

تأثیر سیمان و زئولیت در مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک متورم‌شونده

حامد احمدی چناربنی (دکتری)

سیدحمید لاجوردی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک

حسین ملاعباسی* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس

علی شیرکوند (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پیشوا

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۱ (۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۱-۲۰، (پژوهشی)

سالانه بسیاری از سازه‌ها بر خاک‌های متورم‌شونده ساخته می‌شوند، که دچار صدمه‌های جزئی، مانند انواع ترک‌های وارد شده و صدمات غیرقابل ترمیم می‌شوند. در پژوهش حاضر، از سیمان به عنوان تثبیت‌کننده‌ی خاک پایه و از زئولیت به عنوان ماده‌ی پوزولانی جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است. از این رو، درصد‌های مختلف سیمان (۶، ۸، ۱۰، ۱۲ درصد) با مقادیر مختلف جایگزینی آنها با درصد‌های مختلف زئولیت (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد) برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است در ادامه، با استفاده از نتایج آزمون‌ها می‌توان بیان کرد که بهترین خواص ژئوتکنیکی در این آزمون‌ها از قبیل مقاومت فشاری محصورنشده و سه‌محوری تحکیم‌نیافته‌ی زهکشی‌نشده در نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۲٪ سیمان و جایگزینی ۳۰٪ زئولیت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری حاصل شد. از سویی دیگر می‌توان بیان کرد که ۳۰٪ مقدار بهینه‌ی جایگزینی سیمان با زئولیت است. همچنین، افزایش زمان عمل‌آوری موجب تأثیر بیشتر سیمان و جایگزینی زئولیت در بهبود پارامترهای مقاومتی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز تصدیقی بر بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده است.

واژگان کلیدی: تثبیت، رس متورم‌شونده، سیمان، زئولیت، مقاومت برشی
زهکشی‌نشده.

۱. مقدمه

متورم‌شونده در خصوص بزرگراه‌ها، معابر، فرودگاه‌ها، پوشش تونل‌ها، کانال‌های آبیاری و دیگر سازه‌ها را به میزان ۹۰۰۰ میلیون دلار برآورد کرد، که به تنهایی بزرگ‌تر از خسارت‌های ناشی از بلایای طبیعی، از قبیل سیل، طوفان و زلزله بوده است.^[۱] در استان خوزستان در کشور ایران، طبق بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام گرفته می‌توان بیان کرد که خاک سطحی استان خوزستان، پتانسیل تورمی دارد و شاخص خمیری آن بالاست.^[۲] لذا بررسی خاک‌های متورم‌شونده ضروری است.

تثبیت شیمیایی از روش‌های مرسوم جهت تثبیت سطحی و همچنین نیمه‌عمیق خاک‌های با شاخص خمیری بالا، جهت ارتقاء خواص ذاتی است. افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک، جزء رایج‌ترین مواد جهت بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی خاک‌های مذکور هستند، که در این راستا، نیز در پژوهش‌های بسیاری به بررسی تأثیر آنها در خصوصیات مکانیکی آنها پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، سیمان به عنوان افزودنی پایه‌ی استفاده شده جهت تثبیت خاک متورم‌شونده در نظر گرفته شده است. خمیسا و محمدی (۲۰۱۴)، با استفاده از آزمون‌های تراکم، متیلن بلو^۱ (وابسته

خاک‌های متورم‌شونده، گروهی از خاک‌های مسئله‌دار رسی هستند، که بخش عمده‌ی ساختار آنها راکانی‌های رسی، مانند مونت‌موریلونیت و ایلیت تشکیل می‌دهند و رفتار آنها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی، از جمله: تغییرات دما، فشار، رطوبت و نوع سیال درون ساختار آنهاست. رفتار تورمی خاک‌های متورم‌شونده ارتباط مستقیمی با تغییر رطوبت دارد، که با افزایش رطوبت، خاک متورم و با کاهش آن دچار انقباض می‌شود.^[۱] خاک‌های متورم‌شونده، سطح ویژه‌ی بالا و قابلیت تبادل کاتیونی زیادی دارند و عمدتاً تحت تأثیر مقدار و نوع کانی‌های رسی هستند، که بیشتر در نواحی نیمه‌خشک و خشک دنیا یافت می‌شوند.^[۱]

برای درک بهتر میزان خسارت‌های ناشی از خاک‌های متورم‌شونده می‌توان بیان کرد که در سال ۱۹۹۳ میلادی، کشور آمریکا خسارت ناشی از رفتار مخرب خاک‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۵/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۵/۳۰.

DOI:10.24200/J30.2022.59536.3059

h.ahmadichenarboni@gmail.com
sh.lajvardi@iau-arak.ac.ir
hma@gonbad.ac.ir
shirkavand@ut.ac.ir

به مقدار سطح ویژه ذرات خاک)، سی. بی. آر (CBR)^۲ و برش مستقیم زهکشی نشده، آثار ترکیب آهک و سیمان را در خواص مهندسی خاک رس متورم شونده‌ی بیش تحکیم یافته بررسی کردند و دریافته‌اند که افزودن ترکیب آهک و سیمان به خاک مذکور، باعث کاهش شاخص خمیری و خواص تورمی و در نتیجه تراکم بهتر آن، افزایش CBR خاک تثبیت شده و افزایش مقاومت برشی آن می‌شود.^[۵] آزمون‌های تأثیر سرباره‌ی فولاد و نوع سیمان در خواص ژئوتکنیکی دو نوع خاک متورم شونده با تورم حجمی توسط ماهدی و همکاران (۲۰۱۸) بر روی ۳۱۲ نمونه با ۱۸ اختلاط مختلف انجام شد و نشان داد که حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) خاک با افزودن سیمان تا ۱۰٪ کاهش می‌یابد و برای مقادیر بیشتر از ۱۰٪، روند آن افزایشی می‌شود. همچنین تثبیت خاک با سیمان سبب افزایش pH خاک می‌شود، که افزایش اشاره شده برای سیمان‌های نوع I و II بیشتر و برای نوع IV کمتر بوده است. افزودن سیمان به خاک، نیز موجب بهبود مقاومت فشاری محصورنشده‌ی (UCS)^۵ خاک شده است.^[۶]

