

بررسی اثر زئولیت بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر، تثبیت شده با سیمان

مجتبی عباسی^۱، عیسی شوش‌پاشا^{۲*} و حسین ملاعباسی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، مؤسسه آموزش عالی صنعتی مازندران

^۲ دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳ استادیار دانشکده عمران، دانشگاه گنبدکاووس

(دریافت: ۹۶/۲/۴، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۱۰/۱۸)

چکیده

ماسه‌های سیمانی به عنوان یکی از موضوعات اقتصادی و زیست‌محیطی در تثبیت خاک شناخته شده‌اند. در برخی موارد ترکیبی از سیمان و ماسه با سایر مواد از جمله فیبر، شیشه، نانوذرات و یا زئولیت می‌تواند به طور مؤثر در تثبیت خاک در جاده‌سازی استفاده شود. در این بررسی زئولیت به عنوان یکی از مواد افزودنی به سیمان و اثرات آن بر مقاومت برشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا از زئولیت نوع معدنی کلینوپیلولیت، سیمان تیپ II نکا و ماسه بابلسر به عنوان خاک پایه استفاده شد. تعداد ۱۶۰ آزمایش مقاومت برشی بر روی طرح اختلاط ۲۴ حالت سیمان و زئولیت شامل درصد سیمان‌های مختلف ۲، ۴، ۶، ۸ درصد وزن خشک کل نمونه و درصدهای جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ زئولیت با سیمان با تنش سربارهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع مطابق با حداکثر وزن مخصوص و رطوبت بهینه طرح اختلاط در مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز انجام شد. نتایج نشان داد که با جایگزینی تا ۵۰٪ زئولیت به جای سیمان مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان متوسط ۶۲ درصد همراه با افزایش کرنش گسیختگی، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تثبیت، سیمان، زئولیت، تراکم، مقاومت برش.

۱- مقدمه

می‌شوند؛ یکی از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی در زمان پخت مواد اولیه و ساخت کلینکر و دیگری از فرآیند کلسینه شدن سنگ آهک موجود در مواد خام. براساس مطالعات انجام شده در خصوص ضرایب انتشار CO₂ از منابع احتراقی کارخانه‌ها منتخب سیمان، مشاهده می‌شود که به طور متوسط به ازای تولید هر تن کلینکر در ایران ۰/۲۲۱ تن CO₂ و از تولید هر تن سیمان حدود ۰/۱۸۸ تن CO₂ از طریق سوخت مورد استفاده تولید و منتشر می‌شود. همچنین متوسط میزان انتشار فرآیندی گاز گلخانه‌ای CO₂ به ازای تولید هر تن کلینکر ۰/۵۶۹ تن و به ازای تولید هر تن سیمان برابر با ۰/۴۶۷ تن می‌باشد.

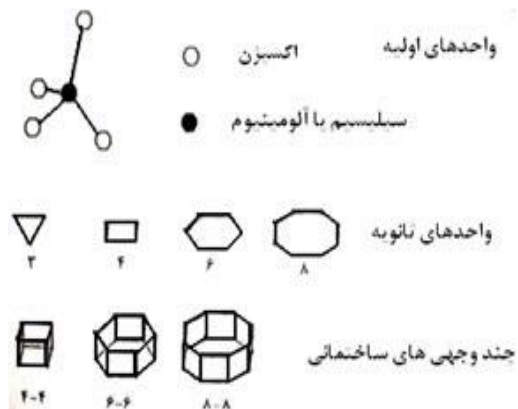
بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که برای تولید یک تن سیمان در کشور به طور متوسط ۰/۶۵۵ تن گاز گلخانه‌ای CO₂ و برای تولید یک تن کلینکر به طور متوسط ۰/۷۹ تن گاز گلخانه‌ای CO₂ تولید و انتشار می‌یابد (اسماعیلی پور، ۱۳۸۸).

از ویژگی‌های عمده خاک‌های ماسه‌ای سست، مقاومت ضعیف و ناپایداری حجمی آن‌ها می‌باشد. جهت تثبیت این نوع خاک‌ها استفاده از تکنیک افزودن سیمان به عنوان یکی از گزینه‌های پرکاربرد مورد استفاده مهندسی می‌باشد (Gunaratne, 2006).

اگرچه صنعت سیمان مدرن‌ترین فناوری‌ها را برای کاهش آلودگی به کار می‌گیرد، با این حال مراحل مختلف تولید سیمان و حمل و نقل آن همچنان سهم عمده‌ای در آلودگی محیط‌زیست دارد.

این صنعت یکی از صنایعی است که همواره از آن به عنوان آلاینده محیط‌زیست یاد می‌شود. آلاینده‌های اصلی این صنعت شامل دی‌اکسید کربن (CO₂)، دی‌اکسید سولفور (SO₂)، اکسیدهای ازت (NO_x)، مونوکسید کربن (CO) و ... می‌باشد، که از این میان CO₂ مهم‌ترین آلاینده بوده و از دو طریق تولید و منتشر

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۲۹۴۱۲۷



شکل ۱- نمایش واحدهای ساختمانی در ساختار مولکولی زئولیت

۲- مروری بر مطالعات پیشین

افزودن سیمان به خاک موجب تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود ولی محققین در مورد چگونگی و میزان این تغییرات نظرات متفاوتی را ارائه نموده‌اند. کمیته تخصصی ACI بیان می‌دارد که تثبیت با سیمان باعث تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود، اما این تغییرات قابل پیش‌بینی نیستند (ACI Committee, ۱۹۹۷).

Zabielska در سال ۲۰۰۸، در مطالعه‌ای تأثیر میزان سیمان و نوع روش انتخابی برای انجام آزمایش تراکم را بر دانسیته و درصد رطوبت بهینه مورد ارزیابی قرار داد. آن‌ها نتیجه گرفتند که ارتباط مستقیمی بین عمل هیدراسیون و میزان سیمان وجود دارد. به عبارت دیگر با افزایش میزان سیمان، عمل هیدراسیون که منجر به کاهش رطوبت می‌شود، نیز افزایش می‌یابد (Adamska, ۲۰۰۸).

Rattley و همکارانش در سال ۲۰۰۷، در مطالعه‌ای تأثیر تثبیت با سیمان را بر میزان چسبندگی مؤثر خاک دانه‌ای سست بررسی کردند. نتایج تحقیقاتشان نشان می‌دهد که با افزایش سیمان میزان چسبندگی مؤثر نیز افزایش می‌یابد.

