



ارزیابی تاثیر زئولیت و خرده لاستیک فرسوده بر تثبیت ماسه با سیمان

محمد سجاد سلطانی، مرتضی جیریایی شراهی*، مسعود عامل سخی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک، ماسه
زئولیت
زیست سازگار
خرده لاستیک
سیمان

خلاصه: تثبیت خاک، یکی از موضوعات مهم در ارتباط با بهسازی خاک‌های ضعیف در مهندسی ژئوتکنیک است. افزایش روز افزون پسماندهای لاستیکی و دپو آن‌ها از مشکلات زیست محیطی قابل توجه است. در مهندسی ژئوتکنیک می‌توان از این مواد پسماند در بهسازی خاک‌ها استفاده کرد. از طرف دیگر تولید سیمان باعث آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود. در صورتی که از مواد سیمانی طبیعی مانند زئولیت که منابع آن در ایران فراوان است، استفاده شود ضمن اقتصادی بودن باعث کمک به محیط زیست خواهد بود. در این تحقیق استفاده از خرده لاستیک و زئولیت به عنوان افزودنی در تثبیت خاک‌های ماسه‌ای با سیمان ارزیابی می‌شود. با این هدف، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی نمونه‌های با مقادیر مختلف سیمان ۶، ۸ و ۱۰٪ نسبت به وزن خشک نمونه و درصد‌های جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ زئولیت نسبت به سیمان و درصد‌های جایگزینی ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵٪ از خرده لاستیک به صورت گرانول لاستیکی نسبت به سیمان در عمل آوری ۲۸ روزه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که نه تنها با جایگزینی گرانول لاستیکی و زئولیت مقاومت کاهش نمی‌یابد بلکه می‌تواند باعث افزایش مقاومت نهایی به میزان حداکثر تا ۱۰۰٪ و همچنین کرنش پذیری نمونه‌ها تا حداکثر ۵۸٪ شود. نتایج نشان می‌دهد که خرده لاستیک‌ها باعث بهبود عملکرد تثبیت در حضور زئولیت می‌شود. تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نمونه‌ها پیوستگی و یکپارچگی تثبیت در اثر افزودنی زئولیت و خرده لاستیک را نشان داد. بهترین ترکیب اختلاط در تحقیق حاضر ۷/۵٪ خرده لاستیک به صورت گرانول و ۳۰٪ زئولیت جایگزین سیمان مشاهده می‌شود.

۱- مقدمه

می‌کنند. به عنوان مثال این مواد pH خاک و آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهند که باعث خوردگی سازه‌های مدفون در خاک می‌گردد. تثبیت خاک با این مواد، باعث می‌شود خاک رفتاری شکننده و ترد از خود نشان دهد که در مواقعی که خاک تحت بارهای دینامیکی قرار دارد می‌تواند خطر آفرین باشد. در حین فرآیند تولید این تثبیت کننده‌ها علاوه بر اینکه انرژی بسیاری مصرف می‌شود، مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای در جو رها می‌شوند که آسیب‌های زیست محیطی قابل توجهی را ایجاد می‌کنند [۷ و ۶ و ۲]. به منظور حل مشکلات تثبیت کننده‌های سنتی، باید به دنبال مواد و مصالحی بود که خصوصیات فنی خاک را بهبود ببخشد و باعث تخریب محیط زیست نشوند [۱۰-۸]. پژوهشگران بسیاری افزودنی‌های شیمیایی را مورد ارزیابی قرار دادند و به رغم اثر مثبت آن روی خصوصیات مهندسی خاک به دلیل قیمت بالا توجیه اقتصادی نداشته و استفاده از آن‌ها را به عنوان جایگزین تثبیت کننده‌های سنتی، محدود کرده است [۱۲ و ۱۱]. در سال‌های اخیر،

رشد جوامع بشری در سال‌های اخیر نیاز به ساخت و ضرورت توسعه‌ی زیرساخت‌ها را افزایش داده است. ساخت راه و راه ریلی، خاکریزها و دیگر سازه‌های خاکی روی بستر ضعیف مانند ماسه شل می‌تواند مشکلاتی نظیر نشست ناهمگن و ناپایداری را ایجاد کند. برای حل مشکل مذکور لازم است خاک بستر تثبیت و بهسازی شود. سیمان یکی از موثرترین روش‌های متداول بهبود کیفی مشخصات فنی خاک‌های ماسه‌ای است. پژوهش‌های بسیاری در مورد خواص تثبیت کننده‌های سنتی نظیر سیمان، آهک، خاکستر آتش‌فشانی و غیره انجام شده است که نشان داده‌اند افزودن این مواد به خاک باعث افزایش مقاومت و دوام خاک می‌شود [۴-۱]. مواد مذکور در پروژه‌های راهسازی، به منظور آماده‌سازی و تثبیت بستر راه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. اما استفاده از آن‌ها مشکلاتی در حوزه محیط زیست ایجاد

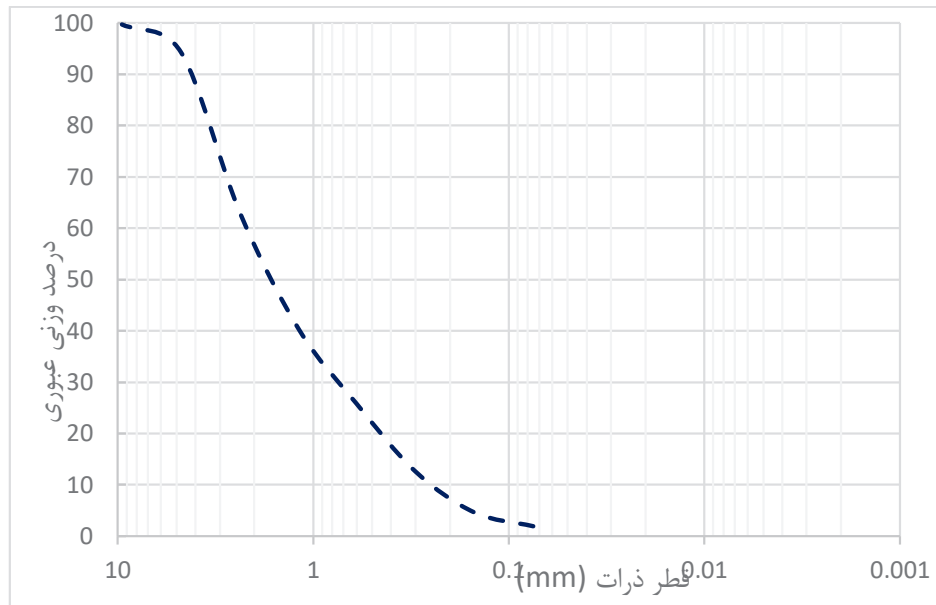
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jiryaei@qut.ac.ir



استفاده از مواد بازیافتی و دور ریز در مهندسی ژئوتکنیک به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از جمع آوری و نگهداری آن‌ها، توجه تعدادی از محققان را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال گیاهی و جیریایی استفاده از لیگنو سولفونات کلسیم را که پسماند صنعت کاغذ و تمبرسازی است، در تثبیت خاک‌ها با رویکرد زیست سازگار پیشنهاد کرده‌اند [۱۳]. مارتو و همکارانش [۱۴] با استفاده از ته خاکستر و موزامیر [۱۵] با استفاده از پلی‌پروپیلین ضایعاتی خرد شده، در ستون سنگی مقاومت برشی آن را بهبود بخشیدند. امروزه انباشته شدن تایرهای فرسوده در محل‌های دفن زباله، به مشکل زیست محیطی مهمی تبدیل شده و ضرورت استفاده مجدد از آن‌ها را در قالب کاربردهای جدیدتر افزایش می‌دهد. ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر مقاومت بالا، چگالی پایین، و مقاومت اصطکاکی بالا، تایرهای فرسوده را به عنوان یک منبع مهندسی با ارزش مورد توجه قرار داده است. از طرفی با توجه به خرابی‌های ایجاد شده در رویه‌های آسفالتی، در بسیاری موارد، این مصالح از سطح راه تراشیده شده و در صورت عدم استفاده مجدد در راه‌سازی، در اطراف راه دیو می‌شوند. این مواد ضایعاتی یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط زیست بوده و ذخیره و دیوی آن‌ها، سطح قابل توجهی از زمین‌های با ارزش را اشغال می‌کند. رویه‌های آسفالتی پس از تراشیده شدن، به خاطر داشتن بافت دانه‌ای می‌توانند به جای دانه‌های شن و ماسه در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران مورد استفاده مجدد قرار گیرند. مهندسی ژئوتکنیک دارای پتانسیل بالایی در به کارگیری مجدد این مصالح، به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی است [۱۶]. بیکدلی و جیریایی استفاده از تابر فرسوده و آسفالت تراشیده را به عنوان مصالح ستون سنگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عملکرد ستون سنگی محصور شده با لاستیک فرسوده که مصالح دانه‌ای آن را آسفالت تراشیده تشکیل می‌دهد رضایت بخش است [۱۶]. شیخ و همکاران رفتار برشی خاک ماسه‌ای ترکیب شده با خرده لاستیک فرسوده را با استفاده از آزمایش سه محوری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در اثر اضافه شدن خرده لاستیک به خاک تنش انحرافی کاهش، و کرنش متناظر با گسیختگی افزایش می‌یابد و خاک از حالت ترد شکنی خارج می‌شود [۱۷]. بارمان و همکاران استفاده از خرده تابر لاستیکی را بر مخلوط ماسه و خاکستر بادی مورد مطالعه قرار دادند که نتایج نشان داد استفاده از خرده لاستیک مقاومت را نسبت به ماسه خالص افزایش می‌دهد [۱۸].