با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و کاهش تولید آلاینده‌های مرتبط با فرایند تولید سیمان، از جمله گازهای گلخانه‌ای، استفاده از پوزولان‌های طبیعی، مانند زئولیت برای جایگزینی بخشی از سیمان می‌تواند توسط کاهش مصرف سیمان و جایگزینی آن با مواد بازیافتی از فرایندهای صنعتی یا مواد دوست‌دار محیط زیست، سبب کاهش مصرف بی‌رویه‌ی منابع طبیعی، کاهش مصرف انرژی و حفظ محیط زیست شود.^[۷] ملاعباسی و همکاران (۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۲۰)، تأثیر افزودنی سیمان پرتلند نوع II و زئولیت در خاک‌های ماسه‌ی را با انجام آزمون مقاومت فشاری محصورنشده و سه‌محوری بررسی کردند و دریافته‌اند که خصوصیات مقاومتی و گسیختگی خاک با جایگزینی زئولیت به جای سیمان با گذشت زمان عمل‌آوری بهبود پیدا می‌کند. آزمون خواص شیمیایی اکسیژن (COD) نیز برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف افزودنی‌ها به عنوان یک ارزیابی زیست محیطی انجام و مشاهده شد که مقدار COD با افزایش جایگزینی سیمان با زئولیت افزایش یافته است.^[۸-۱۰] احمدی و همکاران (۲۰۲۱)، در بررسی رفتار مکانیکی خاک متورم شونده‌ی تثبیت شده با سیمان و زئولیت دریافته‌اند که افزایش جایگزینی سیمان با زئولیت، سبب کاهش وزن مخصوص بیشینه‌ی خاک خشک و همچنین درصد رطوبت بهینه‌ی ترکیب خاک، سیمان و زئولیت می‌شود.^[۱۱] شهریارکیان و همکاران (۲۰۲۱)، نیز در بررسی تأثیر سیمان و زئولیت در رفتار مکانیکی خاک با شاخص خمیری پایین حاوی ماسه، سیلت و رس تحت چرخه‌های یخبندان - ذوب دریافته‌اند که افزودن ۳٪ زئولیت به نمونه‌های سیمانی سبب افزایش مقاومت فشاری محصورنشده و کرنش گسیختگی نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان شده است.^[۱۲]

در پژوهش حاضر به بررسی هم‌زمان اثر سیمان و زئولیت در افزایش خصوصیات مقاومتی خاک متورم شونده از طریق انجام بررسی‌های آزمایشگاهی سه‌محوری پرداخته شده است. به این منظور درصد‌های مختلفی از سیمان و مقادیر مختلفی زئولیت به منظور جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی برای تثبیت خاک متورم شونده استفاده و آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری محصورنشده و سه‌محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام و نتایج آن بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در بخش حاضر، ابتدا به معرفی خاک پایه و مصالح مصرفی پرداخته و سپس روند انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مختصراً شرح داده شده است. تمامی استانداردهای

استفاده شده در آزمون‌های پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

• رس متورم شونده (خاک پایه)

خاک بررسی شده در پژوهش حاضر از بندر ماهشهر استان خوزستان تهیه و برای تعیین دانه‌بندی خاک مورد نظر، از روش تر استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی حاصل از آزمون‌های الک و هیدرومتری در شکل ۱ مشاهده می‌شود. ضریب فشردگی خاک مذکور بر اساس آزمون ادنومتری انجام شده برابر ۴۸٪ و ضریب تورم آن ۱۱٪ بوده و تورم آزاد آن نیز از آزمون تحکیم، ۴۲٪ به دست آمده است. همچنین آزمون حد خمیری و روانی (به روش جام کاساگرانده) بر روی خاک پایه انجام شده است، که مقادیر آنها به ترتیب ۲۹ و ۷۳ درصد و در نتیجه شاخص خمیری (PI) برابر ۴۴٪ شده است.

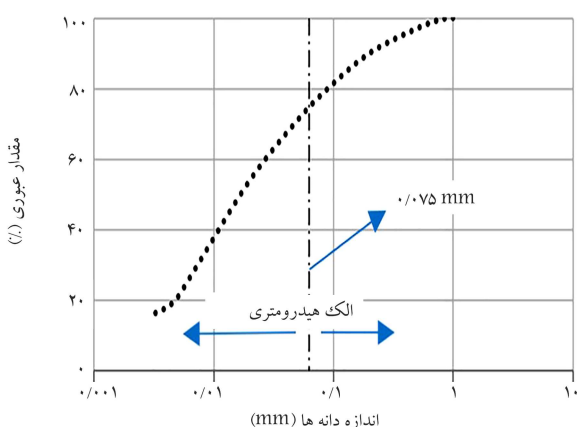
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون‌های حدود اتربرگ، دانه‌بندی و با توجه به روش طبقه‌بندی خاک متحد^۸، خاک پایه، رس با شاخص خمیری بالا (CH) بوده است. با توجه به شاخص خمیری خاک‌های گروه اخیر عموماً (PI > ۴۰) و همچنین با استفاده از طبقه‌بندی اسنیتن^[۱۳]، می‌توان آنها را در گروه خاک‌های با پتانسیل تورمی بالا قرار داد. درصد رطوبت بهینه و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک به ترتیب ۲۲٪ و ۱۵/۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب بر اساس آزمون تراکم استاندارد به دست آمده است.

• سیمان (تثبیت کننده)

سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع سیمان پرتلند نوع II بوده است، که وزن مخصوص آن ۳/۱۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب، نرمی بلین^۹ آن بیش از ۲۸۰ سانتی‌مترمربع برگرم و انبساط اتوکلاو آن کمتر از ۰/۶٪ بوده است. سایر مشخصات

جدول ۱. استانداردهای استفاده شده در پژوهش حاضر.

استاندارد	آزمون
ASTM D۴۲۲ ^[۱۴]	دانه‌بندی
ASTM D۲۴۳۵	ادنومتری
ASTM D۵۸۹۰	تورم آزاد
ASTM D۴۳۱۸ ^[۱۵]	حدود اتربرگ
ASTM D۲۴۸۷ ^[۱۶]	طبقه‌بندی متحد
ASTM D۶۹۸ ^[۱۷]	پروکتور استاندارد
STM D۲۱۶۶ ^[۱۸]	مقاومت فشاری محصورنشده
ASTM D۲۸۵۰ ^[۱۹]	مقاومت سه‌محوری (UU)



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک پایه (به روش الک و هیدرومتری).