Limsiri و Uchaipichat در سال ۲۰۱۰، به بررسی تأثیر تثبیت با سیمان بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای سست پرداختند. آن‌ها برای رسیدن به این هدف از آزمایش برش مستقیم استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که با افزایش میزان سیمان و تنش نرمال، تنش برشی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج مطالعات Al-Aghbari و همکارانش در سال ۲۰۰۹، بر روی رفتار تنش- کرنش خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرتلند معمولی و گرد کوره سیمان نشان دادند که افزایش شاخص تثبیت و زمان عمل‌آوری به افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری محصور نشده می‌انجامد و این در حالی است که تأثیر افزایش سیمان در مقایسه با زمان عمل‌آوری محسوس‌تر است.

بنابراین بهینه‌سازی ترکیب سیمان به گونه‌ای که کم‌ترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شود و کم‌ترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و در نهایت بهترین کارایی ممکن از آن گرفته شود، به عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌گردد (Yilmaz و همکاران، ۲۰۰۷). از این‌رو پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان مصرفی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند به عنوان یکی از بهترین راهکارها جهت حفاظت از محیط‌زیست باشد.

در این میان، پوزولان‌ها که از دیرباز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توانند مشکلات مربوط به محدودیت تولید را تا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان‌ها توانسته‌اند از طریق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در تولید سیمان و کاهش انتشارات آلاینده، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهند (اردستانی، ۱۳۸۷ و Tobon و همکاران، ۲۰۱۰).

استفاده از زئولیت که یک پوزولان طبیعی است، می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی، گزینه‌ای در خور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد. مهر و موم‌های زیادی از فراگیر شدن استفاده از زئولیت در جهان بالأخص کشورهای صنعتی و پیشرفته می‌گذرد. لیکن از نظر هزینه و امکان دسترسی، تهیه این کانی‌ها در ایران بسیار ارزان و به راحتی میسر است. به همین دلیل استفاده از آن‌ها علاوه بر کاهش معضلات زیست‌محیطی از نظر اقتصادی نیز بسیار اثرگذار است (خلقی، ۱۳۶۹).

زئولیت یک واژه یونانی می‌باشد که از دو جزء به معنی سنگ و جوشان تشکیل شده است و اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط یک معدن‌شناس سوئدی به نام کروستت، نام زئولیت به کانی استیلیت داده شده که به هنگام حرارت دادن مقدار زیادی آب از آن خارج می‌گردید. از دست دادن آب در زئولیت‌ها، آسان و برگشت‌پذیر است. زئولیت‌ها شامل فلزات قلیایی و قلیایی خاکی بوده و قادرند در واکنش‌های جایگزینی برگشت‌پذیر شرکت نمایند. تجزیه‌های شیمیایی و ساختاری نشان می‌دهند که زئولیت‌ها عمدتاً حاوی سیلیسیم، آلومینیوم و اکسیژن هستند (شکل (۱)).

زئولیت‌ها جامداتی بلورین و آب‌دار با روزهایی متدال شکل و به ابعاد ۳ تا ۱۰ آنگستروم می‌باشند که ابعاد مزبور در حد اندازه‌های مولکولی است، لذا به زئولیت‌ها غربال‌های مولکولی نیز می‌گویند (خلقی، ۱۳۶۹). استفاده از زئولیت به عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان می‌تواند برای بهسازی ماسه با سیمان مناسب باشد. همچنین وجود معادن بسیار در کشور به ویژه در استان سمنان را می‌توان به عنوان یکی از دلایل کاربرد زئولیت به جای سیمان نام برد.

بالبسر با استفاده از آزمایش مقاومت برشی (برش مستقیم) پرداخته شده است. جهت نیل به این هدف، در این مقاله ابتدا برنامه آزمایشگاهی، مصالح مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش‌ها شرح داده شده و در نهایت نتایج آن مورد بحث قرار گرفته است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

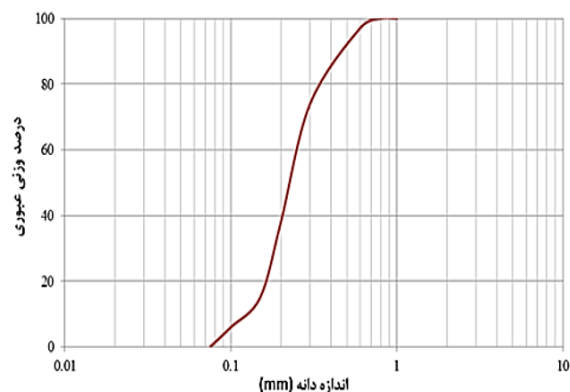
برای مطالعه اثرات ژئولیت بر مقاومت برشی ماسه‌های سیمانی پارامترهای مقدار سیمان و درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، تنش سربار و زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته است. در جدول (۱) متغیرهای مربوط به آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش برش مستقیم ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل این که افزایش مقاومت پوزولانی یک فرآیند زمان‌بر است زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه انتخاب گردیده است. همچنین آزمایش‌های برش مستقیم با ۱۰۰ درصد جایگزینی ژئولیت با سیمان به دلیل نبود عنصر چسبنده از جمله هیدروکسید کلسیم (جزء اصلی سیمان) امکان‌پذیر نبوده و در طرح آزمایش در نظر گرفته نشده است.

۴- مصالح مورد استفاده

مصالح به کارگیری شده در این تحقیق شامل خاک ماسه‌ای البلسر، سیمان پرتلند تیپ II نکا و ژئولیت سمنان می‌باشد.

۴-۱- ماسه

با توجه به نهشته‌های ماسه‌ای فراوان در سواحل دریای خزر در این پژوهش از ماسه ساحلی البلسر استفاده شده است. ماسه البلسر از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده بوده که اندازه متوسط دانه‌های آن حدوداً ۰/۲۴ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-C136 (Annual Book of ASTM Standards، ۲۰۱۲) می‌باشد (شکل ۲). شاخص انحنای و یکنواختی ماسه استفاده شده به ترتیب مقادیر ۰/۸۹ و ۱/۷۵ می‌باشد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه البلسر

Consoli و همکاران (۲۰۱۳)؛ Faro و همکاران (۲۰۱۵) و Yilmaz و همکاران (۲۰۱۵)، از جمله سایر محققینی هستند که به بررسی مقاومت برشی ماسه‌های سیمانی پرداخته‌اند.