از کانی‌های پر کاربرد که منابع آن در ایران فراوان یافت می‌شود ژئولیت است. ژئولیت‌ها آلومینوسیلیکات‌هایی کریستالی از فلزات قلیایی یا قلیایی

خاکی، مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم هستند که از ترکیب $[\text{SiO}_4]^{4-}$ $[\text{AlO}_4]^{4-}$ به وجود می‌آیند. این مواد در دامنه وسیعی از فرآیندهای مهم مانند جداسازی، تخلیص و تعویض یونی و یا به عنوان کاتالیزور در صنایع مختلف مانند صنعت نفت و شیمی کاربرد دارند. هر نوع ژئولیت بسته به نوع و کانی‌های تشکیل دهنده در زمینه‌های گوناگون مانند: الف) استفاده به عنوان کاتالیست در صنایع نفت و پتروشیمی ب) در صنایع آتش نشانی ج) در صنایع کشاورزی به عنوان حاصل خیز کننده و افزایش دهنده رطوبت خاک د) پاک‌سازی فاضلاب‌های شهری، صنعتی و هسته‌ای از آلاینده‌های مضر نظیر فلزات سنگین و سمی استفاده می‌شود. برای تثبیت و مقاوم‌سازی خاک‌ها از کلینوپتیلولیت استفاده می‌شود. با اینکه ژئولیت کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارد اما کاربرد آن در ژئوتکنیک خیلی کم مورد بررسی قرار گرفته است. الهه کریمداد و همکاران به مطالعه ویژگی‌های مهندسی مخلوط بنتونیت و ژئولیت برای استفاده در پوشش آب بند خاک چال‌ها و سدهای باطله پرداختند. آن‌ها نسبت اختلاط بنتونیت و ژئولیت برای استفاده به عنوان دیواره نفوذ ناپذیر را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۹]. تونچان و همکاران مشخصات مخلوط ژئولیت بنتونیت را از نظر پارامترهای مقاومتی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود نسبت‌های مختلفی از ژئولیت به بنتونیت را برای رسیدن به ایده آل‌ترین نسبت اختلاط انتخاب کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان عمل آوری هم مقاومت فشاری محصور نشده و هم پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده با ژئولیت و بنتونیت افزایش پیدا می‌کنند [۲۰]. گونش دمیرباتش تثبیت خاک‌های متورم شونده با استفاده از ژئولیت و آهک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش مقدار ژئولیت ذرات خاک به دلیل واکنش‌های پوزولانی درشت‌تر گردیدند، حد روانی و شاخص خمیری کاهش یافت و همچنین ترکیب بهینه برای کاهش پتانسیل خمیری خاک، ۱۰٪ ژئولیت مخلوط با ۵٪ آهک است [۲۱]. جعفرپور و همکاران استفاده از ژئولیت را به عنوان جایگزین درصدی از سیمان تزریق مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش وزن ژئولیت به جای سیمان تا ۵۰٪ مقاومت برشی افزایش یافت و همچنین با بیشتر شدن میزان ژئولیت به بیش از ۵۰٪ مقاومت برشی کاهش یافت [۲۲]. ایزد پناه و همکاران اثر ژئولیت بر خاک ماسه‌ای و کانی‌های ماسه تثبیت شده با سیمان و ژئولیت را با استفاده از آزمایش‌های XRD، تک محوری و همچنین تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ژئولیت باعث تقویت پیوند بین دانه‌ها نسبت به سیمان بدون ژئولیت می‌شود [۲۳].



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده

Fig. 1. Soil grain distribution curve

بر اساس سابقه تحقیق در نظر گرفته شده است [۲۷]. نتایج نشان داد که نه تنها با جایگزینی گرانول لاستیکی و ژئولیت مقاومت کاهش نمی‌یابد بلکه می‌تواند باعث افزایش مقاومت نهایی و کرنش پذیری نمونه‌ها شود. کرنش متناظر با تنش گسیختگی مقدار بسیار بیشتری در صورت استفاده از ژئولیت و خرده لاستیک در ترکیب، پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که خرده لاستیک‌ها باعث بهبود عملکرد تثبیت در حضور ژئولیت می‌شود. پیوستگی و یکپارچگی تثبیت در اثر افزودنی ژئولیت و خرده لاستیک به وضوح در تصاویر SEM قابل مشاهده است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بهترین ترکیب اختلاط ۷/۵٪ خرده لاستیک به صورت گرانول و ۳۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان مشاهده می‌شود.

۲- مواد و مصالح

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از قم شهرک شکوهیه تهیه شد. پس از خشک کردن خاک طبیعی در دمای اتاق و انجام آزمایش‌های دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C۱۳۶، تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸ و طبق طبقه بندی متحد ASTM D۲۴۸۷، خاک از نوع ماسه بدانه بندی شده طبقه بندی گردید. نمودار دانه بندی در شکل نشان داده شده است.

ملاعباسی و همکاران ژئولیت را به عنوان یکی از مواد افزودنی به سیمان و اثرات آن را بر مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت برشی و مقاومت کششی برزیلی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که جایگزینی ژئولیت به جای سیمان تا ۵۰٪ مقاومت برشی را افزایش می‌دهد [۲۴-۲۶].

در تحقیق حاضر استفاده از خرده لاستیک‌های دور ریز به صورت گرانول و همچنین ژئولیت به عنوان مواد جایگزین سیمان ارزیابی می‌شود. منابع ژئولیت در کشور فراوان است به خصوص در سمنان، دماوند، قم و دیگر مناطق. نوع ژئولیت در این پژوهش کلینوپتیلولیت که در واقع یک آلومینو سیلیکات سدیم و پتاسیم است و از معادن سمنان تهیه شده است، انتخاب شد. برای بررسی کارایی مواد مذکور و تاثیر آن‌ها بر تثبیت ماسه با سیمان از آزمایش‌های مقاومت تک محوری استفاده شده است. خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از قم شهرک شکوهیه تهیه شد. میزان آب افزودنی در تحقیق حاضر بر اساس درصد رطوبت بهینه آزمایش پراکتور در نظر گرفته شد. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی نمونه‌های با مقادیر مختلف سیمان و مقادیر جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ از ژئولیت نسبت به سیمان و مقادیر جایگزینی ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵٪ از خرده لاستیک به صورت گرانول لاستیکی نسبت به سیمان در عمل آوری ۲۸ روزه انجام شد. انتخاب این مقادیر از ژئولیت و گرانول

جدول ۱. مشخصات خاک ماسه‌ای

Table 1. Characteristics of sandy soil

پارامتر	مقدار	استاندارد
رطوبت طبیعی خاک (%)	۲	ASTM D2216
رطوبت بهینه (%)	۱۱/۱	ASTM D698
وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m ³)	۲۰/۱	ASTM D698
نوع خاک در طبقه‌بندی متحد	SP	ASTM D2487
چگالی جامد	۲/۶۶	ASTM D854

سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند ۲ که سیمانی رایج با زمان گیرش و گرمای هیدراتاسیون متوسط است. طبق استاندارد ملی شماره ۳۸۹ ایران به عنوان سیمانی جهت ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات به آن‌ها در حد متوسط باشد، تعریف شده است. تصویری از مواد مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

گرانول لاستیکی مورد استفاده دارای قطر ۰/۸ mm و چگالی جامد آن ۰/۸ با استفاده از آزمایش تعیین چگالی جامد (پیکنومتر) طبق استاندارد ASTM D۸۵۴ به دست آمد. لازم به ذکر است که گرانول لاستیکی طبق ASTM D۶۲۷۰-۰۸ دارای قطر ۴۲۵ μm تا ۱۲ mm است که از پودر لاستیکی درشت‌تر است. سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند ۲ که سیمانی رایج با زمان گیرش و گرمای هیدراتاسیون متوسط است. طبق استاندارد ملی شماره ۳۸۹ ایران به عنوان سیمانی جهت ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات به آن‌ها در حد متوسط باشد، تعریف شده است. تصویری از مواد مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی

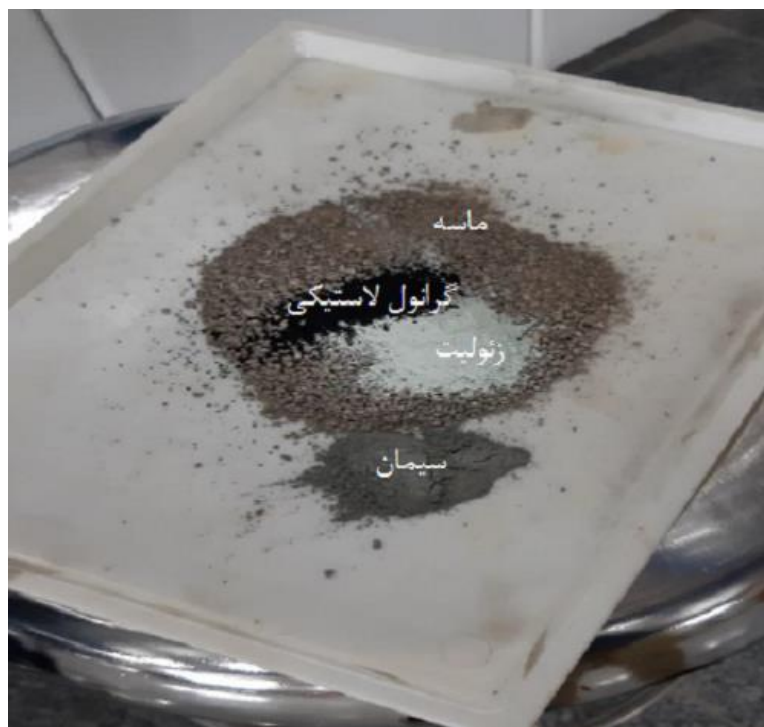
برای ساخت نمونه‌ها، مقادیر وزنی زئولیت و گرانول در این تحقیق با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده تعیین شدند. برای زئولیت مقادیر ۰، ۳۰،