شیمیایی و فیزیکی سیمان استفاده شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است، که مطابق آن، بیشتر ذرات تشکیل دهنده سیمان، اکسیدکلسیم (CaO) است، که در واکنش های هیدراتاسیون شرکت می کنند.^[۱۱]

• ژئولیت (افزودنی)

بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، ژئولیت در گروه ML قرار می گیرد. در پژوهش حاضر، ژئولیت معدنی با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ از نوع کالینوپتیولیت با فرمول شیمیایی مطابق رابطه ۱ است.^[۱۱]

$$(Na, K)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 6H_2O \quad (1)$$

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان استفاده شده.^[۱۱]

آنالیز شیمیایی	
اکسیدها	درصد استفاده شده
Na ₂ O	۰/۱۸
Al ₂ O ₃	۴/۶۸
SiO ₂	۲۱/۴
SO ₂	۲/۳
K ₂ O	۰/۵۱
CaO	۶۲/۹
Fe ₂ O ₃	۳/۷۵
MgO	۴/۱
L.O.I	۰/۸۱
خصوصیات فیزیکی و مقاومت	
< ۲۰	۳ روز مقاومت فشاری
< ۳۱	۷ روز (MPa)
< ۳۸	۲۸ روز
< ۱۲۰	Initial (min) آزمون ویکات
۳:۳۰	Final (hr)

جدول ۳. مشخصات شیمیایی و فیزیکی ژئولیت استفاده شده.^[۱۱]

آنالیز شیمیایی	
اکسیدها	درصد استفاده شده (%)
Na ₂ O	۲/۳۱
Al ₂ O ₃	۱۳/۶۲
SiO ₂	۶۶/۹۳
SO ₂	۱/۳۶
K ₂ O	۲/۳۸
CaO	۴/۴۱
Fe ₂ O ₃	۲/۹
MgO	۲/۵۴
L.O.I	۳/۸۲
ویژگی های فیزیکی	
۱۰۰۰	سطح ویژه (g/m ³)
۲/۶	ظرفیت تبادل کاتیونی (meq/g)

۳. طرح اختلاط و ساخت نمونه ها

برای انجام آزمون مکانیکی در پژوهش حاضر، با توجه به ریزدانه بودن خاک پایه، نسبت های سیمان ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد سیمان و برای ژئولیت، مقادیر جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد از هر مقدار مشخص سیمان در نظر گرفته شده است (جدول ۴). برای وزن مخصوص خشک نمونه ها از نتایج آزمون های تراکم ارائه شده در پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۱).^[۱۱] که در جدول ۳ ارائه شده، استفاده شده است. بدین صورت که برای هر طرح اختلاط مورد نظر از خاک - سیمان - ژئولیت، با دانستن وزن مخصوص خشک بیشینه (γ_{dmax}) و رطوبت بهینه (w_{opt}) مربوط به هر طرح و استفاده از روابط وزنی - حجمی، مقادیر مورد نظر مصالح و میزان آب برای درجهی تراکم (Rd) برابر ۹۸٪، جهت اختلاط و ساخت هر نمونه به دست آمده است.

$$\gamma_d = (R_d = 98) \times \gamma_{dmax} \quad (2)$$

شایان ذکر است که درجهی تراکم ۹۸٪ برای نمونه سازی های آزمون های فشاری محصورنشده و سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده استفاده شده است.

برای ساخت نمونه ها، مقدار وزن مصالح بر اساس رابطه ی ۲ محاسبه شده و مقدار آب مختص آنها با توجه به حجم مشخص قالب هر طرح اختلاط به صورت همگن با هم مخلوط شده و تمامی مقدار ذکر شده در سه لایه ی هم اندازه، به روش تراکم استاتیکی با میله ی فلزی با ضربات آهسته کوبیده شده است، به طوری که همگنی خاک تحت تأثیر قرار نگیرد. پس از کوبیدن هر لایه، جهت ایجاد درگیری در سطح و به وجود آوردن اتصال بین دو لایه، خراش هایی زده شده است. سپس نمونه ها جهت حفظ رطوبت در زمان عمل آوری، در کیسه های زیپی قرار گرفتند تا در دمای اتاق ۲۱ تا ۲۴ درجه ی سانتی گراد و رطوبت بالای ۹۰٪، تحت عمل آوری قرار گیرند. برای تمامی آزمون ها، نمونه هایی برای دو زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه ساخته شدند. ذکر این نکته ضروری است که نمونه های آزمون های مقاومتی در قالب هایی استوانه یی با قطر ۴۵ میلی متر و ارتفاع ۹۵ میلی متر تهیه شده اند.

• آزمون فشاری محصورنشده

هدف از انجام آزمون فشاری محصورنشده، به دست آوردن درصد ژئولیت بهینه به ازاء مقادیر مختلف سیمان برای انجام آزمون های سه محوری است. آزمون مذکور برای تعیین تقریبی و سریع مقاومت فشاری بدون هیچ فشار جانبی است. سرعت بارگذاری در آزمون فشاری محصورنشده به گونه یی تنظیم شده است که در هر دقیقه، ۱٪ کرنش محوری در نمونه ایجاد شود. به ازاء تغییر شکل های معین، مقدار نیروی وارده، یادداشت و بارگذاری نیز تا زمان گسیختگی و یا زمانی که ۱۵٪ کرنش در نمونه ایجاد شود، ادامه یافته است. در کل ۴۸ آزمون مقاومت فشاری انجام شده است.

• آزمون سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده (UU)

تعداد ۴۸ آزمون سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده، بر روی نمونه های خاک رس متورم شونده ی تثبیت شده با سیمان و ترکیب سیمان - ژئولیت بهینه انجام و نتایج حاصل از آنها، به صورت جدول و نمودارهای تغییرات زاویه ی اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (C)، کرنش گسیختگی و سختی ارائه شده است. آزمون های انجام شده ی سه محوری، همانند آزمون فشاری محصورنشده تا کرنش محوری ۱۵٪ ادامه یافته است؛ اگرچه گسیختگی نمونه ها در کرنش های کمتری صورت گرفته است. در روند آزمون تحکیم نیافته ی زهکشی نشده باید اشاره کرد که هنگام اعمال فشار محفظه یی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به نمونه، اجازه ی زهکشی داده نمی شود.

جدول ۴. طرح اختلاط و مقادیر حاصل از آزمون‌های پروکتور استاندارد.

وزن مخصوص خشک بیشینه (γ_{dmax}) (kN/m^3)	رطوبت بهینه (w_{opt}) (%)	افزودنی	
		سیمان (%)	ژئولیت
۱/۵۶	۲۲	۰	۰
۱۵/۲۹	۲۷/۱	۰	۰
۱۵/۰۹	۲۵/۳	۱۰	۰
۱۴/۸۰	۲۴/۸	۳۰	۰
۱۴/۷۰	۲۴	۵۰	۶
۱۴/۵۰	۲۳/۲	۷۰	۰
۱۴/۴۱	۲۱/۷	۹۰	۰
۱۵/۴۸	۲۸/۴	۰	۰
۱۵/۳۹	۲۷/۶	۱۰	۰
۱۵/۰۹	۲۵/۷	۳۰	۰
۱۴/۸۰	۲۴/۶	۵۰	۸
۱۴/۷۰	۲۴/۱	۷۰	۰
۱۴/۴۱	۲۲/۳	۹۰	۰
۱۵/۷۸	۳۰/۶	۰	۰
۱۵/۴۸	۲۸/۷	۱۰	۰
۱۵/۲۹	۲۷/۷	۳۰	۰
۱۴/۹۹	۲۶/۴	۵۰	۱۰
۱۴/۹۰	۲۵/۹	۷۰	۰
۱۴/۵۰	۲۳/۸	۹۰	۰
۱۵/۸۸	۳۱/۵	۰	۰
۱۵/۵۸	۲۹/۶	۱۰	۰
۱۵/۴۸	۲۸/۳	۳۰	۰
۱۵/۱۹	۲۸	۵۰	۱۲
۱۴/۹۹	۲۷/۱	۷۰	۰
۱۴/۷۰	۲۵/۹	۹۰	۰

سه محوری UU بر روی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سیمان و ژئولیت انجام شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌ها برای آزمون‌های مقاومتی، برای دو دوره‌ی زمانی ۷ و ۲۸ روزه تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. در ادامه، نتایج حاصل از آزمون‌های اخیر به تفسیر ارائه شده‌اند.