Durukan و Kaya در سال ۲۰۰۴، مشخصات تراکمی ژئولیت و مخلوط ژئولیت- بنتونیت (BEZ) را مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش مقدار بنتونیت در مخلوط، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد و این در حالی است که درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است. البته با افزودن مقادیر مختلف بنتونیت کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه چشمگیر نمی‌باشد.

Dimitrios و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی اثر جایگزینی ژئولیت طبیعی نوع HEU به جای ماسه، در ساخت ملات سبک پرداخته‌اند، نتایج بررسی‌های آنان نشان می‌دهد که، اضافه کردن ژئولیت طبیعی به مخلوط ملات ماسه و سیمان پرتلند سبب کاهش تا ۱۸/۵ درصدی وزن مخصوص آن می‌شود. افزایش نسبت ژئولیت طبیعی افزایش تخلخل و افزایش جذب آب ملات را سبب می‌شود.

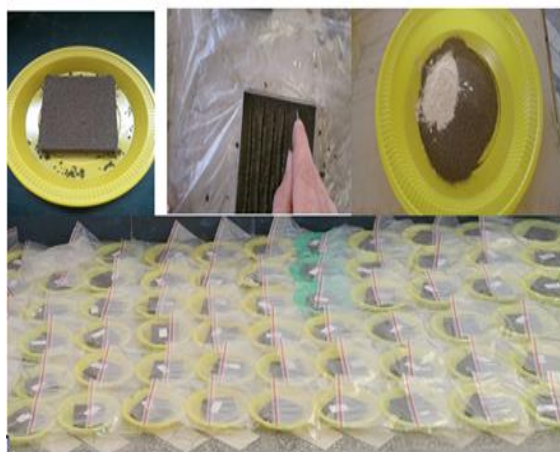
Hong (۲۰۱۵)، به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی اختلاط- های ماسه و ژئولیت، با درصد جرم‌های مختلف ژئولیت ۲۵،۵۰،۷۵٪ پرداخته شده است. نتیجه بررسی ایشان در مورد تراکم نشان داد که با افزایش نسبت جرم ژئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه تمایل به افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم تمایل به کاهش دارد.

عباسی در سال ۲۰۱۵، به بررسی اثر ژئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخت نتایج این بررسی نشان داد که افزایش ژئولیت طبیعی به سیمان تا درصد مشخصی باعث افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت شد.

ژئولیت ماده معدنی با ارزشی است که کاربردهای فراوانی در صنعت دارد و به مقدار زیاد و با کیفیت مناسب در کشور ایران یافت می‌شود. با توجه به این موضوع و مشکلات موجود در تولید و مصرف سیمان و تخریب و خرابی زودرس سیمان بخصوص در مناطق ساحلی شمالی کشور به علت دوام کم سیمان تحت شرایط محیطی شدید، لزوم استفاده از ژئولیت به عنوان یکی از پوزولان طبیعی برای اصلاح الگوی مصرف سیمان در تثبیت خاک بیشتر نمایان می‌شود. مسئله اصلی در این مقاله، بررسی رفتار مقاومت برشی ماسه سیمانی و نیز تأثیر جایگزین کردن سیمان با ژئولیت می‌باشد. این در حالی است که در بررسی ادبیات فنی، کم‌تر به افزودن ماده پوزولانی از جمله ژئولیت به ماسه سیمانی در بررسی مقاومت برشی پرداخته شده است. بنابراین در این تحقیق به بررسی تأثیر ترکیب سیمان و ژئولیت به عنوان یک پوزولان جهت انجام واکنش‌های سیمانی شدن بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای

مرطوب صورت گرفته است. برای حصول تراکم یکنواخت در ارتفاع و هنگام ساخت تمامی نمونه‌ها از روش تراکم کاهش یافته Ladd (۱۹۸۷) در سه لایه استفاده شده است. ضمناً برای اتصال بهتر بین لایه‌های مختلف، سطح لایه‌های کوبیده شده قبلی پس از رسیدن به ارتفاع مورد نظر شیار زده می‌شود تا درگیری مناسب-تری با خاک لایه بعدی در محل فصل مشترک آن‌ها ایجاد شود. پس از ساخت نمونه‌های مناسب برای آزمایش برش مستقیم و ممانعت از تغییرات زیاد درصد رطوبت قبل از آزمایش، هر یک از نمونه‌ها را به طور جداگانه در کیسه‌های نایلونی قرار داده و با توجه به برنامه زمان‌بندی تحت آزمایش قرار داده شدند (شکل ۲).

آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ها در فواصل زمانی ۷ و ۲۸ روزه براساس استاندارد ASTM-D 3080 و به روش کنترل کرنش و در حالت زهکشی شده انجام گرفته است. از آنجایی که هیچ کنترلی بر روی عمل زهکشی وجود ندارد این آزمایش را نمی‌توان در حالت زهکشی نشده انجام داد. با توجه به کوتاه بودن مسیر زهکشی در نمونه، سرعت پراکنده شدن اضافه فشار حفره‌ای نسبت به دیگر آزمایشات زهکشی شده بیشتر است. بنابراین آزمایش برش مستقیم یک روش نسبتاً سریع برای تعیین مقاومت برشی خاک‌ها در حالت زهکشی شده است. برای رسیدن به اهداف این بررسی، در مجموع ۱۶۰ نمونه اصلی و کنترلی بر اساس استانداردهای موجود ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق میزان تنش نرمال اعمالی در همه آزمایش‌های انجام شده برابر ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل ۲- مراحل ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

۶- بررسی نتایج آزمایش برش مستقیم

نتایج به سه قسمت بررسی رفتار تنش- کرنش مقاومت حداکثر و تأثیر افزودن ژئولیت بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیمانی تقسیم می‌شود.

وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه ماسه بابلسر به ترتیب مقادیر ۱/۷۷ و ۱/۴۹ تن بر متر مکعب ASTM-D4253-4 و چگالی دانه‌های جامد آن ۲/۷۲ مطابق با استاندارد ASTM-D854-92 به دست آمده است. علت بالا بودن چگالی دانه‌های جامد، وجود درصدی از مصالح اکسید آهن و سایر مصالحی چون نیکل و کبالت است (نورزاد، ۱۳۷۹).