نوع زئولیت در این پژوهش کلینوپتیلولیت که در واقع یک آلومینو سیلیکات سدیم و پتاسیم است و از معادن سمنان تهیه شده است، انتخاب شد. درصد جذب آب کلینوپتیلولیت مورد استفاده ۶۵٪ است. ترکیب شیمیایی خاک زئولیت مورد استفاده به دست آمده از آزمایش‌های آنالیز شیمیایی XRF و XRD مطابق با جدول ۲ است. گرانول لاستیکی مورد استفاده دارای قطر ۰/۸ mm و چگالی جامد آن ۰/۸ با استفاده از آزمایش تعیین چگالی جامد (پیکنومتر) طبق استاندارد ASTM D۸۵۴ به دست آمد. لازم به ذکر است که گرانول لاستیکی طبق ASTM D۶۲۷۰-۰۸ دارای قطر ۴۲۵ μm تا ۱۲ mm است که از پودر لاستیکی درشت‌تر است.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی زئولیت

Table 2. Chemical analysis of zeolite

SiO ₂	٪۷۲
CaO	٪۱/۵
Al ₂ O ₃	٪۱۱/۷
Fe ₂ O ₃	٪۱/۳
K ₂ O	٪۲/۷
Na ₂ O	٪۰/۶
L.O.I	٪۶/۷
دیگر	٪۳/۵

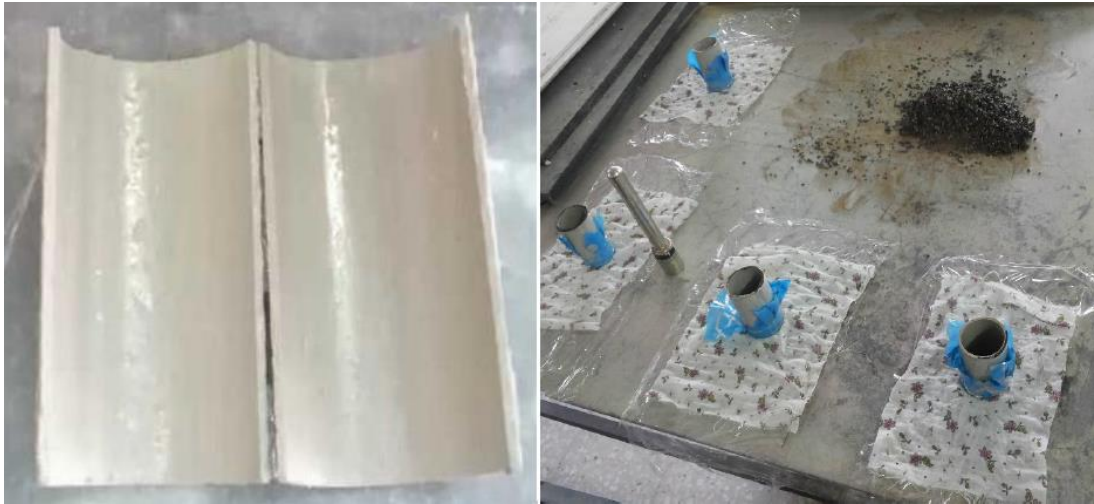


شکل ۲. تصویری از مواد مصرفی

Fig. 2. Used materials.

با استفاده از وزن مخصوص حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم و حجم قالب، وزن مخلوط خاک، آب و دیگر مواد افزودنی که باید پس از اختلاط در قالب کوبیده شوند به دست آمد. بنابراین آب مورد نیاز با توجه به رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم و مقدار گرانول، زئولیت و سیمان با توجه به درصد مورد نظر به راحتی محاسبه و مقداری از خاک که باید در قالب کوبیده شود تا تراکم به حداکثر وزن مخصوص برسد محاسبه می‌شود. سپس خاک در ۵ لایه‌ی یکسان ریخته شد و به صورت استاتیکی متراکم گردید. نحوه‌ی تراکم نمونه‌های تک محوری در ۵ لایه یکسان و کوبش استاتیکی با وزنه به تعداد ۲۵ ضربه برای هر لایه انجام شد. از آن جایی که اندازه ذرات خاک ماسه‌ای مورد استفاده بین ۲ تا ۲/۵ mm است، از قالب مخصوص آزمایش تک محوری نمی‌توان استفاده کرد. به همین منظور از لوله‌های PVC جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. اندازه ابعاد قالب‌های لوله پلیکا با قطر خارجی ۴۰ mm و قطر داخلی ۳۴ mm بوده که با ارتفاع ۷۰ mm بریده شده است. همچنین جهت سهولت در خارج کردن نمونه‌ها پس از عمل آوری، طبق شکل ۳ قالب‌ها به صورت عمودی نیز به دو قسمت تقسیم شده‌اند و با چند لایه چسب نواری به هم متصل شده‌اند. به منظور

۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ نسبت به وزن سیمان و برای گرانول مقادیر ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲٪ نسبت به وزن سیمان در نظر گرفته شده است. میزان آب افزودنی در تحقیق حاضر بر اساس درصد رطوبت بهینه آزمایش پراکتور در نظر گرفته شد. آزمایش تراکم پراکتور طبق استاندارد ASTM D۶۹۸ انجام شد. بر اساس نظریه پراکتور عوامل موثر در تراکم خاک، رطوبت، انرژی تراکم، دانه بندی ماسه، درصد ریزدانه و نوع آن می‌باشند. بدین منظور ابتدا خاک تثبیت نشده مورد آزمایش پراکتور قرار گرفت و سپس نمونه‌های مورد نظر تثبیت با درصدهای مختلف سیمان، زئولیت و گرانول لاستیکی پس از اختلاط، مورد آزمایش قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده ابتدا مقدار از پیش تعیین شده از ماسه، و گرانول، زئولیت و سیمان مخلوط شد و درست قبل از آزمایش تراکم مقدار آب مورد نیاز طبق استاندارد اضافه شده و برای رسیدن به نمونه‌ای همگن، مخلوط شد. قابل ذکر است که آب بدلیل واکنش‌های پوزولانی سیمان و زئولیت درست قبل از آزمایش، آخرین ماده ایست که اضافه و مخلوط می‌شود. ساخت نمونه‌ها به گونه‌ای انجام شد که حتی المقدور درصد رطوبت بهینه، وزن مخصوص خشک حداکثر و انرژی در واحد حجم نمونه‌ها با نتایج آزمایش تراکم پراکتور یکسان حاصل شود.



شکل ۳. تصویری از روند آماده‌سازی نمونه‌ها

Fig. 3. Sample preparation process

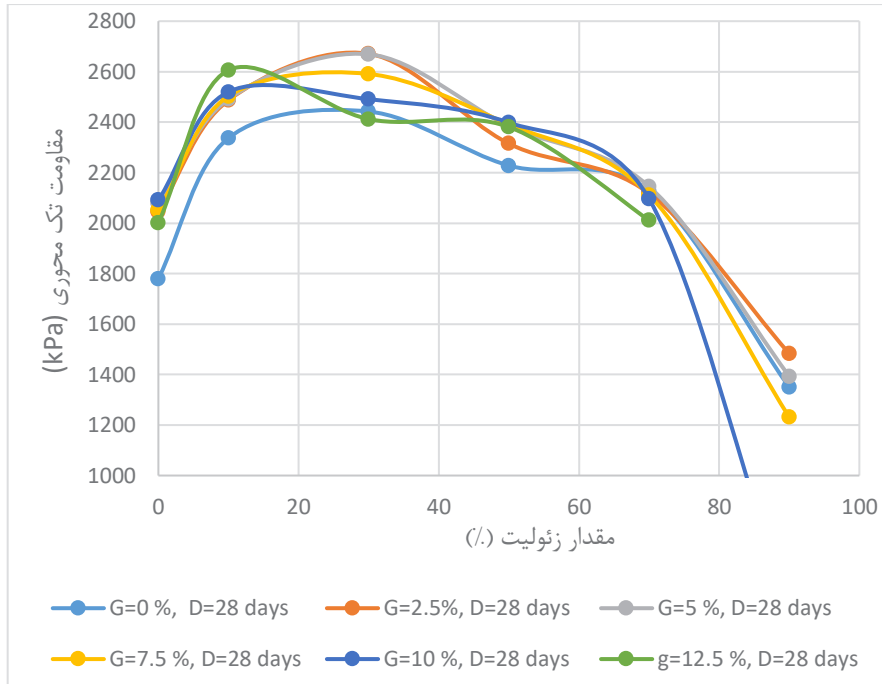


شکل ۴. تصویری از نمونه گسیخته شده پس از انجام آزمایش

Fig. 4. An image of the specimen after the test.