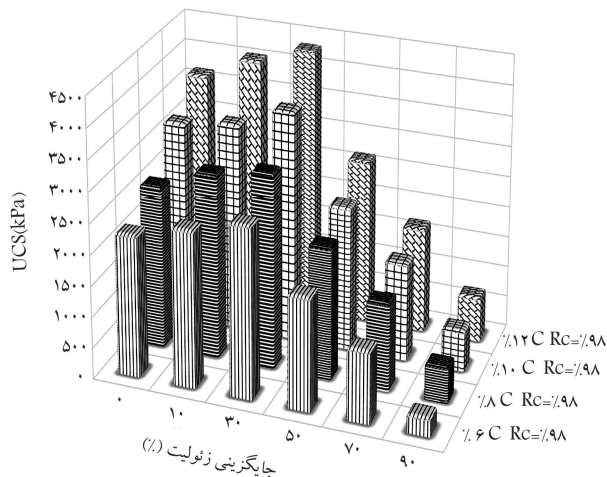
۱.۴. نتایج آزمون فشاری محصورنشده

مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده‌ی (UCS) نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و ژئولیت در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شوند، که مطابق آنها، افزایش مقدار سیمان از ۶ به ۱۲ درصد، سبب افزایش پارامتر مقاومتی UCS شده است، که می‌توان آن را نتیجه‌ی افزایش میزان واکنش هیدراتاسیون سیمان در ترکیب خاک - سیمان دانست. در ادامه، در هر درصد مشخص سیمان، جایگزینی ۱۰ تا ۹۰ درصد از سیمان مصرفی با ژئولیت، کاهش UCS نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۷ روزه مشهود بوده است. با توجه به زمان‌بر بودن واکنش پوزولانی،

برای انجام آزمون‌ها، ابتدا غشاء توسط دو اورینگ (حلقه لاستیکی مخصوص) به پایه‌ی پایینی متصل و پس از جایگذاری نمونه به همراه کاغذهای صافی و سنگ‌های متخلخل بر پایه‌ی پایینی و قرار دادن غشا بر روی نمونه، انجام اتصال‌های آن به کلاهک بالایی توسط دو اورینگ انجام شده و محفظه بر روی مجموعه‌ی مذکور قرار گرفته است. سپس پیستون اعمال بار، به آرامی به کلاهک نمونه متصل شد تا اطمینان حاصل شود که کلاهک و پیستون هم‌راستا هستند و در نهایت محفظه تحت فشار همه‌جانبه و نیروی محوری قرار گرفت. در شکل ۲، نمای دستگاه سه‌محوری به کار برده شده برای آزمون‌های پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

در پژوهش حاضر، خواص مکانیکی خاک رس متورم‌شونده‌ی تثبیت شده با سیمان و ژئولیت بررسی شده است. به این منظور، آزمون‌های فشاری محصورنشده و



شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده بر حسب تغییرات سیمان و زئولیت با ۲۸ روز عمل‌آوری.

افزایش بیشتر مقاومت نمونه‌ها حاصل شده است. این در حالی است که جایگزینی مقادیر بیشتر از ۳۰٪ سیمان با زئولیت، موجب افزایش بیش از حد سیلیکا و آلومینا نسبت به $Ca(OH)_2$ شده است، لذا $Ca(OH)_2$ کاملاً مصرف شده و قسمت اعظم زئولیت در واکنش پوزولانی شرکت نکرده و مقاومت نهایی نمونه‌ها کاهش یافته است.^[۲۱] همچنین، تغییرات ریزساختاری شیمیایی مشاهده شده در پژوهش ایزدپناه و همکارانش (۲۰۲۰)،^[۲۲] نیز موارد مطرح شده در خصوص مقدار تولید ژل‌های سیمانی زئولیت در گذر زمان را اثبات می‌کنند. شایان ذکر است که بیشترین مقدار UCS در نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۲٪ سیمان و میزان جایگزینی سیمان با زئولیت ۳۰٪ به دست آمده است.

۲.۴. نتایج آزمون سه‌محوری

۱.۲.۴. رفتار تنش - کرنش نمونه‌ها تا کرنش ۱۵٪

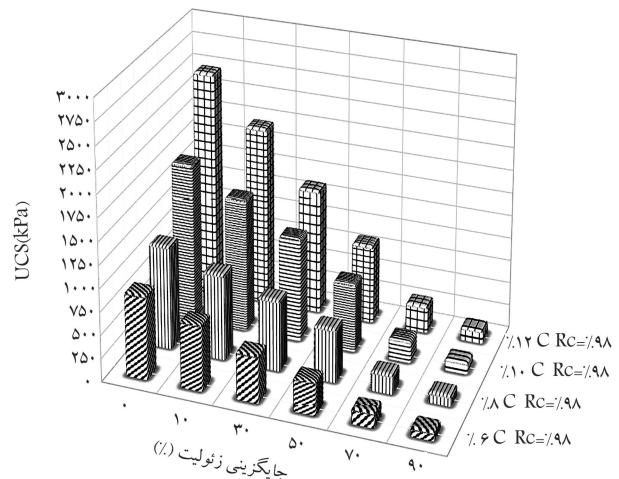
نمودارهای تنش انحرافی - کرنش (به صورت نمونه برای ۱۰٪ سیمان) حاصل از آزمون‌های سه‌محوری انجام شده، بر روی نمونه‌های سیمانی و سیمانی - زئولیتی در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، که با توجه به آنها، افزایش تنش در نمونه‌ی تحت اثر بار انحرافی کرنش‌های آغازین مشهود است، به طوری که با شبیهی تقریباً ثابت افزایش یافته‌اند. در نمونه‌ها قابل مشاهده است که با نزدیک شدن به کرنش گسیختگی، شیب نمودار تنش - کرنش کاهش یافته و سپس، گسیختگی رخ داده است. این کاهش مقاومت ناشی از رفتار ترد و شکننده‌ی خاک سیمانی است. با توجه به رفتارهای مشاهده شده می‌توان دریافت که نمونه‌های سیمانی، رفتاری شکننده و ترد و نمونه‌های سیمانی - زئولیتی رفتاری انعطاف‌پذیر در مقایسه با نمونه‌های سیمانی از خود بروز می‌دهند. با بررسی نمودارهای تنش - کرنش در نمونه‌های مختلف و دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، می‌توان دریافت که افزایش فشار همه‌جانبه از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال، سبب تمایل نقاط گسیختگی به سمت بالا و راست شده است، که در نتیجه‌ی آن افزایش کرنش گسیختگی به دست آمده است. با استفاده از نمودارهای تنش - کرنش، پارامترهای مقاومت پیشینه و سختی نمونه‌ها در ادامه بررسی شده‌اند.