۴-۲- ژئولیت

ژئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت است که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی ژئولیت معدنی

مشخصات	ژئولیت
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۱/۱۹
سطح ویژه (cm ² /gr)	۱۰۰۰
جذب آب	۶۰ درصد حجمی
ظرفیت تبادل یونی (gr/meq)	۲/۶
چگالی دانه‌های جامد	۲/۲

۴-۳- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان نکا واقع در استان مازندران استفاده شده است. مصرف ویژه این سیمان در محل‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها به آن‌ها در حد متوسط است می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان نکا

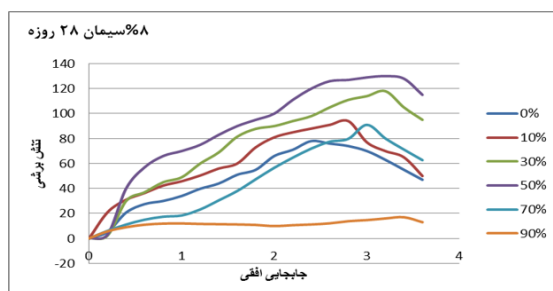
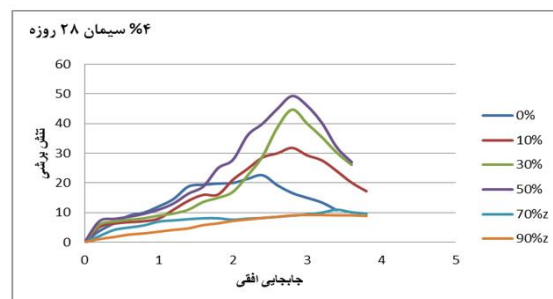
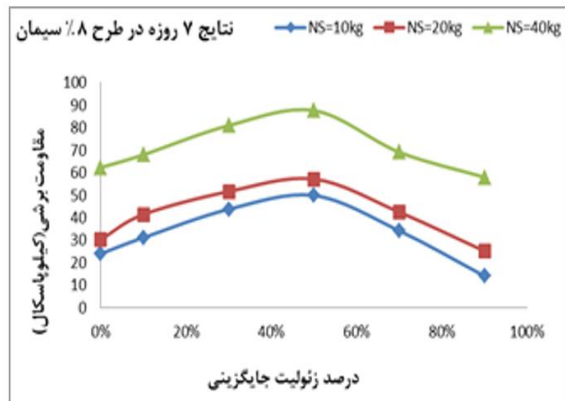
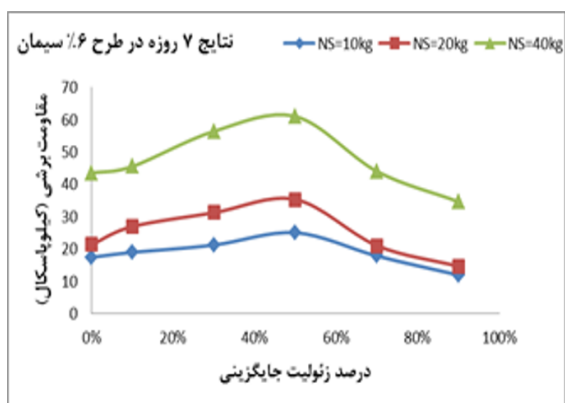
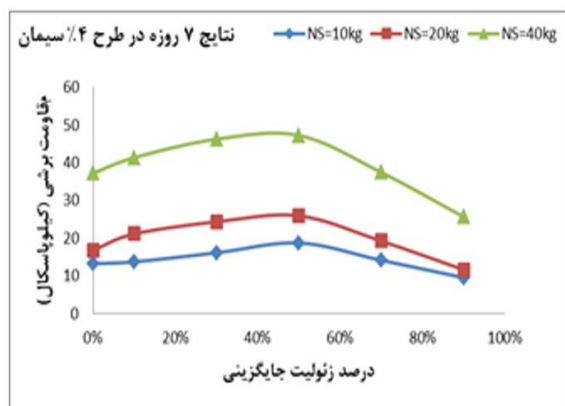
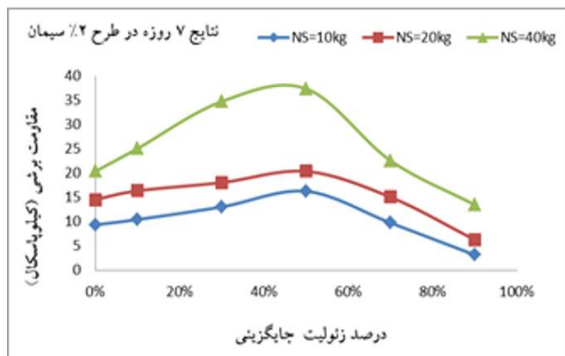
درصد	ترکیب شیمیایی	درصد	ترکیب شیمیایی
۶۴/۰۷	CaO	۲۱/۲۵	SiO ₂
۱/۲۰	MgO	۴/۹۵	Al ₂ O ₃
۲/۰۴	SO ₃	۳/۱۹	Fe ₂ O ₃
۰/۳۸	Na ₂ O	۰/۶۳	K ₂ O

۵- نمونه‌سازی و روند انجام آزمایش برش مستقیم

روش انجام آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM D 3080 (Annual Book of ASTM Standards, ۲۰۱۲) بوده که بر این اساس خاک مورد استفاده برای آماده‌سازی نمونه‌ها، باید به اندازه‌ای باشد که بتوان حداقل سه نمونه مشابه برای یک حالت مشخص آماده نمود. به منظور و امکان استفاده از نتایج در مقاصد علمی و کاربردهای مهندسی ساخت تمامی نمونه‌ها به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر به شیوه کوبش

۶-۱- تنش - کرنش

شکل (۳) نمونه‌ای از رابطه تنش - کرنش نمونه‌های سیمانی و ژئولیتی را نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود حداکثر تنش برشی با افزایش درصد سیمان افزایش یافته و کرنش متناظر آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار ترد و شکننده نمونه‌ها است، در حالی که با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، کرنش‌های گسیختگی افزایش می‌یابد، در این حالت کاهش رفتار ترد نمونه‌های ژئولیتی سیمانی نسبت به نمونه‌های سیمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۴ و ۸ درصد سیمان