سپس آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D2166 بر روی آن‌ها انجام شد. هر آزمایش برای اطمینان از صحت نتایج سه بار تکرار شده است. تصویری از نمونه گسیخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در نهایت آزمون میکروسکوپ الکترونی (SEM) بر روی ۳ نمونه تثبیت نشده و تثبیت شده با سیمان به مقدار ۱۰٪، ژئولیت به مقدار ۳۰٪، و ۵٪ گرانول لاستیکی پس از ۲۸ روز عمل آوری در پلاستیک دو لایه محصور شده، انجام شد.

جلوگیری از خروج مصالح مورد استفاده در نمونه‌ها، انتهای آن‌ها با نایلون بسته شده است. برای عمل آوری مناسب نمونه‌ها قالب را با پارچه مرطوب پوشانده و جهت جلوگیری از تبخیر آب، روی قالب‌ها و پارچه‌های مرطوب با سلفون پوشیده شد. لازم به ذکر است پس از کوبیدن هر لایه سطح آن به اندازه ۳ mm خراشیده شد تا لایه‌ها از هم جدا نباشند و نمونه‌ای همگن به دست بیاید. مدت زمان عمل آوری برای هر نمونه ۲۸ روز در اتاقی با دمای کنترل شده، در نظر گرفته شد. پس از عمل آوری، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا حالتی خشک پیدا کنند.



شکل ۵. اثر افزودن زئولیت بر مقاومت تک محوری در نمونه‌های با ۶ درصد سیمان

Fig. 5. Effect of the zeolite on uniaxial strength in samples with 6% cement..

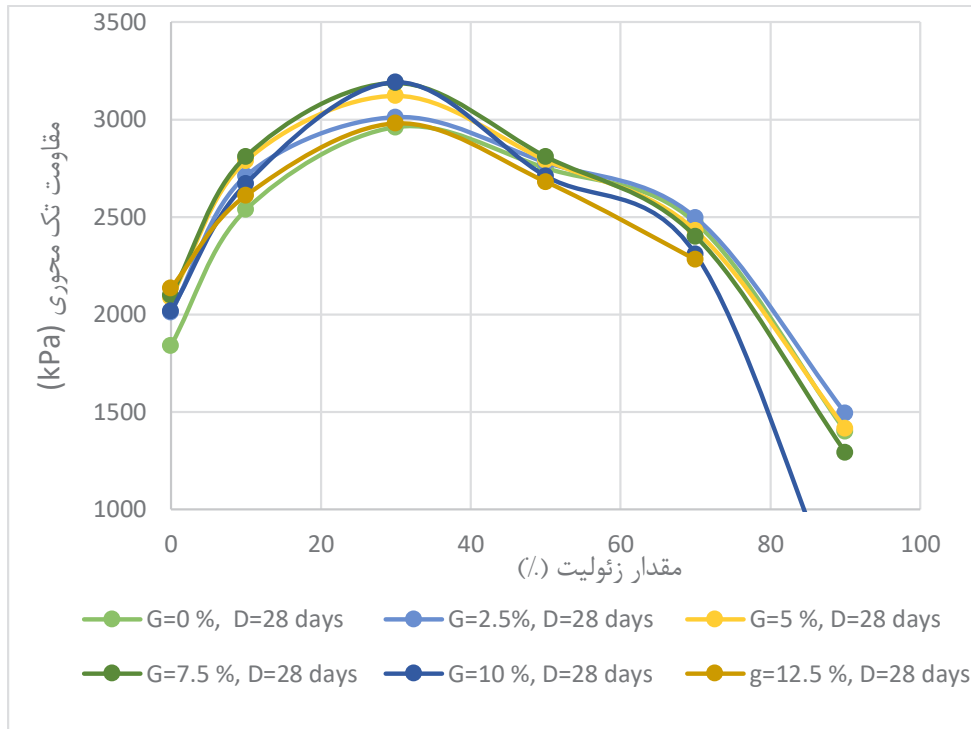
۴- نتایج و بحث

۴-۱- اثر زئولیت بر مقاومت تک محوری

شکل ۵ نشان دهنده اثر زئولیت بر مقاومت تک محوری تثبیت با ۶٪ سیمان، برای مقادیر مختلف زئولیت و گرانول لاستیکی است. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود اضافه شدن زئولیت تا ۳۰٪ در حالت سیمان به مقدار ۶٪ و گرانول به میزان ۵ یا ۲/۵٪، باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت تک محوری به مقدار ۳۰٪ شده است. قابل ذکر است که مقاومت نمونه‌های با گرانول ۷/۵٪ خیلی نزدیک به مقاومت نمونه‌های با ۵ یا ۲/۵٪ گرانول است. در نمونه‌های با ۶٪ سیمان کمترین مقاومت مربوط به نمونه‌های بدون ماده افزودنی است. زئولیت در حین هیدراتاسیون، به دلیل دارا بودن سیلیکات‌های آلومینیوم با سیمان به خوبی واکنش می‌دهد و باعث بهبود ساختار تثبیت می‌شود. از طرف دیگر گرانول لاستیکی کرنش‌های بالایی را قادر است تحمل نماید بنابراین در حین بارگذاری ذرات را بهم متصل نگه می‌دارد. در صورتی که مقدار زئولیت به مقدار زیاد به عنوان مثال ۹۰٪ افزایش یابد مقاومت افت چشمگیری خواهد داشت زیرا با افزایش مقدار زئولیت ظرفیت واکنش‌پذیری سیمان به پایان می‌رسد و زئولیت مازاد

به عنوان مواد اضافی باعث کاهش گیرش و مقاومت تثبیت می‌شود. مزیت زئولیت در واقع واکنش‌پذیری با سیمان در جهت افزایش مقاومت تثبیت است.

در شکل ۶ در صورتی که مقدار زئولیت در نمونه‌های با ۸٪ سیمان و ۷/۵٪ گرانول تا ۳۰٪ افزایش یابد مقاومت تک محوری به صورت چشمگیر تا ۵۸٪ افزایش می‌یابد. با توجه به شکل مقدار زئولیت در تثبیت با سیمان یک نقطه بهینه دارد به این معنی که با اضافه شدن مقدار زئولیت، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و با رسیدن به مقدار بهینه زئولیت (۳۰٪) مقاومت به حداکثر می‌رسد و در صورت افزایش مقدار زئولیت، مقاومت کاهش می‌یابد. زئولیت در واکنش‌های هیدراتاسیون آب و سیمان شرکت می‌کند و کیفیت این واکنش‌ها را افزایش می‌دهد. نکته‌ای که در واکنش‌های شیمیایی باید در نظر گرفت این است که مواد با مقادیر وزنی مشخص از هر ماده بهترین واکنش را می‌دهند و در صورتی که مقادیر وزنی رعایت نشود بازدهی واکنش کاهش می‌یابد. گرانول لاستیکی در واکنش شیمیایی شرکت نمی‌کند اما تاثیر گرانول به صورت فیزیکی و در حین عمل آوری و در هنگام بارگذاری مشاهده می‌شود.



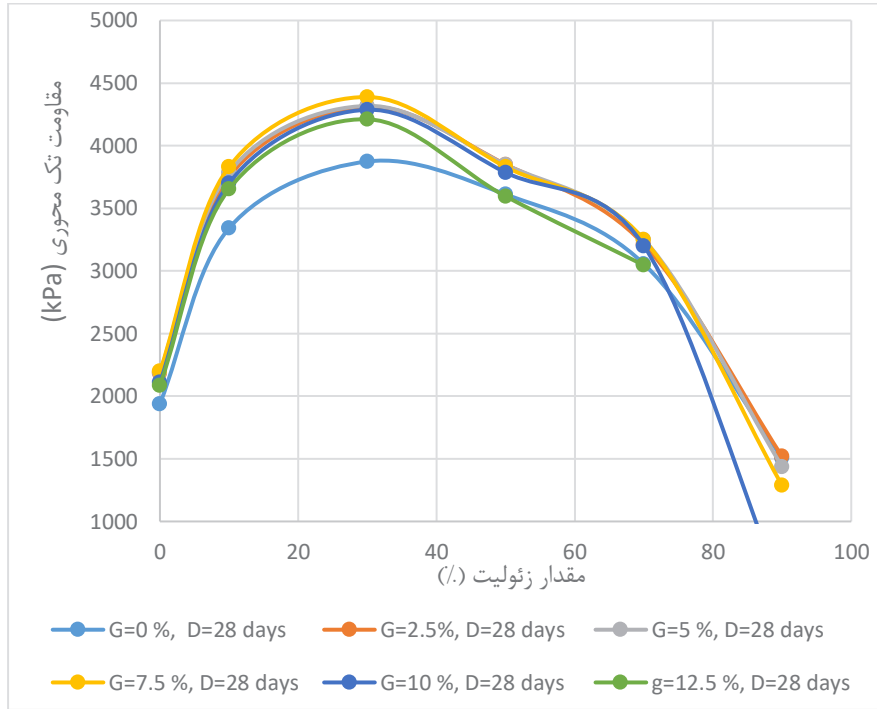
شکل ۶. اثر افزودن زئولیت بر مقاومت تک محوری در نمونه‌های با ۸ درصد سیمان

Fig. 6. Effect of the zeolite on uniaxial strength in samples with 8% cement.