۲.۲.۴. تأثیر افزودن سیمان، سیمان - زئولیت و زمان عمل‌آوری در مقاومت پیشینه

با بررسی نتایج حاصل از آزمون‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های سیمانی و



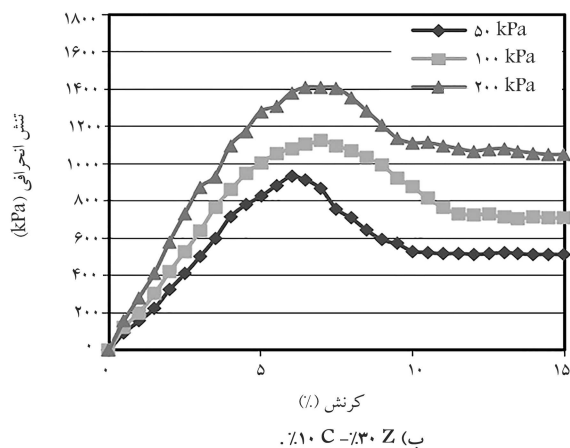
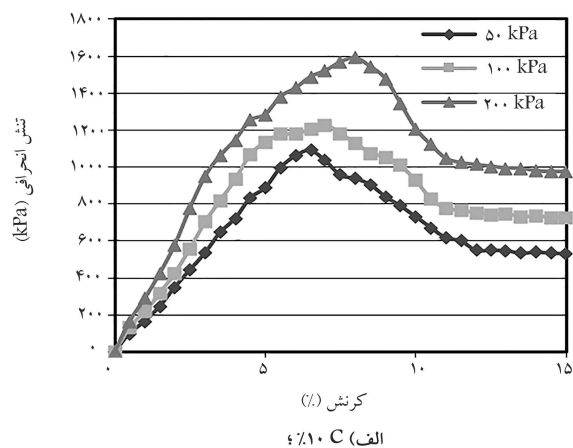
شکل ۲. نمای دستگاه سه‌محوری.



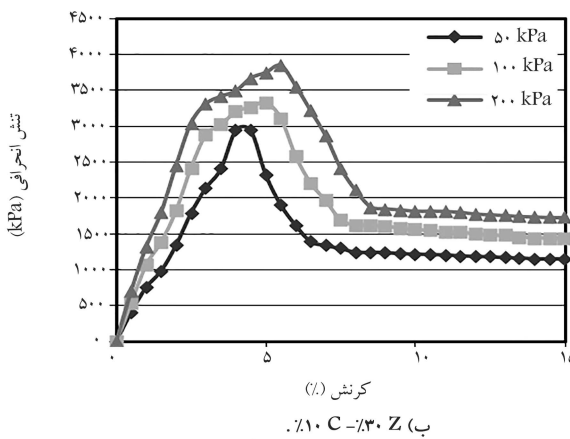
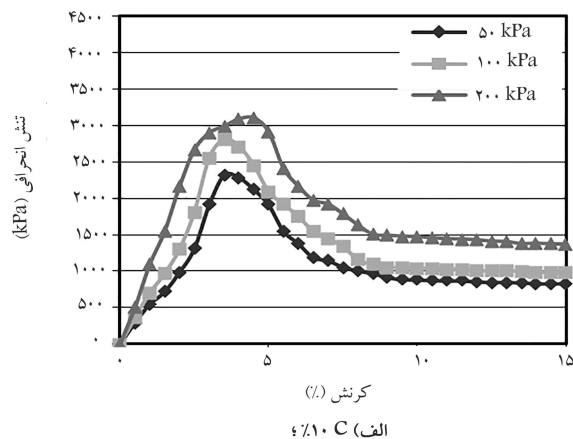
شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده بر حسب تغییرات سیمان و زئولیت با ۷ روز عمل‌آوری.

می‌توان بیان کرد که زمان عمل‌آوری ۷ روزه برای شروع واکنش اخیر کافی نخواهد بود. بنابراین جایگزینی سیمان با هر مقدار از زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، سبب کاهش مقدار سیمان برای واکنش هیدراتاسیون می‌شود؛ که در نتیجه، مقادیر ژل کلسیم - سیلیکات - هیدرات (C-S-H) تولید شده در واکنش پوزولانی کاهش و UCS نمونه‌ها کاهش شدیدی یافته‌اند.^[۲۰]

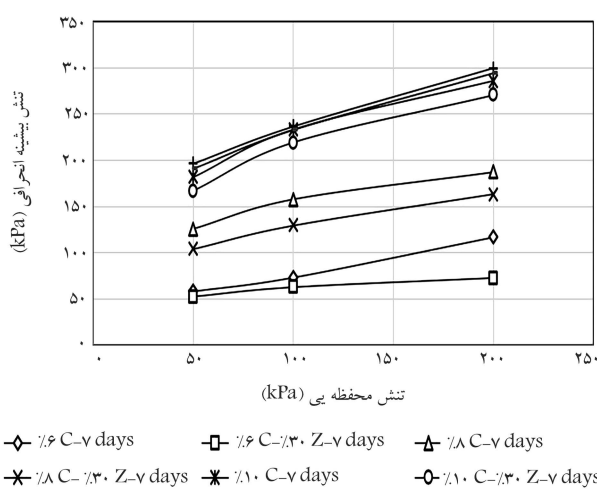
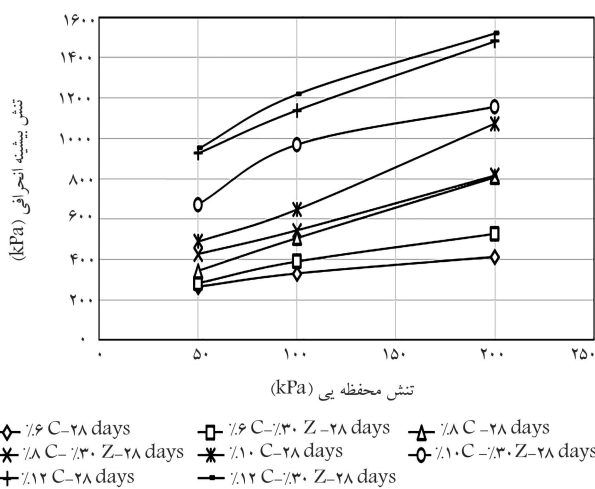
پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۳۰٪ سبب افزایش محسوس UCS نمونه‌های تثبیت شده است. اما جایگزینی مقادیر بیشتر از آن تا ۹۰٪، سبب کاهش چشمگیر UCS نمونه‌ها شده است. لذا ۳۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت به عنوان مقدار بهینه برای انجام آزمون‌های سه‌محوری استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در نمونه‌ی مذکور، مقدار $Ca(OH)_2$ حاصل از واکنش هیدراتاسیون سیمان، با مقادیر سیلیکا و آلومینای موجود در زئولیت به تعادل رسیده و سبب شده است که تمامی مواد اخیر با گذشت زمان در واکنش پوزولانی شرکت کنند و باعث تولید ژل‌های C-S-H و C-A-H^{۱۱} شوند و در نتیجه،



