی می‌دهد.



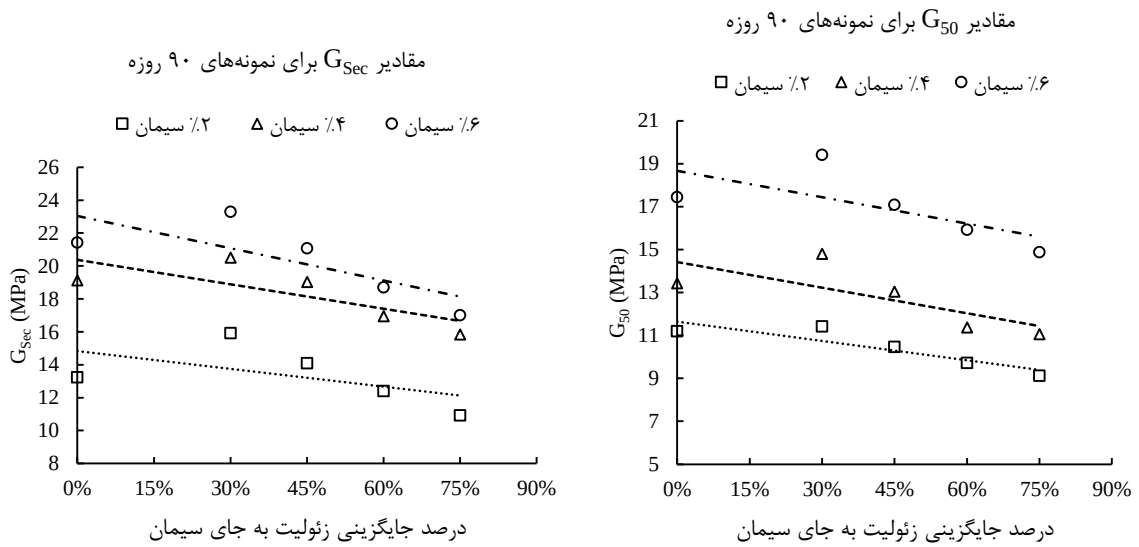
شکل ۱۱- طریقه به‌دست آوردن G_{50} و G_{sec} (اختلاط ۶ درصد سیمان و ۳۰ درصد جایگزینی زئولیت با سن عمل‌آوری ۹۰ روز)

جدول ۵- تغییرات مدول برشی بر اساس مقدار جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان (درصد زئولیت به‌جای سیمان = Z_{eo})

درصد سیمان	رابطه پیشنهادی	ضریب همبستگی (R^2)
۲	$G_0 = -0.0301\ Z_{eo} + 11.649$	۰/۹۱۵۱
۴	$G_0 = -0.0399\ Z_{eo} + 14.425$	۰/۸۲۸۴
۶	$G_0 = -0.051\ Z_{eo} + 18.894$	۰/۸۰۲۳
۲	$G_{Sec} = -0.0363\ Z_{eo} + 14.84$	۰/۸۱۲۹
۴	$G_{Sec} = -0.0494\ Z_{eo} + 20.375$	۰/۸۳۳۵
۶	$G_{Sec} = -0.0654\ Z_{eo} + 23.047$	۰/۸۲۰۱



شکل ۱۲- مقادیر مدول برشی سکانتی (G_{Sec}) و مدول برشی معادل ۵۰ درصد تنش برشی (G_0) و برای نمونه‌های ۷ و ۹۰ روزه



شکل ۱۳- مقادیر G_0 و G_{Sec} برای نمونه‌های ۹۰ روزه

جدول ۶- مقادیر G_{Sec} برای نمونه‌های ۷ و ۹۰ روزه

درصد سیمان	مقادیر زئولیت جایگزین سیمان	G_{Sec} (MPa)	
		۷ روزه	۹۰ روزه
٪۲	٪۰	۹/۹۲	۱۳/۲۳
	٪۳۰	۸/۳۳	۱۵/۹۳
	٪۴۵	۱۱/۵۶	۱۳/۱
	٪۶۰	۱۱/۱۷	۱۲/۳۹
	٪۷۵	۱۰/۹۷	۱۱/۹۳
٪۴	٪۰	۱۲/۱۷	۱۶/۱۴
	٪۳۰	۹/۹۳	۲۲/۹۱
	٪۴۵	۱۲/۴۵	۱۹/۰۴
	٪۶۰	۱۲/۰۶	۱۸/۹۶
	٪۷۵	۱۱/۵۰	۱۵/۸۵
٪۶	٪۰	۱۳/۹۹	۲۱/۴۲
	٪۳۰	۱۳/۴۴	۳۰/۲۹
	٪۴۵	۱۰/۷۳	۲۰/۰۷
	٪۶۰	۱۳/۰۱	۱۸/۷۱
	٪۷۵	۱۱/۹۶	۱۶/۰۱