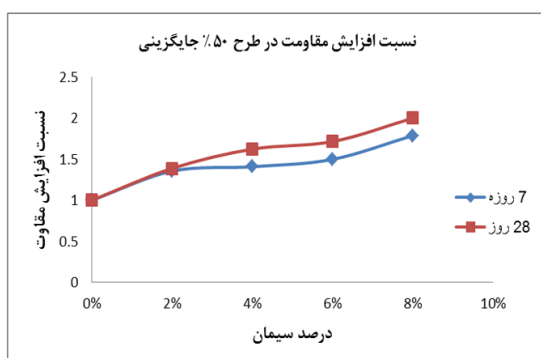
۶-۲- تأثیر افزودن ژئولیت بر مقاومت حداکثر

نتایج مقاومت برشی برای نمونه‌ها با سه تنش سربار متفاوت در زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که نمودارهای (شکل (۴-الف) و (۴-ب))، حاصل از آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد، با افزایش میزان سیمان و تنش نرمال، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند ناشی از افزایش پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، به دلیل تکمیل واکنش‌های شیمیایی سیمان باشد. هرچند از میان این دو پارامتر افزایش پارامتر چسبندگی چشمگیرتر است. همچنین با افزودن جایگزینی ژئولیت به سیمان تا درصد معینی شاهد افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت (نمونه‌هایی که فقط از سیمان استفاده شده است) هستیم که در این تحقیق جایگزینی ۵۰ درصدی ژئولیت به جای سیمان، درصد بهینه جهت افزایش مقاومت برشی است.

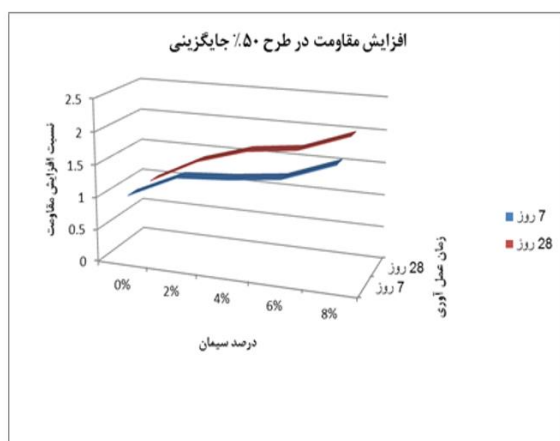
شکل ۴- الف) نمودارهای حاصل نتایج آزمایش برش مستقیم ۷ روزه

همان گونه که نمودار شکل (۵) نشان می‌دهد در این درصد جایگزینی به طور میانگین افزایش مقاومت ۶۲ درصدی نمونه‌ها را شاهد هستیم، نکته قابل توجه در اینجا تأثیر زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت نمونه‌ها است (شکل ۶).

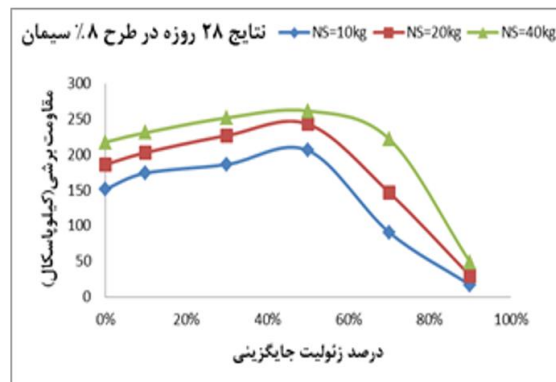
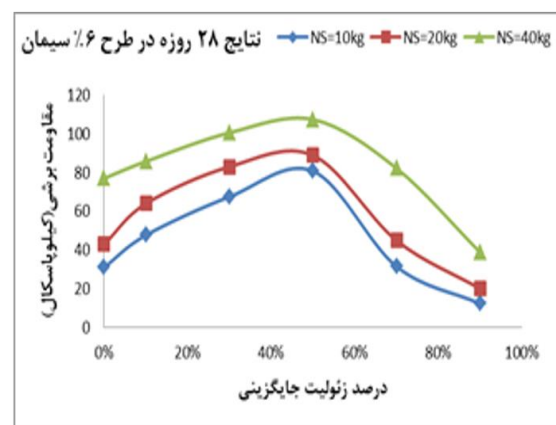
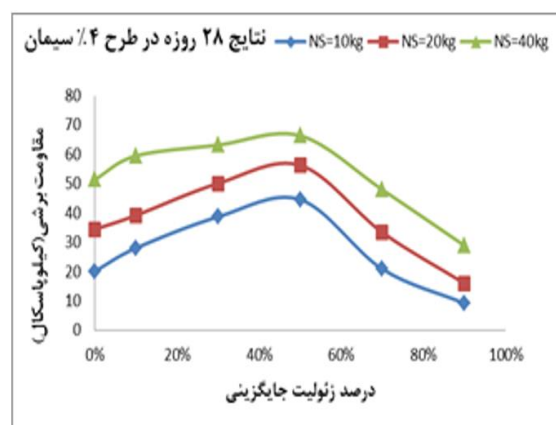
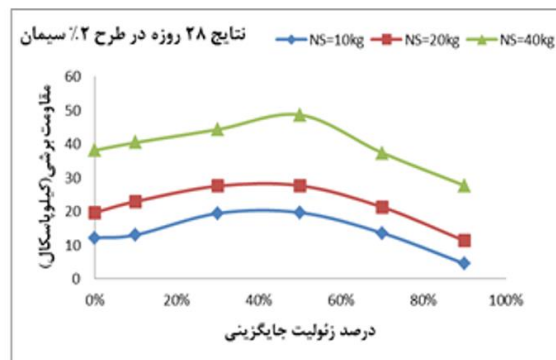
این افزایش مقاومت به سبب تولید ژل‌های سیلیکاتی ناشی از واکنش ژئولیت با سیمان واب، تکمیل شدن واکنش ژئولیت و بهبود ساختار حفرات ژئولیت می‌باشد. به عبارت دیگر واکنش پوزولانی بین ژئولیت با آهک آزاد شده در خلال فرآیند هیدراسیون، کلسیم-سیلیکات-هیدرات بیشتری تولید می‌کند که این مسئله خود باعث بهبود خصوصیات مکانیکی خاک می‌شود. افزودن ژئولیت بیشتر از این مقدار کاهش مقاومت برشی نمونه‌ها را به دنبال دارد. این مسئله ناشی از کاهش مقدار آهک سیمان در طرح‌های اختلاط بوده که سیلیس موجود در ژئولیت آهک کم‌تری جهت انجام واکنش دارد و به همین دلیل، کاهش ژل‌های سیلیکاتی و به همراه آن کاهش مقاومت را به دنبال دارد.