به جای سیمان استفاده شود، از مقدار سیمان مصرفی کاسته می‌شود. بنابراین علاوه بر صرفه جویی اقتصادی، از لحاظ محیط زیست به دلیل کاهش مصرف سیمان، آلودگی‌های گازهای گلخانه‌ای کمتر خواهد شد.

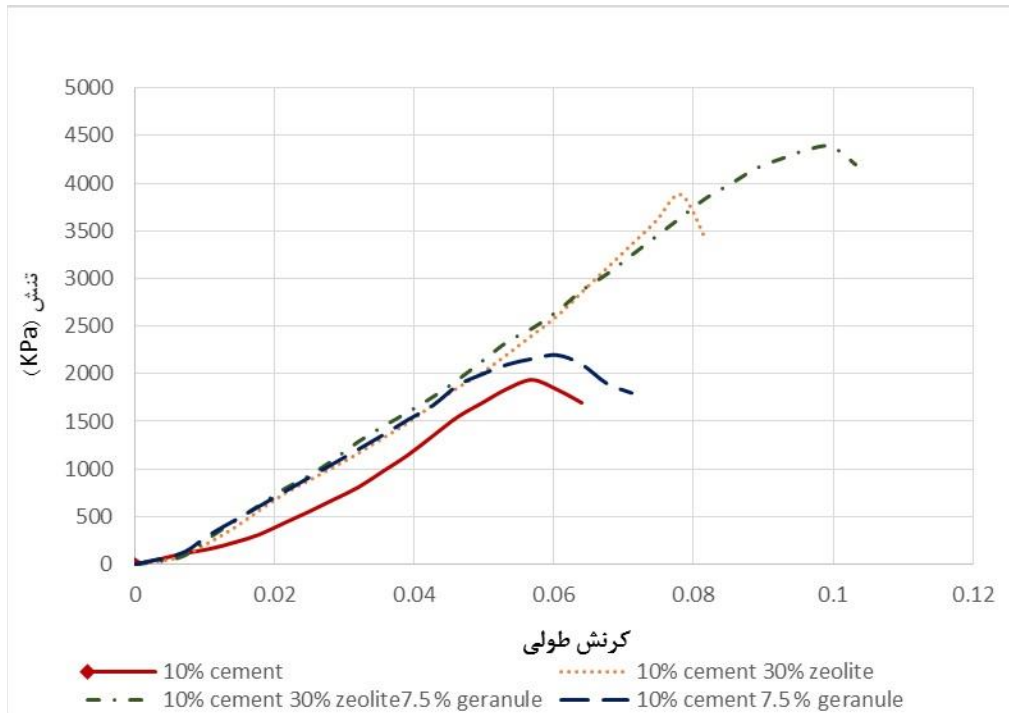
در شکل ۸ تاثیر زئولیت و گرانول لاستیکی بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های با ۱۰٪ سیمان به نمایش در آمده است. همانطور که به وضوح قابل مشاهده است زئولیت کرنش‌پذیری نمونه‌ها را به خصوص در تنش‌های بسیار بالاتر از مقاومت نمونه‌های بدون زئولیت، افزایش می‌دهد به طوری که با اضافه شدن زئولیت به ترکیب تثبیت در غیاب گرانول باعث افزایش کرنش متناظر با گسیختگی به میزان ۳۰٪ شده است. و نکته قابل تامل اینکه نمونه دارای زئولیت، تنش و کرنش متناظر با گسیختگی نمونه بدون زئولیت را به راحتی تحمل می‌کند و به مسیر تنش و کرنش در سطح بالاتری می‌رسد. اضافه شدن زئولیت به ترکیب دارای گرانول به میزان ۷/۵٪ باعث افزایش کرنش متناظر با گسیختگی به میزان قابل ملاحظه ۵۸٪ شده است. می‌توان علت این پدیده را به تاثیر واکنش‌های زئولیت بر ترکیب ارتباط داد که باعث پر شدن خلل و فرج تثبیت و پیوستگی آن شده است. شیب

شکل ۷ نشان دهنده اثر زئولیت بر مقاومت تک محوری تثبیت با ۱۰٪ سیمان، برای مقادیر مختلف زئولیت و گرانول لاستیکی است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود کمترین مقاومت مربوط به نمونه‌های بدون زئولیت و گرانول است که همین نکته موثر بودن زئولیت و گرانول لاستیکی را نشان می‌دهد. در مخلوط با ۱۰٪ سیمان، ۳۰ درصد زئولیت و ۷/۵٪ گرانول لاستیکی بیشترین مقاومت فشاری مشاهده می‌شود که در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه‌های بدون افزودنی تقریباً ۱۰۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. در واقع ۳۰ درصد زئولیت بهترین واکنش هیدراتاسیون را به همراه دارد. از طرف دیگر ۷/۵٪ گرانول لاستیکی بهترین عملکرد فیزیکی را دارد در واقع هم در هنگام عمل آوری نمونه‌ها و آزاد شدن حرارت هیدراتاسیون و هم در هنگام تحمل تنش و کرنش مانع از ترک خوردن نمونه‌ها می‌شود. در صورتی که مقدار زئولیت به مقدار زیاد به عنوان مثال ۹۰٪ افزایش باید مقاومت در اثر کاهش بازدهی واکنش و نبود سیمان به مقدار کافی، افت خواهد داشت. از شکل‌های ۵ تا ۷ به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در تثبیت با سیمان، مقدار بهینه زئولیت ۳۰٪ وزنی سیمان است. در صورتی که از زئولیت



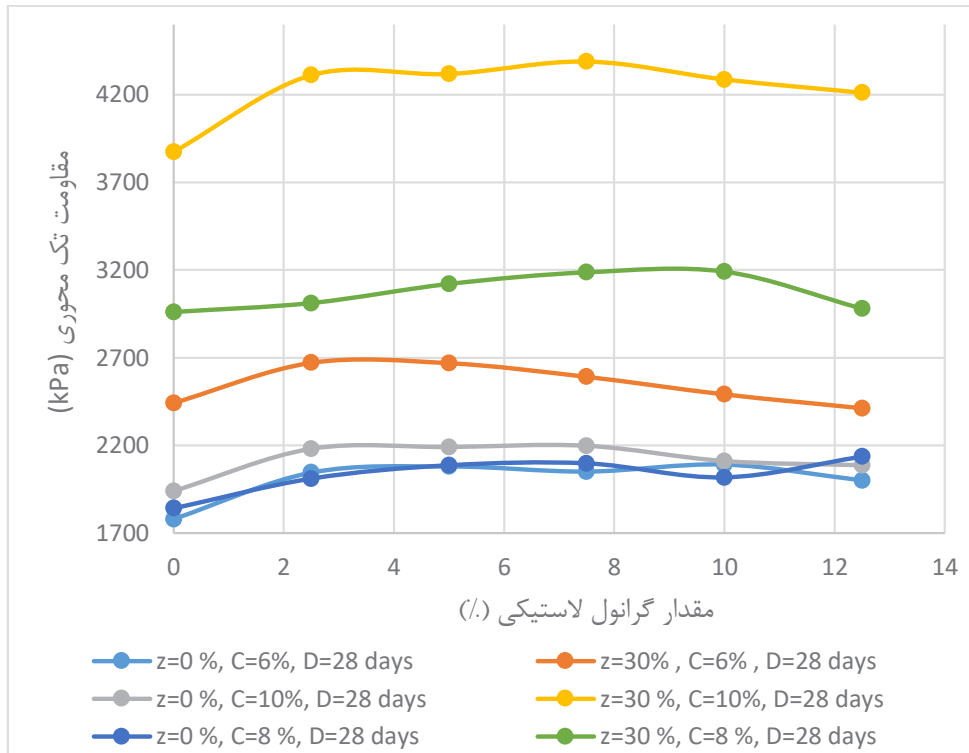
شکل ۷. اثر افزودن زئولیت بر مقاومت تک محوری در نمونه‌های با ۱۰ درصد سیمان

Fig.7. Effect of the zeolite on uniaxial strength in samples with 10% cement.t.



شکل ۸. تاثیر زئولیت و گرانول بر نمودارهای تنش - کرنش

Fig. 8. Effect of zeolite and granule on stress-strain behavior.