جدول ۷- مقادیر G_{50} برای نمونه‌های ۷ و ۹۰ روزه

درصد سیمان	مقادیر زئولیت جایگزین سیمان	G_{50} (MPa)	
		۷ روزه	۹۰ روزه
٪۲	٪۰	۸/۲۲	۱۱/۲
	٪۳۰	۷/۳۱	۱۳/۴۲
	٪۴۵	۹/۸۳	۱۰/۴۷
	٪۶۰	۷/۶۱	۹/۷۲
	٪۷۵	۷/۲۳	۹/۱۲
٪۴	٪۰	۱۱/۳۲	۱۳/۴۴
	٪۳۰	۸/۱۸	۱۹/۸۱
	٪۴۵	۹/۶۱	۱۳/۰۴
	٪۶۰	۱۱/۵۷	۱۱/۳۸
	٪۷۵	۱۱/۰۱	۱۱/۰۷
٪۶	٪۰	۱۱/۷۸	۱۷/۴۵
	٪۳۰	۱۱/۱۴	۲۲/۴۱
	٪۴۵	۹/۰۷	۱۷/۰۹
	٪۶۰	۱۲/۹۴	۱۵/۹۲
	٪۷۵	۱۰/۰۳	۱۳/۸۸

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتیجه آزمایش‌های برش ساده مونوتونیک بر روی مخلوط ماسه بابلسر تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت به‌منظور بررسی اثر جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان بر پارامترهای مکانیکی مخلوط مذکور ارائه شد. نمونه‌ها در سه مقدار سیمان پایه ۲، ۴ و ۶ درصد و با جایگزینی زئولیت ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد ساخته شدند. کلیه آزمایش‌ها به‌صورت کنترل کرنش و تحت تنش‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به‌شرح زیر است:

۱- پس از انجام آزمایش تراکم مشاهده گردید که با افزایش زئولیت، وزن واحد حجم نمونه‌ها کاهش می‌یابد. درحالی‌که افزایش سیمان این مقدار را افزایش می‌دهد.

۲- نتایج حاصل از انجام آزمایش برش ساده مونوتونیک نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که با افزایش درصد سیمان و مدت عمل‌آوری مقاومت برشی افزایش می‌یابد.

۳- با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های با درصدهای جایگزینی مختلف زئولیت به‌جای سیمان، مشاهده می‌شود که بیش-

ترین افزایش مقاومت مربوط به جایگزینی ۳۰ درصد می-باشد که در بهترین حالت ۲۵ درصد نسبت به حالت بدون زئولیت (نمونه فقط سیمانته) افزایش می‌یابد. البته با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان مقدار فوق روند کاهشی پیدا می‌کند.

۴- سیمان طی مراحل شیمیایی تولید می‌گردد درحالی‌که زئولیت به‌صورت ذخایر معدنی و بدون انجام فرآیندهای شیمیایی در طبیعت یافت می‌شود، بنابراین اثرات مخرب محیط زیستی سیمان بسیار بیشتر می‌باشد. با توجه به مطالب فوق و همچنین با توجه به افزایش مقاومت برشی در جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان می‌توان نتیجه گرفت استفاده از زئولیت به‌جای سیمان (در یک درصد بهینه) هم از نظر محیط زیستی و هم از نظر اقتصادی (کاهش مصرف سیمان) روشی مناسب جهت تثبیت بسترها و خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد.