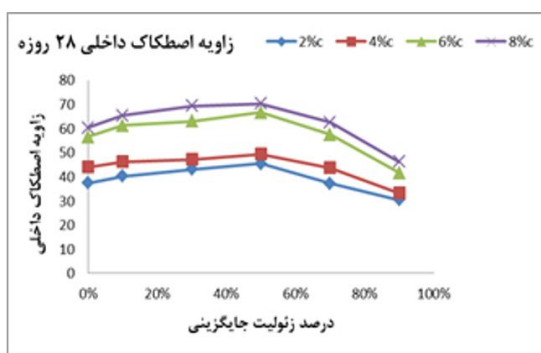
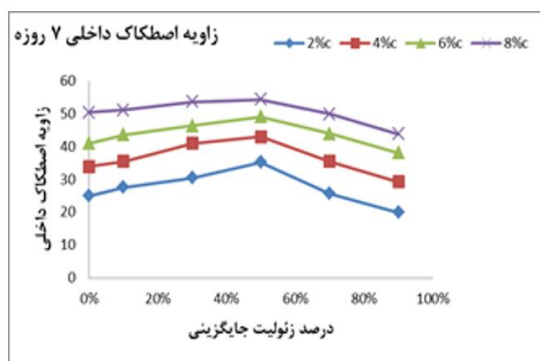
شکل ۵- نسبت افزایش مقاومت نمونه‌ها با درصد سیمان‌های مختلف در طرح ۵۰ درصد جایگزینی با ژئولیت



شکل ۶- نقش زمان عمل‌آوری بر افزایش مقاومت برشی



شکل ۴- ب) نمودارهای حاصل نتایج آزمایش برش مستقیم ۲۸ روزه



شکل ۸- ب) تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی با افزایش جایگزینی زئولیت

زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصله از نتایج آزمایش برش مستقیم به صورت نمودارهای (شکل ۸-الف) و (۸-ب) قابل ارائه هستند. همان گونه که این نمودارها نشان می‌دهند، افزایش مقاومت برشی در این تحقیق بیشتر ناشی از افزایش پارامتر چسبندگی بوده و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی چشمگیر نیست که این امر می‌تواند ناشی از واکنش بین سیلیس با اکسید کلسیم سیمان و در نتیجه افزایش چسبندگی باشد.

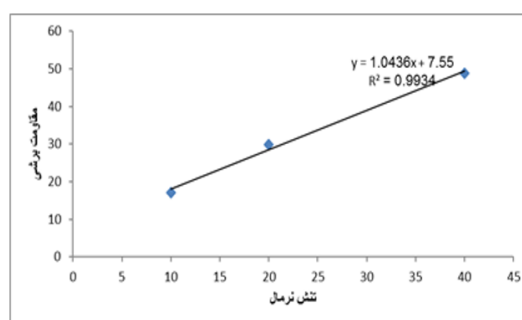
۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق زئولیت به عنوان یک ماده معدنی پوزولانی جهت افزایش مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان که در محیط-های خورنده پایداری بیشتری نسبت به سیمان داشته و سبب هیدراسیون آرام سیمان با حرارت‌زایی کم‌تر می‌شود، معرفی شده است. در بررسی نتایج آزمون برش مستقیم بر روی نمونه‌های زئولیتی سیمانی مشاهده می‌شود که:

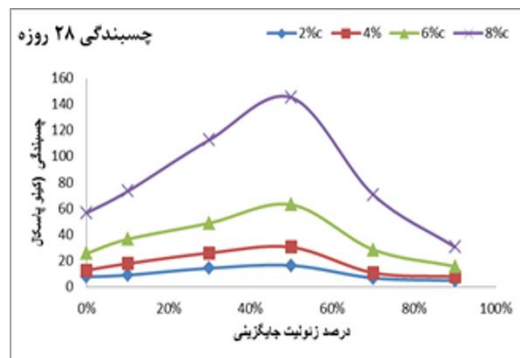
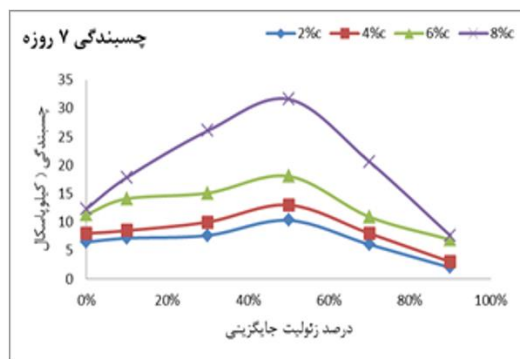
با افزایش درصدهای سیمان مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد و با افزایش درصدهای جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقاومت-برشی نمونه تا جایگزینی ۵۰ درصد زئولیت به جای سیمان به طور متوسط ۶۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت افزایش می‌یابد که با افزودن زئولیت بیشتر از این مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها

۳-۶- تأثیر افزودن زئولیت بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیمانی

برای به دست آوردن مشخصات مقاومت برشی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) از رسم نمودار پوش موهر-کلمب استفاده می‌شود. به صورت نمونه پوش گسیختگی در شکل (۷) ارائه شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود برای به دست آوردن مشخصات برشی از سه تنش نرمال استفاده شد. ذکر این نکته ضروری است که دلیل استفاده نکردن از تنش‌های نرمال بیشتر و نقاط بیشتر برای رسم پوش گسیختگی محدودیت‌های آزمایشگاهی از جمله نبودن رینگ نیرو با ظرفیت بیشتر است.