شکل ۹. اثر افزودن گرانول لاستیکی بر مقاومت تک محوری

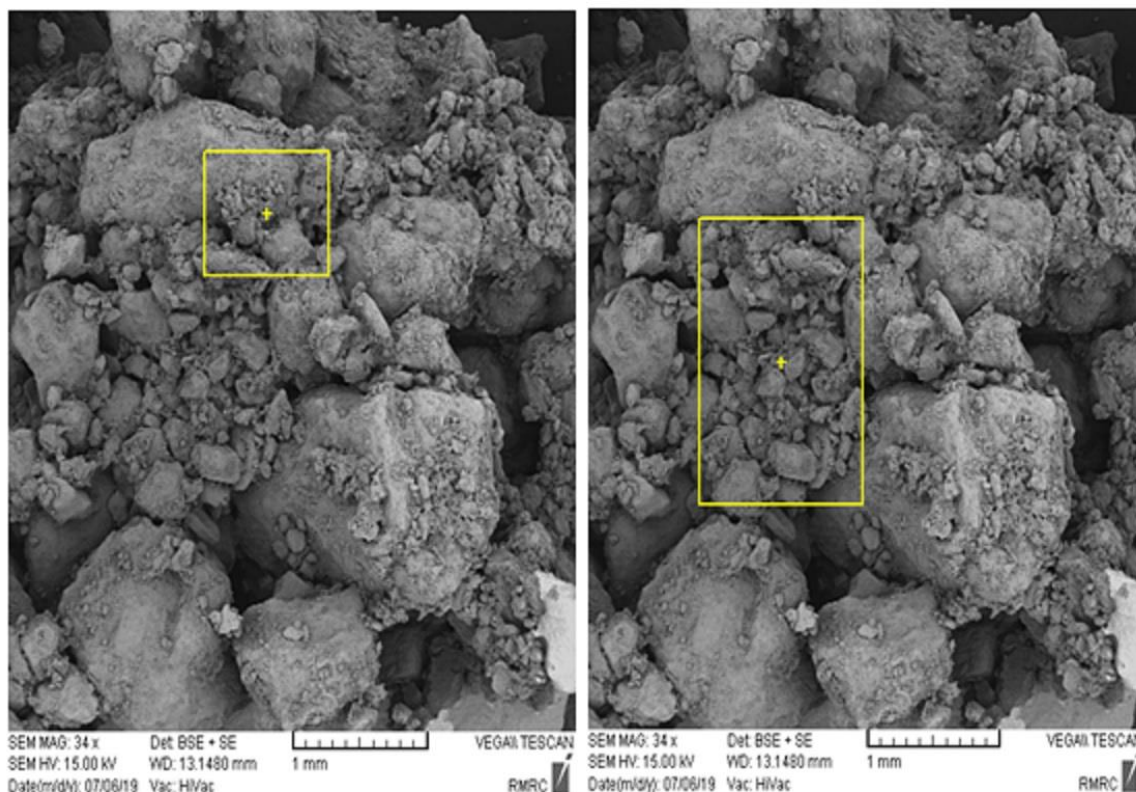
Fig. 9. Effect of rubber granules on uniaxial strength.

مشاهده است. در حالت کلی بر اساس مشاهدات شکل ۹ و همچنین شکل ۸ اگر در نظر باشد که یک مقدار مشخص از گرانول لاستیکی برای نمونه‌ها پیشنهاد شود می‌توان میزان بهینه گرانول لاستیکی را ۷/۵٪ مطرح کرد زیرا میزان ۷/۵٪ گرانول لاستیکی در اغلب نمونه‌ها بهینه است و تنها در نمونه‌های با ۶٪ سیمان و ۳۰٪ ژئولیت کاملاً بهینه نیست اما اختلاف اندکی با مقاومت نمونه کاملاً بهینه دارد. علت افزایش مقاومت تثبیت با اضافه شدن گرانول لاستیکی، خارج شدن از ترد شکنی، تغییر شکل‌پذیری آن تحت تنش‌های بالاتر بدون ایجاد ترک است. عملاً حضور خرده‌های لاستیک، انعطاف‌پذیری نمونه‌ها را افزایش داده است. باید توجه کرد که مطابق شکل ۸، افزایش مقاومت در اثر اضافه شدن گرانول مستلزم تغییر شکل بیشتری است. در واقع تغییر شکل‌پذیری هم در اثر اضافه کردن گرانول لاستیکی بیشتر می‌شود و هم در اثر اضافه شدن ژئولیت. این ویژگی در راه‌سازی حائز اهمیت است زیرا ترک‌های ایجاد شده در ساختار راه که همواره تحت تنش‌های هارمونیک است، کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که احتمالاً رفتار دینامیکی در اثر اضافه شدن ژئولیت و گرانول لاستیکی بهبود پیدا می‌کند.

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های دارای ژئولیت و گرانول در شکل ۸ بیشتر از شیب نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بدون مواد افزودنی است به دلیل اینکه واکنش‌های پوزولانی بیشتری نسبت به حالت بدون مواد افزودنی رخ می‌دهد و سختی افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که موادی مانند ژئولیت رفتار کاتالیزوری هم دارد و باعث می‌شود واکنش‌های شیمیایی پوزولانی بهتر و سریع‌تر انجام شود. افت ناگهانی پس از رسیدن نمودار تنش-کرنش به حداکثر مقاومت در نمونه‌های با ماده افزودنی احتمالاً به علت پیوستن ترک‌های ریز به یکدیگر و ترد شکنی است. این افت ناگهانی در نمونه‌های با خرده لاستیک کمتر است.

۴-۲- اثر گرانول لاستیکی بر مقاومت تک محوری

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با اضافه شدن گرانول از ۲/۵ تا ۱۰٪ مقاومت تک محوری نمونه‌ها تا حداکثر ۱۰ الی ۱۲٪ افزایش یافته است. در حضور ۳۰٪ ژئولیت میزان بهینه گرانول تغییر می‌یابد و در بازه ۲/۵ تا ۱۰٪ خواهد بود. این نتایج در شکل ۸ هم، برای نمونه‌های با ۱۰٪ سیمان قابل



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از خاک پایه.

Fig. 10. Electron microscope (SEM) image of the soil.

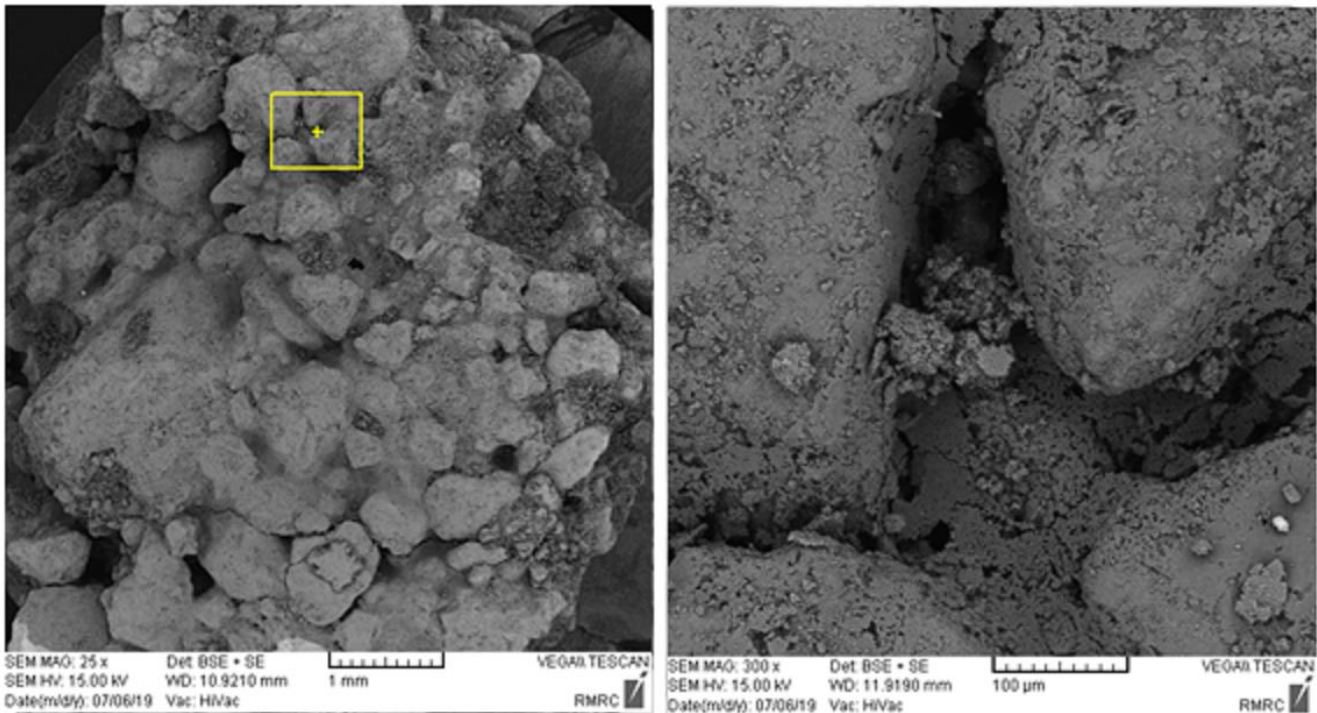
موجود دانه‌های مجزا کمتر شده است. اما با این حال باز هم ترکیب حاصل خلل و فرج بسیاری دارد و حتی در قسمت‌هایی که یکی از آن‌ها در شکل ۱۱ بزرگ‌نمایی شده است، پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها ضعیف است بنابراین احتمال ترک و گسترش آن در حین بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی وجود دارد.

با توجه به شکل ۱۲ با افزودن ۳۰٪ زئولیت به ترکیب، پر شدن بیشتر حفره‌های خاک پایه نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت در پی دارد و مرزهای موجود دانه‌های مجزا کمتر شده و بافت خاک توده‌ای‌تر از حالت قبل می‌باشد. به همین دلیل است که مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها در اثر اضافه شدن زئولیت افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود توده اطراف هر دانه در اثر واکنش هیدراتاسیون و تقویت آن با زئولیت بسیار قوی‌تر و متراکم‌تر شده است نسبت به حالت بدون زئولیت و در واقع پیوندهای قوی‌تری شکل گرفته است.