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش با ۷ روز عمل‌آوری برای.



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش با ۲۸ روز عمل‌آوری برای.



شکل ۸. نمودار تنش بیشینه انحرافی - تنش محفظه‌یی برای نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری.

شکل ۷. نمودار تنش بیشینه انحرافی - تنش محفظه‌یی برای نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری.

مقاومت نمونه‌های سیمانی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های ۷ روزه چشمگیر بوده است. نتایج مربوط به روند مقاومت بیشینه منطبق بر مشاهدات مربوط به نتایج مقاومت فشاری محصورنشده است. بدین ترتیب که در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، نمونه‌های سیمانی مقاومت بیشتری را تجربه کرده و برای

شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که افزودن سیمان سبب افزایش مقاومت بیشینه نمونه شده است. افزایش مقدار سیمان نیز موجب به وجود آمدن روندی افزایشی در مقاومت نمونه‌ها شده است. روند اخیر، به دلیل افزایش فرآورده‌های واکنش هیدراتاسیون سیمان در خاک حاصل شده است. افزایش

نسبت به نمونه‌های سیمانی شده است. افزایش قابل توجه مقادیر E_{50} نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی به دلیل کافی بودن زمان مورد نیاز برای شروع و پیشرفت واکنش پوزولانی است. در این مدت، زمان کافی برای انجام واکنش بین سیلیکا و آلومینای موجود در ژئولیت با $Ca(OH)_2$ حاصل از فرایند هیدراتاسیون سیمان فراهم شده است. لازم به ذکر است که تأثیر زمان عمل‌آوری در نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی بیشتر از نمونه‌های سیمانی بوده است. نتایج حاصل از آزمون‌های اخیر را می‌توان تأییدی بر نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت محصورنشده دانست. افزایش فشار همه‌جانبه از 50° به 100° و 200° کیلوپاسکال نیز موجب پیدایش روند افزایشی در E_{50} نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی شده است. این مشاهدات با یافته‌های ملاءعاسی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۰] انطباق دارد.

۴.۲.۴. تأثیر مقادیر افزودنی‌ها و زمان عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومت برشی (UU)

در جدول ۵، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها (مقادیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)) به دست آمده از نمودارهای دواير موهرازمون‌های سه‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های تثبیت شده سیمانی و سیمانی - ژئولیتی ارائه شده است. با مقایسه مقادیر ارائه شده می‌توان دریافت که افزودن سیمان سبب افزایش چشمگیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک پس از ۷ روز عمل‌آوری شده است. افزایش مقدار سیمان نیز سبب شکل‌گیری روند افزایشی ϕ در نمونه‌ها شده است. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز نیز، سبب شدت گرفتن این روند افزایشی شده است. جایگزینی سیمان با درصد بهینه‌ی ژئولیت پس از ۷ روز عمل‌آوری، سبب کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است، که به دلیل کم بودن زمان عمل‌آوری ۷ روزه برای شروع روند واکنش پوزولانی ژئولیت بوده است. اما پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی افزایش بیشتری نسبت به نمونه‌های سیمانی از خود نشان داده‌اند، که بیان‌گر کافی بودن زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه برای پیشروی و اثرگذاری واکنش پوزولانی در تثبیت نمونه‌هاست. چنین رفتاری در پژوهش ملاءعاسی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۰] در بررسی تأثیر سیمان و ژئولیت در رفتار سه‌محوری خاک ماسه‌یی مشاهده شده است.

۵. بررسی ریزساختار نمونه‌های سیمانی و سیمانی -

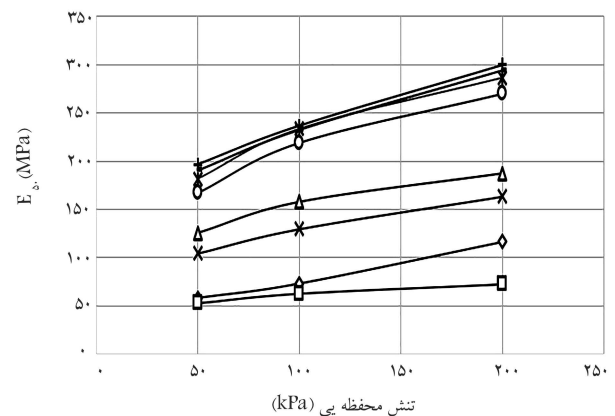
ژئولیتی بهینه

در پژوهش حاضر، برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. بررسی رفتار ریزساختاری خاک از آن جهت نقش مهمی در درک رفتار خاک دارد که مقاومت برشی خاک از تماس ذرات آن انتقال پیدا می‌کند. در حقیقت، ضعیف‌ترین ناحیه در عوامل محدودکننده‌ی مقاومت خاک، ناحیه‌ی انتقال (فضاهای خالی بین ذرات) است. حجم و اندازه‌ی فضاهای خالی نواحی انتقال، مقاومت آن را مشخص می‌کنند. با توجه به نوع افزودنی استفاده شده در تثبیت خاک، مقاومت نواحی انتقال ممکن است از توده‌ی خاک پایه بیشتر شود. طی واکنش هیدراتاسیون، در ابتدای زمان عمل‌آوری، اندازه‌ی حفره‌های خالی بزرگ و نواحی انتقال حجم بزرگ‌تری دارند، که سبب می‌شود نمونه مقاومت پایین‌تری از خود نشان دهد. اما با گذشت زمان عمل‌آوری، محصولات واکنش هیدراتاسیون، حجم نواحی انتقال را کاهش می‌دهند. همچنین محصولات واکنش هیدراتاسیون عموماً مقاومت بیشتری از توده‌ی خاک دارند. کریستاله شدن