۵- با افزایش مدت عمل‌آوری (از ۷ روز به ۹۰ روز) و تکمیل شدن واکنش‌های بین سیمان و زئولیت، مقاومت برشی بیشینه نمونه‌های با سن ۷ روزه در کرنش تقریباً ۱۰ درصد و نمونه‌های با سن ۹۰ روزه در کرنش تقریباً ۱۵ درصد روی می‌دهد. این امر گویای این مطلب می‌باشد که افزودن زئولیت به‌عنوان ماده دارای قابلیت واکنش‌پذیری با سیمان، سبب افزایش نسبت نرم‌شوندگی می‌گردد.

۶- مدول الاستیسیته مانند پارامتر مقاومت برشی در جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به‌جای سیمان دارای بیش‌ترین مقدار می‌باشد که باعث کاهش تغییر شکل خاک می‌گردد. سپس با افزایش زئولیت به‌جای سیمان در کل روندی کاهشی پیدا می‌کند.

۶- مراجع

خلقی م ح، "زئولیت‌ها در ایران"، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۹۷۰.

ASTM. “Annual Book of Standards. American Society of Testing and Aterials”, ASTM D 4253-4. In. West Conshohocken.

Cardoso R, Daniel R, Raquel N, “Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures”, Soils and Foundations, 2017, 57, 655-68.

Clough GW, “Cemented stands under static loading”, Journal of Geotechnical Engineering Division., 1981, 107, 789-847.

Consoli, Nilo Cesar, Rodrigo Caberlon Cruz, Márcio Felipe Floss, and Lucas Festugato, “Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE), 2009, 136, 759-63

D-07, Astm, Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils (ASTM D 6528-00), 2007.

El Mir A, Salem GN, “Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete”, Journal of Cleaner Production, 2017, 156, 507-17.

Finn, WD Liam, “State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential”, Computers and Geotechnics, 2002, 29, 329-341.

Hausmann, Manfred R, Engineering principles of ground modification (McGraw-Hill New York), 1990.

Jafarzadeh F, Sadeghi H, “Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 32, 26-41.

Kim, Young-Su, “Static simple shear characteristics of Nak-dong River clean sand”, KSCE Journal of Civil Engineering, 2009, 13, 389-401.

Li, Yao, Yunming Yang, Hai-Sui Yu, Gethin Roberts, “Monotonic direct simple shear tests on sand under multidirectional loading”, International Journal of Geomechanics, 2016, 17, 04016038.

Rahgozar MA, Saberian M, Li J, “Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study”, Transportation Geotechnics, 2018, 14, 52-60.

Roscoe KH, “An apparatus for the application of simple shear to soil samples”, In Proc. 3rd ICSMFE, 1953, 186-91.

Saberian M, Khabiri MM, “Experimental and numerical study of the effects of coal on pavement performance in mine haul road”, Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35, 2467-78.

Shi C, Day RL, “Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators”, reaction products and mechanis, 2000, 30 (4), 607-613.

Shooshpasha I, Mola-Abasi H, “Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, S1674-7755 (16), 30037-3.

www.shahroudcement.com

www.zeomed.ir

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 52 (2022), Issue 2 (Summer), 15-25

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Mechanical Properties of Cement and Zeolite-Stabilized Sand using Monotonic Simple Shear Test

Iman Amiri [a], Abdolhosein Haddad [a,*], Yaser jafarian [b]

[a] *Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran*
[b] *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)*

Received: 05 April 2020; **Accepted:** 29 December 2020

Keywords:
Monotonic Simple Shear Test, Cement, Zeolite, Shear Strength.

1. Introduction

Using a simple shear test, it is possible to investigate the behavior and recognition of soil resistive parameters. Cementation is one of the subsets of soil remediation that falls into the category of physical and chemical remediation that binds soil particles together and prevents the breakdown of the soil skeleton and increases shear strength (Consoli, 2009; Finn, 2002). The behavior of soil resistance parameters is investigated using simple shear tests. Shear stresses in the soil can be divided into static and dynamic (Li et al, 2016). One of the best ways to reduce cement consumption and production is to use pozzolanic materials, especially natural pozzolans, and replace them with cement. Pozzolans are widely used in the cement and concrete industry (Rahgozar et al, 2018). Micro-silica, perlite, methakaolin and zeolite are the most well-known natural pozzolans. Since the cost of producing pozzolans other than zeolite is almost high, their use would not be economical on a large scale. Zeolite mainly contains silica, and aluminum oxide, which reacts with calcium oxide and thereby increases the strength of the resulting compound. The addition of zeolite improves the spatial structure properties of the zeolite, as well as reduces the porosity of the resulting mixture (El Mir and Nehme, 2017). This paper presents the results of laboratory investigations on the shear strength of cemented sand and the effect of zeolite replacement on cement. To achieve this purpose, mineral zeolite, Shahroud cement, and Babolsar sand were used.