۴-۳- اثر زئولیت و گرانول لاستیکی بر مورفولوژی خاک

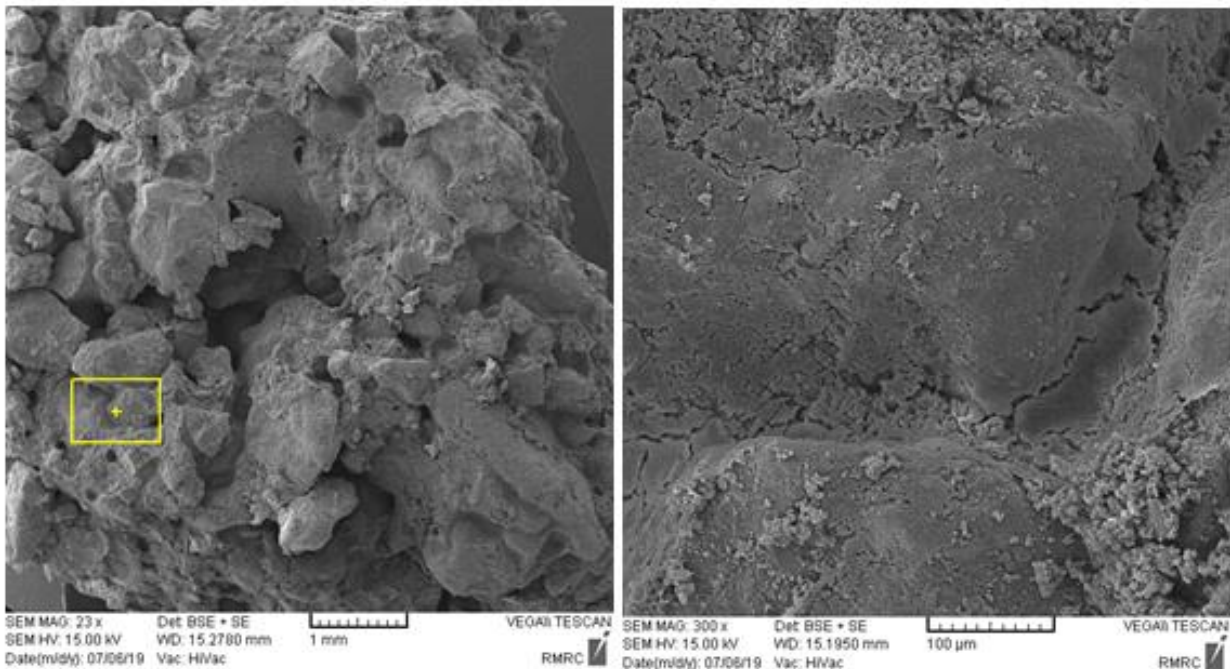
آزمون میکروسکوپ الکترونی به منظور بررسی تغییرات مورفولوژی تثبیت، در اثر افزودن زئولیت و خرده لاستیک، انجام شد. نمونه‌هایی از خاک پایه و تثبیت شده با درصد بهینه از افزودنی زئولیت ترکیب شدند و پس از ۲۸ روز عمل آوری به وسیله میکروسکوپ الکترونی SEM تصویر برداری شدند که نتایج آن در شکل‌های ۱۰-۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در خاک پایه خلل و فرج بسیاری وجود دارد. همچنین در این شکل ریزدانه‌های موجود در خاک دیده می‌شوند. ریز دانه‌هایی که دانه‌های درشت‌تر ماسه را احاطه کرده‌اند و به این ترتیب چسبندگی اندکی ایجاد می‌کنند با این حال تخلخل خاک ماسه‌ای قابل توجه است.

افزودن سیمان و آب به خاک پایه همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود باعث پر شدن نسبی خلل و فرج‌های خاک پایه شده و مرزهای



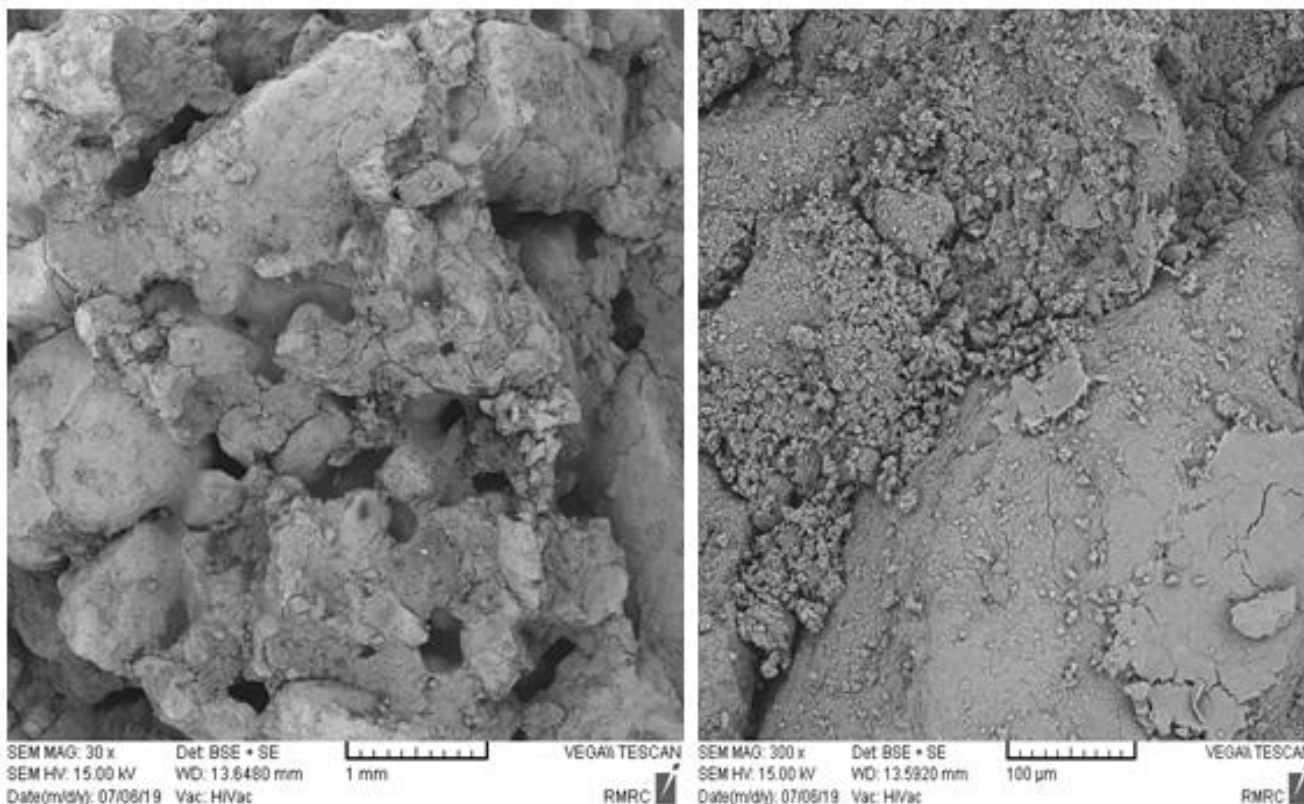
شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ترکیب خاک پایه و سیمان ۱۰٪.

Fig. 11. Electron microscope (SEM) image of soil stabilized with 10% cement.



شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ترکیب خاک پایه، سیمان ۱۰٪ و زئولیت ۳۰٪.

Fig. 12. Electron microscopy (SEM) image of the soil stabilized with 10% cement, 30% zeolite.



شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ترکیب خاک پایه، سیمان ۱۰٪، زئولیت ۳۰٪ و گرانول ۵ درصد.

Fig. 13. Electron microscopy (SEM) image of the soil stabilized with 10% cement, 30% zeolite and 5% granules.

و میکروسکوپ الکترونی مهم‌ترین تغییرات صورت گرفته در مقاومت تک محوری، کرنش‌پذیری و ساختار خاک به شرح زیر بیان می‌گردد:

- مقدار زئولیت در تثبیت با سیمان یک نقطه بهینه در همه حالات دارد به این معنی که با اضافه شدن مقدار زئولیت مقاومت افزایش می‌یابد و با رسیدن به مقدار بهینه مقاومت به حداکثر می‌رسد و در صورت افزایش مقدار زئولیت مقاومت کاهش می‌یابد. زئولیت در حین هیدراتاسیون به دلیل دارا بودن سیلیکات‌های آلومینیوم با سیمان به خوبی واکنش می‌دهد و باعث بهبود ساختار تثبیت می‌شود. با افزایش مقدار زئولیت ظرفیت واکنش‌پذیری سیمان به پایان می‌رسد و زئولیت مازاد به عنوان مواد اضافی باعث کاهش گیرش و مقاومت تثبیت می‌شود. مزیت زئولیت در واقع واکنش‌پذیری با سیمان در جهت افزایش مقاومت تثبیت است. با توجه به نتایج تحقیق حاضر مقدار بهینه زئولیت تثبیت با سیمان ۳۰٪ وزنی سیمان، مشاهده می‌شود. از طرف دیگر در صورت استفاده از زئولیت با کاهش مقدار سیمان مصرفی علاوه بر صرفه جویی اقتصادی از لحاظ محیط زیست با کاهش مصرف

مطابق با شکل ۱۳ با افزودن گرانول به ترکیب خاک پایه، سیمان و زئولیت حفره‌های بیشتری پر می‌شود و بافت خاک تغییر کرده و توده‌ای‌تر از حالت قبل در شکل ۱۲ دیده می‌شود. هر قدر که سیمان و به نسبت ۳۰٪ زئولیت بیشتر شود عملکرد در اثر توده‌ای شدن بهتر می‌شود و در این حالت گرانول لاستیکی هم تاثیر بهتری خواهد داشت. دلیل اینکه حفره‌ها کمتر شده و پیوستگی به خصوص در قسمتی که در شکل بزرگ‌نمایی شده است بیشتر شده است این است که در طول مدت گیرش که مخلوط تحت تنش‌های ناشی از حرارت هیدراتاسیون است این گرانول لاستیکی است که اجزای پیوند را متصل نگه می‌دارد و قادر است تنش‌ها و کرنش‌های مربوطه را تحمل نماید.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودن زئولیت و خرده لاستیک به ترکیب سیمان و خاک ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های تک محوری

مجزا کمتر شده و بافت خاک، توده‌ای‌تر می‌شود. به همین دلیل است که مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها در اثر اضافه شدن ژئولیت افزایش می‌یابد. با افزودن گرانول به ترکیب خاک پایه سیمان و ژئولیت، حفره‌های بیشتری پر می‌شود و بافت خاک تغییر کرده و توده‌ای‌تر از حالت قبل می‌باشد. هر قدر که سیمان و به نسبت ۳۰ درصد ژئولیت بیشتر شود عملکرد تثبیت در اثر توده‌ای شدن بهتر می‌شود و در این حالت گرانول لاستیکی هم تاثیر بهتری خواهد داشت. ضمناً اضافه کردن گرانول بیشتر از ۱۰ درصد جایگزین سیمان باعث بهتر شدن عملکرد نمی‌شود.