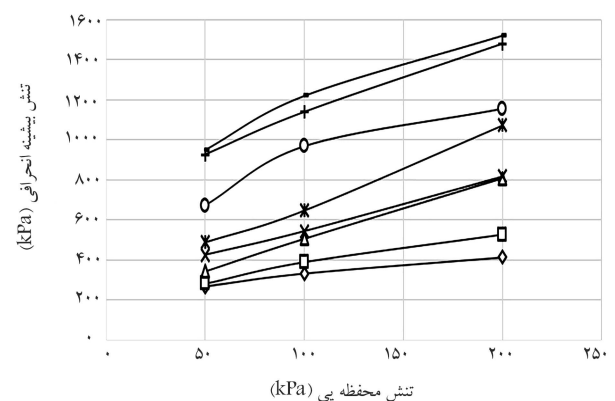
زمان ۲۸ روزه، نمونه‌های حاوی ژئولیت، بهینه‌ی مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند.

۳.۲.۴. سختی (مدول کشسانی سکانت E_{50})

مدول کشسانی سکانت E_{50} ، به عنوان ضریب سختی خاک بررسی می‌شود، که از تعیین شیب خط واصل مبدأ مختصات، به کرنش معادل تنش برابر 50° تنش نهایی حاصل می‌شود. مقادیر E_{50} نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سیمان - ژئولیت نسبت به تغییرات فشار همه‌جانبه در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شوند، که با توجه به آنها می‌توان دریافت که با افزودن سیمان و افزایش مقدار آن در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، مقادیر E_{50} نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین روند افزایشی مشابه با افزایش فشار محفظه‌یی حاصل شده است. افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز نیز سبب افزایش بیشتر مقادیر E_{50} نمونه‌ها شده است. نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی پس از ۷ روز عمل‌آوری، مقادیر کمتری نسبت به نمونه‌های سیمانی از خود نشان دادند که می‌توان دلیل آن را کم بودن زمان عمل‌آوری برای شروع واکنش پوزولانی و ضعیف بودن پیوندهای سیمانی ناشی از آن دانست. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز، سبب پیشی گرفتن مقادیر E_{50} نمونه‌های سیمانی - ژئولیتی



شکل ۹. تغییرات E_{50} تنش محفظه‌یی نمونه‌ها با ۷ روز عمل‌آوری.



شکل ۱۰. تغییرات E_{50} تنش محفظه‌یی نمونه‌ها با ۲۸ روز عمل‌آوری.

جدول ۵. مقادیر C و ϕ در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز.

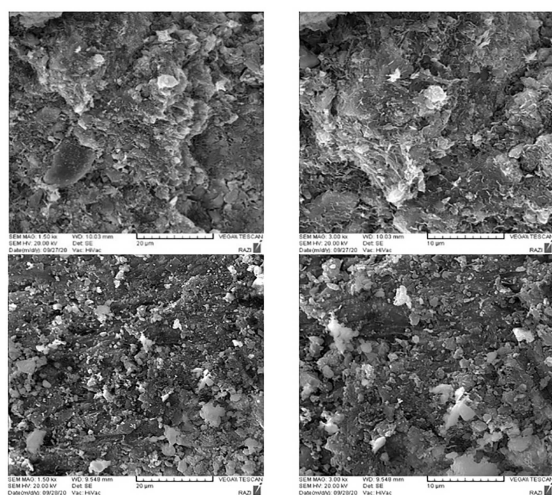
سیمان (%)	جایگزینی ژئولیت (%)	چسبندگی (C) زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ)	
		۲۸ روزه	۷ روزه
۰	۰	۲۷۶/۹	۱۳۵
۶	۰	۲۹۷	۲۷/۴
۸	۳۰	۳۵۴/۳	۲۵/۹
۱۰	۳۰	۳۷۷/۹	۳۳/۴
۱۲	۳۰	۴۱۰/۳	۳۲/۷
	۳۰	۵۰۰/۴۹	۳۸/۱
	۳۰	۵۴۰/۵	۲۲۶/۳
	۳۰	۵۴۰/۵	۱۹۰/۳
	۳۰	۶۰۰/۵۳	۲۰۱/۱
	۳۰		۱۸۴/۹

محصولات جدید در نواحی انتقال ممکن است از واکنش بین سیمان و ذرات خاک باشد، که تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را منجر می‌شود. ژل پدید آمده از پیدایش مقدار بیشتر هیدروکسید کلسیم در نواحی انتقال جلوگیری و افزایش مقاومت را حاصل می‌کند.^[۲۳] با تصاویر SEM می‌توان تغییراتی از جمله تغییر در اندازه‌ی ذرات، سیمانی شدن بافت خاک توسط ژل C-S-H، را که تأثیر مستقیم در مقاومت نمونه دارد، بررسی کرد. بررسی تصویرهای شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن ۱۲٪ سیمان به خاک رس متورم‌شونده پس از ۷ روز سبب حاصل شدن ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و کوچک‌تر شدن نواحی انتقال شده است. اما در نمونه‌ی حاوی ژئولیت، به سبب کم بودن زمان عمل‌آوری برای شروع واکنش پوزولانی، ذرات ژئولیت وارد واکنش نشده و بافت خاک دستخوش تغییرات مشهودی نسبت به نمونه‌ی سیمانی نشده است. اما مشاهده‌ی تصاویر میکروسکوپی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، نمونه‌های حاوی ژئولیت پیشرفت چشمگیری در کاهش حجم نواحی انتقال از خود نشان داده‌اند، به طوری که فرآورده‌های واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه‌ی سیمانی افزایش یافته و افزایش میزان ژل سیلیکات کلسیم هیدراته سبب کاهش تخلخل نمونه شده است.