شکل ۷- پوش گسیختگی آزمایش برش مستقیم



شکل ۸- الف) تغییرات پارامتر چسبندگی با افزایش جایگزینی زئولیت

- "Stabilization of desert sands using cement and cement dust", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, 2009, 162, 145-151.
- Annual Book of ASTM Standards "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", American Society for Testing and Materials, 2012.
- Annual Book of ASTM Standards, "Standard test for specific gravity of soil solids by water pycnometer", American Society for Testing and Materials, 2012.
- Consoli NC, Festugato L, da Rocha CG, Cruz RC, "Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures", *Influence of types of Portland cement, Construction and Building Materials*, 2013, 49, 591-597.
- Gunaratne M, "The foundation engineering handbook", Taylor & Francis Group, CRC PRESS, 2006.
- Hong S, "Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures", master thesis, USA, 2015.
- Kaya A, Durukan S, "Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner", *Applied Clay Science*, 2004, 25, 83-91.
- Ladd RS, "Specimen preparation and cyclic stability of sands", *Journal of Geo-technical Engineering, ASCE*, 1978, 103 (6), 535-547.
- Rattley MJ, Lehane BM, Consoli NC, Richards DJ, "Uplift of Shallow Foundations with cement stabilised backfill", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, 2007, 161 103-110.
- Sobolov K, Flores I, Hermsillo R, Torres-Martinez L, "Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites", *Journal of American Concrete Institute*, 2006, 254, 93-129
- Uchaipichat A, Limsiri C, "Shear strength characteristics of cemented loose sand", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, 5 (10), 771-776.
- Vogiatzis D, Kantiranis N, Filippidis A, Tzamos E, Sikalidis C, "Hellenic natural zeolite as a replacement of sand in mortar: mineralogy monitoring and evaluation of its influence on mechanical properties", *Geosciences* 2012, 2, 298-3.
- Yilmaz B, Ucar A, Oteyaka B, Uz V, "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement", *Building and Environment*, 2007, 42, 3808-3815.
- Yilmaz E, Belem T, Benzaazoua M, "Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions", *Engineering Geology*, 2015, 185, 52-62.
- Zabielska-Adamska K, "Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions", *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151, 481-489.
- روند نزولی به خود می‌گیرد. همچنین با گذشت زمان نیز مقاومت برشی نمونه‌ها افزوده شد.
- نتایج رسم نمودارهای موهر- کولمب نشان داد که افزایش مقاومت برشی نمونه‌های حاوی زئولیت، بیشتر ناشی از افزایش پارامتر چسبندگی بوده و نقش زاویه اصطکاک داخلی چندان محسوس نمی‌باشد
- کاهش رفتار ترد نمونه‌های زئولیتی سیمانی نسبت به نمونه‌های سیمانی با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان یکی دیگر از نتایج این بررسی است.
- از سوی دیگر استفاده از زئولیت به عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان، می‌تواند برای بهسازی ماسه با سیمان، مناسب باشد. ارزان بودن زئولیت نسبت به قیمت مواد خام پایه در تولید و فرآوری سیمان با توجه به آنالیز بهای جهانی (حدود ۳۰ درصد قیمت سیمان) و وجود معادن بسیار در کشور، کمک به کاهش مصرف سیمان و ذخیره کردن مقدار قابل توجهی انرژی در فرآیند تولید سیمان و مشارکت در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خصوصاً دی‌اکسید کربن، از جمله عوامل تأثیرگذار در انتخاب این ماده معدنی در بهسازی مخلوط ماسه‌های سیمانی است.
- ### ۸- مراجع
- اردستانی پ، "اثرات زیست‌محیطی استفاده از نانوسیلیس در بتن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۷.
- اسماعیلی پور، "بررسی آلاینده‌گی زیست محیطی تولید سیمان"، سایت اقتصاد ملی، <http://www.eghtesademeli.com>، ۱۳۸۸.
- خلقی، م ح، "زئولیت‌ها در ایران"، سازمان زمین‌شناسی کشور، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۹، ۹-۱۱۲.
- رضایانیپور ع، فیروزمکان ش، عبادی ت، بهرامی ح، "تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن"، ششمین کنگره مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.
- عباسی م، "بررسی زئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای بابلسر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، ۱۳۹۳.
- نورزاد ر، "مشخصات رفتاری ماسه مسلح با ژئوتکستایل"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۹.
- Tobon JL, Restrepo OJ, Paya J, "Comparative Analysis of Performance of Portland cement Blended with Nano Silica and Silica Fume", *Dyna Magazine*, 2010, 163, 37-48.
- ACI Committee 230, "State-of-of-the-Art report on soil cement", ACI. 230.1R-90. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997, 1-23.
- Al-Aghbari MY, Mohamedzein YEA, Taha R,

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Zeolite on Shear Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement

Mojtaba, Abbasi^{a,*}, Issa Shooshpasha^b, Hossein Molaabasi^c

^a Faculty of Civil Engineering, Mazandaran Institute of Technology, Babol, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Noushiravani University of Technology, Babol, Iran

^c Gonbad University, Gonbad, Iran

Received: 24 April 2017; **Accepted:** 07 January 2018

Keywords:

Stabilization, Cement, Zeolite, Compaction, Shear strength.

1. Introduction

Chemical stabilization by cement is among the factors of optimizing the soil performance. Numerous studies have been performed in the field of using cement as a stabilizing material (Naderi Nia- Naeini SA, 2009; Dupas J, Pecker A, 1979). The results of this research show that the addition of cement to the soil increases stiffness and improves soil's failure behavior and its engineering properties. Improving the engineering properties of the soils stabilized with cement is essentially due to hardening of cement as a result of hydration of cement and forming additional cementitious materials between the hydrated cement and clay particles in the soil (Shihata SA, Baghdadi ZA, 2001).

On the other hand, although cement industry has adopted the most modern technologies to reduce pollution, different stages of cement production and transportation have a great share in the environmental pollution. Studies indicate that to produce one ton of cement and clinker in Iran 0.655 and 0.79 tons of CO₂ greenhouse gas are emitted respectively (Milika Bildrici 2019).

Therefore the cement mix optimization is such that the lowest amount of energy is used to produce it with the least damage to natural resources and finally the best performance possible is provided which is considered as a main goal (Khaleghi, M. H. 1990).

So finding a suitable replacement for cement in development projects can be considered as one of the best ways to protect the environment. Pozzolans that has long been used as a substitute for cement in construction can reduce problems related to cement production and its environmental impact. zeolite as a pozzolan causes a significant increase in the resistance of the specimens in cementation reactions and adding zeolite to the soil can be considered as a stabilizer.

Zeolite is a Greek term that is composed of (Zein: to boil) Zeo- plus (-lite: rock) - lite and in 1976 for the first time a Swedish mineralogist i.e. Cronstedt called stilbite mineral as zeolite in which a lot of water exited from that mineral due to heating. Losing water in zeolite minerals is an easy and reversible reaction. Zeolite minerals include basic and alkaline earth metals and they can participate in reversible displacement reactions. The chemical and structural syntheses show that zeolite minerals are mainly composed of silicon, aluminum, and oxygen contents (Fig. 1).