منابع

- [1] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4) (1996) 223-237.
- [2] A. Roohbakhshan, B. Kalantari, Stabilization of clayey soil with lime and waste stone powder, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(4) (2016) 429-438.
- [3] F. Sariosseiri, B. Muhunthan, Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, *Engineering Geology*, 104(1) (2009) 119-125.
- [4] P. Sherwood, Soil stabilization with cement and lime, Her Majesty Stationary Office, London, 1993.
- [5] F. Moghadasnejad, A. Modarres, Soil Stabilization with Waterproof Cement for Road Applications, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 42(1) (2010) 55-63.
- [6] B.M. Sunil, S. Nayak, S. Shrihari, Effect of pH on the geotechnical properties of laterite, *Engineering Geology*, 85(1) (2006) 197-203.
- [7] T. Zhang, G. Cai, S. Liu, A.J. Puppala, Engineering properties and microstructural characteristics of foundation silt stabilized by lignin-based industrial by-product, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(7) (2016) 2725-2736.
- [8] R.L. Santoni, J.S. Tingle, S.L. Webster, Stabilization of Silty Sand with Nontraditional Additives, *Transportation Research Record*, 1787(1) (2002) 61-70.
- [9] J.S. Tingle, R.L. Santoni, Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives, *Transportation Research*

سیمان، آلودگی‌های گازه‌ای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد.

- اضافه شدن ژئولیت تا ۳۰٪ در حالت سیمان به مقدار ۶٪ و گرانول به میزان ۵٪، باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت تک محوری به مقدار ۳۰٪ شده است. همچنین در صورتی که مقدار ژئولیت در نمونه‌های با ۸٪ سیمان و ۱۰٪ گرانول تا ۳۰٪ افزایش یابد مقاومت تک محوری به صورت چشمگیر تا ۵۸٪ افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های با ۱۰٪ سیمان و ۷/۵٪ گرانول، اضافه شدن ۳۰٪ ژئولیت مقاومت تک محوری را با بیش از ۱۰۰ درصد افزایش به تقریباً دو برابر می‌رساند. به طور کلی و با توجه به نتایج تحقیق حاضر، میزان بهینه برای ژئولیت ۳۰ درصد و برای گرانول ۷/۵ درصد پیشنهاد می‌شود.

- ژئولیت کرنش‌پذیری نمونه‌ها را به خصوص در تنش‌های بسیار بالاتر از مقاومت نمونه‌های بدون ژئولیت، افزایش می‌دهد به طوری که با اضافه شدن ژئولیت به ترکیب در غیاب گرانول باعث افزایش کرنش متناظر با گسیختگی به میزان ۳۰ درصد شده است. و نکته قابل تامل اینکه نمونه دارای ژئولیت تنش و کرنش متناظر با گسیختگی نمونه‌های بدون ژئولیت را به راحتی تحمل می‌کند و به مسیر تنش و کرنش در سطح بالاتری می‌رسد. اضافه شدن ژئولیت به ترکیب دارای گرانول به میزان ۷/۵ درصد باعث افزایش کرنش متناظر با گسیختگی به میزان قابل ملاحظه ۵۸ درصد شده است. می‌توان علت این پدیده را به تاثیر واکنش‌های ژئولیت بر ترکیب ارتباط داد که باعث پر شدن خلل و فرج تثبیت و پیوستگی آن شده است.

- با اضافه شدن گرانول از ۲/۵ تا ۱۰ درصد مقاومت تک محوری نمونه‌ها تا حداکثر ۱۲-۱۰ درصد افزایش یافته است. در حضور ۳۰ درصد ژئولیت میزان بهینه گرانول تغییر می‌یابد و در بازه ۲/۵ تا ۱۰ درصد خواهد بود. با این حال می‌توان با تقریب در حالت کلی میزان بهینه گرانول لاستیکی بر اساس مشاهدات تحقیق حاضر را ۷/۵ درصد پیشنهاد داد. علت افزایش مقاومت تثبیت اولاً در هنگام عمل آوری با سختی و مقاومتی که گرانول لاستیکی دارد از بروز ترک‌های ریز جلوگیری می‌کند و ثانیاً با اضافه شدن گرانول لاستیکی نمونه‌ها از حالت ترد شکنی خارج شده و تغییر شکل‌پذیری آن‌ها تحت تنش‌های بالاتر بیشتر می‌شود. عملاً حضور خرده‌های لاستیک انعطاف‌پذیری نمونه‌ها را افزایش داده است. باید توجه کرد که افزایش مقاومت در اثر اضافه شدن گرانول مستلزم تغییر شکل بیشتری است.

- در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده شد که با افزودن ۳۰ درصد ژئولیت به مخلوط خاک پایه و سیمان ۱۰ درصد، پر شدن بیشتر حفره‌ها نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت اتفاق می‌افتد و مرزهای موجود دانه‌های

- [19] E. Karimdad, M. Bashirgonbadi, E. Rahimi, A chemo-geotechnical approach to obtain optimal mixtures of zeolite-bentonite as heavy metal adsorbents, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2) (2021) 1193-1203.
- [20] A. Tuncan, M. Tuncan, H. Koyuncu, Y. Guney, Use of natural zeolites as a landfill liner, *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 21(1) (2003) 54-61.
- [21] G. Demirbas, Stabilization of expansive soils using Bigadiç zeolite (boron by-product), Middle East Technical University, 2009.
- [22] R.Z.M. P. Jafarpour, A. Kordnaeij, Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1) (2020) 149-159.
- [23] S. Izadpanah, I. Shooshpasha, A. Hajiannia, The impact of zeolite on mineralogy changes and compressive strength development of cement-treated sand mixtures through microstructure analysis, *Scientia Iranica*, (2020).
- [24] H. MolaAbasi, Evaluation of Zeolite Effect on Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement using Unconfined Compression Test, *Modares Civil Engineering journal*, 16(20) (2017) 203-213.
- [25] I. shooshpasha, m. abbasi, h. mola abbasi, Investigation of Zeolite and Cement on Compaction of Babolsar Sand, *Ferdowsi Civil Engineering*, 29(1) (2017) 69-78.
- [26] I. Shooshpasha, M. Abbasi, H. Molaabasi, The Effect of Zeolite on Shear Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49.1(94) (2019) 89-96.
- [27] N. Shariatmadari, S. Zeinali, H. Mirzaeifar, M. Keramati, Evaluating the effect of using shredded waste tire in the stone columns as an improvement technique, *Construction and Building Materials*, 176 (2018) 700-709.
- Record, 1819(1) (2003) 72-84.
- [10] J.S. Vinod, B. Indraratna, M.A.A. Mahamud, Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 163(1) (2010) 43-51.
- [11] A.H. H. Taherkhani, V. Sharifi Evaluating the use of CBR plus for Constructing the Pavement Layers from Stabilized Soils, *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 3(4) (2012) 339-347.
- [12] H. Taherkhani, Investigation and comparison of compressive strength of clay soils stablized by cement, lime and CBR plus, *Modares Civil Engineering journal*, 16(4) (2016) 161-174.
- [13] M. Jiryaei Sharahi, a. giah, B. Mohammadnezhad, soil stabilization with calcium lignosulfonate considering different mixing methods, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2020).
- [14] A. Marto, M. Hasan, M. Hyodo, A.M. Makhtar, Shear Strength Parameters and Consolidation of Clay Reinforced with Single and Group Bottom Ash Columns, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4) (2014) 2641-2654.
- [15] H. Muzamir, Y. Nuraini, N. Amirah, H.K.A. Mohammed, Strength of Soft Clay Reinforced with Group Crushed Polypropylene (PP) Columns, in, 2015.
- [16] H. Bikdeli, b. badarloo, A. Golabchifard, Experimental investigation of using reclaimed asphalt pavement aggregate in scrap tire encased stone column, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2020).
- [17] M.N. Sheikh, M.S. Mashiri, J.S. Vinod, H.-H. Tsang, Shear and Compressibility Behavior of Sand–Tire Crumb Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10) (2013) 1366-1374.
- [18] P. Barman, B. Singh, Strength Characteristics of Sand Amended with Two Waste Materials - Fly Ash and Scrap Tyre, *Environmental Processes*, 7(2) (2020) 653-672.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.S. Soltani, M. Jiryaei Sharahi, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 759-774.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19092.7064](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19092.7064)