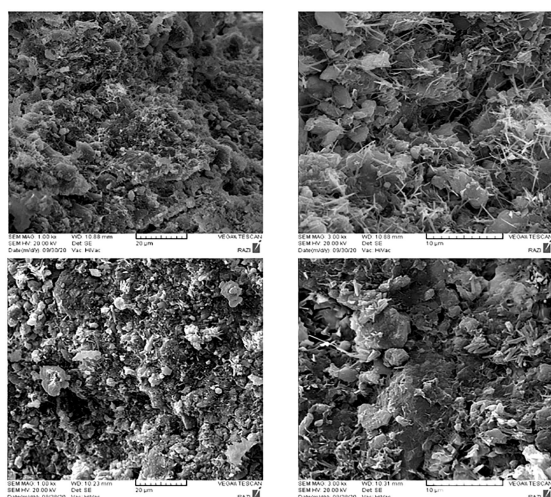
۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی آثار استفاده از ماده‌ی معدنی ژئولیت، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک رس متورم‌شونده پرداخته شده است. استفاده از ماده‌ی پوزولانی ژئولیت، سبب کاهش مصرف سیمان در بهسازی خاک متورم‌شونده می‌شود، که هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از جنبه‌ی اقتصادی حائز اهمیت است. جهت بررسی آثار جایگزینی سیمان با ژئولیت در رفتار ژئوتکنیکی خاک رس متورم‌شونده، از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، سه‌محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی‌نشده و عکس‌های SEM استفاده شده است؛ که در ادامه، نتایج حاصل از آنها ارائه شده است:

- افزایش مقادیر سیمان از ۶ تا ۱۲ درصد، سبب بروز روند افزایش مقاومت نمونه‌های مقاومت فشاری محصورنشده و سه‌محوری شده است.



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌های سیمانی و سیمانی ژئولیتی بهینه پس از ۷ روز عمل‌آوری.



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌های سیمانی و سیمانی ژئولیتی بهینه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری.

- پارامترهای مقاومتی برشی (UU) نمونه‌های با درصد جایگزینی ۳۰٪ سیمان با زئولیت پس از ۷ روز عمل‌آوری نسبت به نمونه‌ی سیمانی کمتر بوده است. اما در نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی سیمانی - زئولیتی، پارامترهای UU، مقادیر بیشتری را نسبت به نمونه‌های سیمانی از خود نشان داده‌اند.
- افزایش فشار همه‌جانبه از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال سبب افزایش پارامترهای مقاومتی سه‌محوری شده است.
- تصاویر SEM بهبود ریزساختار نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت را نشان داده‌اند.
- پیشنهاد می‌شود جهت ادامه‌ی پژوهش‌ها در زمینه‌ی استفاده از زئولیت و سیمان، به انجام آزمون‌های دوام و دینامیکی تحت تأثیرالیاف و مدل‌سازی عددی پرداخته شود.

- در هر درصد مشخص سیمان، جایگزینی سیمان مصرفی با زئولیت و افزایش مقدار جایگزینی، سبب کاهش مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ روزه شده است.
- جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۳۰٪ پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، موجب افزایش محسوس مقاومت فشاری محصورنشده‌ی نمونه‌های سیمانی - زئولیتی و جایگزینی بیشتر از آن تا ۹۰٪، سبب کاهش چشمگیر مقاومت نمونه‌های مذکور شده است.
- افزودن مقدار سیمان موجب به وجود آمدن روندی افزایشی در پارامترهای مقاومتی برشی (UU) نمونه‌ها شده است. افزایش مقاومت نمونه‌های سیمانی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های ۷ روزه چشمگیر بوده است.

پانوشته‌ها

1. Methylene Blue
2. California bearing ratio
3. liquid limit
4. plastic limit
5. unconfined compression strength
6. chemical oxygen demand
7. plasticity index
8. unified classification system
9. Blaine
10. calcium-silicate-hydrate
11. calcium-aluminate-hydrate
12. secant modulus of elasticity

منابع (References)

1. Al-Rawas, A.A. and Goosen, M.F.A. "Expansive soils: recent advances in characterization and treatment", *T&F* (2006).
2. Mola-Abasi, H., Kordtabar, B. and Kordnaeij, A. "Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, **34**, pp. 1539-1551 (2016).
3. Gourley, C.S., Newill, D. and Schreiner, H.D. "Engineering characteristics of arid soils", *CRC Press* (1993).
4. Baroutkoub, S. and Rahimi, H. "Evaluating the reasons of concrete cover deterioration in Khouzestan province", *Uni. Tehran* (1374).
5. Khemissa, M. and Mahamedi, A. "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay", *Apply Clay Science*, **95**, pp. 104-110 (2014).
6. Mahedi, M., Cetin, B. and White, D.J. "Performance evaluation of cement and slag stabilized expansive soils", *Transportation Research Records*, **2672**, pp. 164-173 (2018).
7. MolaAbasi, H., Saberian, M. and Li, J. "Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented

sand using porosity and composition", *Construction and Building Materials*, **202**, pp. 784-795 (2019).

8. Mola-Abasi, H. and Shooshpasha, I. "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**(5), pp. 746-752 (2016).
9. Mola-Abasi, H., Kordtabar, B. and Kordnaeij, A. "Parameters controlling strength of zeolite-cement-sand mixture", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **11**(1), pp. 72-79 (2017).
10. Molaabasi, H., Semsani, S.N., Saberian, M. and et al. "Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro- and macro-level approach", *Journal of Cleaner Production*, **267**, p.122209 (2020).
11. Ahmadi, H., Hamid, S., Molaabasi, H. and et al. "The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils", *Construction and Building Materials*, **272**, p. 121630 (2021).
12. ShahriarKian, M.R., Kabiri, S. and Bayat, M. "Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil", *International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering*, **7**, pp. 1-11 (2021).
13. Djedid, A., Bekkouche, A. and Mamoune, S.M. "Identification and prediction of the swelling behavior of some soils from the tlemcen region of algeria", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **233**, pp. 69-77 (2001).
14. ASTM D422-63 (Reapproved), "Standard test method for particle-size analysis of soils", *ASTM International*, **63**. pp. 1-8 (2007).
15. ASTM D 4318-10, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", *ASTM International*, **04**, pp. 1-14 (2005).
16. ASTM D2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purpose (unified soil classification system)", *ASTM International*, **8**:1-12 (2011).DOI:10.1520/D2487-11.

17. ASTM D698 - 12, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", *ASTM International*, 3:1-13 (2012).DOI.orag/10.1520/D0698-12E01.1.

18. ASTM D2166, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", *ASTM International*, 13:1-7 (2013).DOI.orag/10.1520/D2166.

19. ASTM D2850, "Standard test Method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils", *ASTM International*, 5:1-7 (2007).

20. Sharma, A.K. and Sivapullaiah, P.V. "Ground granulated blast furnace slag amended fly Ash as an expansive soil stabilizer", *Soils and Foundations*, **56**(2), pp. 205-212 (2016).

21. Mola-Abasi, H. and Shooshpasha, I. "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**(5), pp. 746-752 (2016).

22. Izadpanah, S., Shooshpasha, I. and Hajiannia, A. "The impact of zeolite on mineralogy changes and compressive strength development of cement-treated sand mixtures through microstructure analysis", *Scientia Iranica*, **28-3**(3), pp. 1182-1194 (2020).

23. MolaAbasi, H. "The experimental evaluation of the behavior of babolsar sand stabilized with zeolite and cement", *Ph.D. Thesis*, Babol Noshirvani Uni. Tech (1395).