Therefore in this study, the effect of cement and zeolite mixture as a pozzolan to perform combination reactions on shear strength of Babolsar sandy soil is addressed using (direct shear test) shear strength.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mojtaba.abasi13@yahoo.com (Mojtaba Abbasi), shooshpasha@nit.ac.ir (Issa Shooshpasha), www.SID.ir, hma@stu.nit.ac.ir (Hosein Molaabasi).

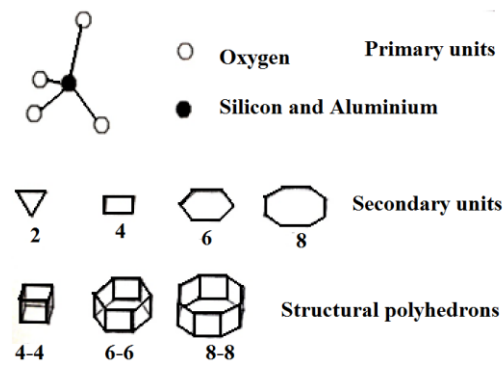


Fig. 1. View of structural units in Zeolite molecular structure (Khaleghi MH, 1990)

2. Laboratory plan

To study the effects of Zeolite on the shear strength of cement sands the parameters of the level of cement and zeolite, overhead stress and processing time have been considered. It should be noted that since zeolite is a pozzolanic material and pozzolanic strength increase is a time-consuming process 28-day processing time is selected.

2.1. Sand

Due to the existence of large sand deposits in the Caspian Sea coast, Babolsar sand is used in this study. Babolsar sand is bad aggregated sand the average grain size of which is 0.24 mm in accordance with the standard. Minimum and maximum dry weight values were 1.77 and 1.49 tons per cubic meter and density of solids is obtained 2.72 accordingly.

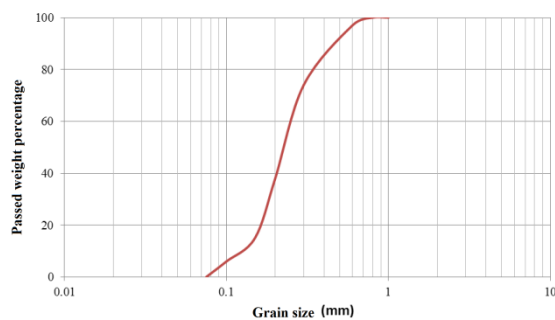


Fig. 2. Diagram of Babolsar sand grading

2.2. Cement

Portland cement Type II of Neka plant in Mazandaran province is used. It is specifically used where average hydration is necessary and sulfate attack is moderate. Its special level is 3060 grams per square centimeter.

2.3. Zeolite

The used zeolite is of Clinoptilolite type that has been extracted from a mine locating at 30km distant from northern Semnan so its physical and chemical specifications are given in Table 1. (MolaAbasi H. and Shooshpasha I. 2016).

Table 1. The physical and chemical specifications of zeolite mineral used in this study

Specifications	Zeolite
Specific weight (gr/m^3)	1.19
Specific area (gr/cm^3)	1000
Water absorption	60% volumetric
Cation exchange capacity (gr/meq)	2.6
Density of solid grains	2.2

3. Mixture design

To examine effect of zeolite on shear strength of the cement- stabilized sand, the following mixtures have been employed including different percentages of cement and percents of displacement of zeolite with cement: Cement percentage: 2, 4, 6, and 8% of total specific dry weight of the sample
Displacement percentages of zeolite with cement: 0, 10, 30, 50, 70, and 90% cement.

4. Preparing the specimen

Tests were performed based on ASTM D 3080 standard in which the soil to prepare the specimens must be enough to prepare three similar specimens for a specific state. In order to use the results for scientific purposes and engineering applications, all specimens were prepared by dimensions 100*100mm by wet temping method. In order to obtain a uniform density at height during the preparation of all specimens Lad's reduced density at three layers has been used. After making the appropriate specimens for direct shear tests and preventing moisture changes before the test, each specimen was separately placed in plastic bags and was tested according to the schedule

5. Results of direct shear test

Results of direct shear test indicate, by increasing the amount of cement, shear resistance increases, which is the result of increasing viscosity parameters and internal friction angle due to completed chemical reaction of cement. The addition of zeolite to cement to a certain percentage increases the shear strength of the specimens compared to the specimens without zeolite (cement specimens) and in this study replacing 50% of cement with zeolite is the optimized percentage to increase shear strength. The specimens were increased up to 60%.

Another important point is the effect of processing time to increase shear strength of the specimens; this increased strength can be caused by producing zeolite gel from zeolite reaction with cement and water which is a time-consuming process.

Mohr-Coulomb failure envelope figures show that the increase in shear strength of this study was mostly due to the increased viscosity parameter and changes in internal friction angle is not very high, which can be caused by a reaction between zeolite and calcium oxide in cement and which results in increased viscosity. Also by increasing the percentage of zeolite particles in the specimens, strain increases proportional to the peak strength.

6. Conclusion

In conjunction with the results of direct shear tests it was observed that by increasing cement the shear strength of specimens continues to increase. Adding zeolite to sand-cement mixture to 50% increased the shear strength of the specimens was increased up to 60%.

So, to achieve a certain resistance, the use of zeolite can reduce the consumption of cement while reaching the desired resistance which will reduce its negative environmental impacts.

7. References

- Naderinia-Naeini SA, "The influence of polymer inclusion and plasticity index on the unconfined compression strength of clays", Proc. of the 2nd International Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, 2009.
- Dupas J, Pecker A, "Static and dynamic properties of sand cement", Journal of Geotechnical ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division 03/1979; 105 (3), 419-436.
- Shihata SA, Baghdadi ZA, "Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement", Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13 (4), July/August, 243-24.
- Bildrici M, "Cement production, environmental pollution, and economic growth: evidence from China and USA", Clean Technologies and Environmental Policy, 2019.
- MolaAbasi H, Shooshpasha I, "Prediction of zeolite-cement-sand unconfined compressive strength using polynomial neural Network", The European Physical Journal Plus, 2016, 131 (4), pp.1-12.
- Khaleghi MH, "Zeolites in Iran", Earth Science Organization of Iran, Published by University of Tehran. 1990, p. 112.