2. Methodology

2.1. Experimental study

In order to investigate the effect of zeolite on shear strength parameters of sand and cement-zeolite mixtures, samples made by the wet scraping method were used. All specimens have a diameter of 70 mm and a height of 35 mm. Compared to the specimens used in triaxial testing, the sample can be prepared in one layer, regardless of the density variations in height. These specimens were manufactured using molds with a diameter of 70 mm. Divide the constituent materials into four sections to achieve proper uniformity in the fabrication of the specimens and blend each section separately to finally achieve a more uniform composition.

The amount of water to make the specimens is determined by the proctor compaction test and the determination of optimum moisture content. Prefabricated specimens were prepared as mixtures of 2, 4 and 6% cement. For zeolite, replacement of cement by 0, 30, 45, 60 and 75% was considered. Six samples were made from each mix design, which were kept in special containers to prevent significant changes in moisture content before testing to complete the process of operation. Three of them were tested at 7-day intervals and the other three at 90-day intervals (180 samples).

* Corresponding Author
E-mail addresses: ahadad@semnan.ac.ir (Abdolhosein Haddad), imanamiri@semnan.ac.ir (Iman Amiri), yjafarianm@iiees.ac.ir (Yaser Jafarian).

2.2. Cyclic Simple Shear

The application of this device is to investigate the behavioral properties and determination of soil resistance parameters. This device allows to study of the deformation and shear strain (during shear stress) and the slip plate is not applied to the soil sample.

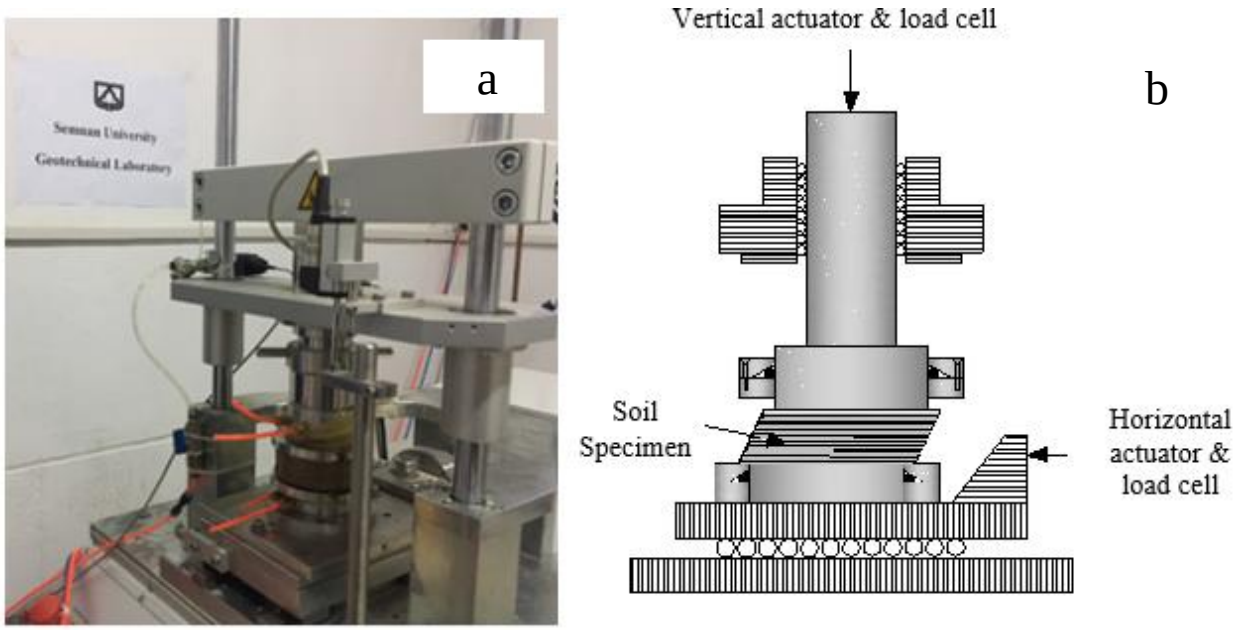


Fig. 1. Cyclic simple shear: a) Sample placement in the apparatus, b) Schematic shape of apparatus

Loading forces are applied through pneumatic actuators mounted horizontally and vertically. The load cells capacity is 5 kN. The specimen is fixed between the base pedestal and piston top cap and enclosed by a number of circular rings with 70 mm of nominal inner diameter to prevent lateral displacement during simple shear tests. The data obtained from the load and frequency applied by the system connected to the device are collected and stored using Geosys software for analysis.

3. Results and discussion

A Monotonic simple shear test was performed on pre-fabricated specimens with curing time (7 and 90 days) according to ASTM D 6528-00. For this purpose, 90 samples from 15 mixing designs were tested. Normal stresses of 100, 150 and 200 kN / m2 were applied to each mixing scheme. Tests were performed according to the strain-control method. It can be seen in Fig. 2 that the values of cohesion obtained during 90 days, as opposed to 7 days, have significantly higher values and have a greater effect on increasing shear strength. The reason for this can be attributed to the completion of the reactions between cement and zeolite.

It should be noted that a slight increase in the values of the internal friction angle is also observed, which may be due to the sufficient cement curing time and completion of bonding processes between cement and sand and zeolite as well as the completion of the cementation process. (Compared to the 7-day curing time).

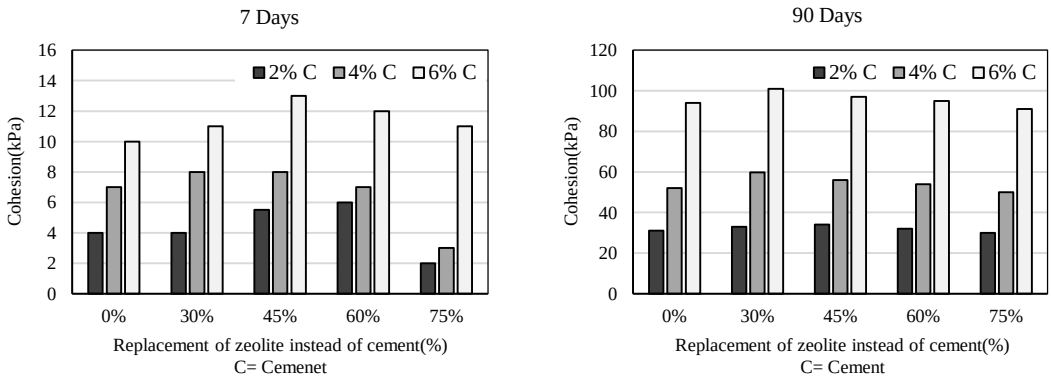


Fig. 2. Diagram of Cohesion changes obtained from simple monotonic shear tests

4. Conclusions

The results of monotonic simple shear tests show that with increasing cement percentage and increasing shear strength, the shear strength is increased.

By testing on samples with different replacement percentages of zeolite instead of cement, it is observed that the highest increase of resistance is related to 30% replacement, which is at best 25% higher than without zeolite (cemented sample only).

The modulus of elasticity, such as the shear strength parameter, has the highest value in replacing 30% zeolite instead of cement, which reduces soil deformation.

Increasing the curing time (from 7 days to 90 days) and completing the reactions between cement and zeolite, the maximum shear strength of the specimens occurs at higher strain. This indicates that the addition of zeolite as a cement-reactive material increases the softening ratio.

5. References

Consoli, Nilo Cesar, Rodrigo Caberlon Cruz, Márcio Felipe Floss, and Lucas Festugato. "Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136, 759-763.

D-07, Astm. Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils (ASTM D 6528-00), 2007.

El Mir, Abdulkader, and Salem G Nehme, "Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete", Journal of cleaner production, 2017, 156, 507-517.

Finn, WD Liam. "State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential", Computers and Geotechnics, 2002, 29, 329-341.

Li, Yao, Yunming Yang, Hai-Sui Yu, Gethin Roberts, "Monotonic direct simple shear tests on sand under multidirectional loading", International Journal of Geomechanics, 2016, 17, 04016038.

Rahgozar MA, Saberian M, Li J, "Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study", Transportation Geotechnics, 2018, 14, 52-60.