



تأثیر زیست محیطی افزودن زئولیت و خاکاره بر مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان

رضا یوسفی، امیرعباس عموی، عبدالرضا کریمی*، مسعود عامل سخی
گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

خاک ماسه‌ای
زئولیت
خاکاره
سیمان پرتلند
مقاومت فشاری تک محوری (UCS)

خلاصه: امروزه با گسترش شهرنشینی، احداث روسازی بر روی خاک بستر سست و ضعیف در برخی مناطق امری اجتناب ناپذیر است. یکی از روش‌های مرسوم و کم‌هزینه جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای، تثبیت آن به وسیله مصالحی مانند آهک و سیمان است. با توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید و مصرف سیمان، استفاده از آن همچنان در پروژه‌های عمرانی از ارکان اصلی به حساب می‌آید. از طرفی انباشت مواد زائد در محیط‌زیست و لزوم دفن آن‌ها در لندفیل‌ها یکی از مشکلات جامعه است. به همین دلیل این پژوهش به دنبال یافتن راه‌حلی برای کاهش مصرف سیمان و همچنین استفاده از مواد زائدی مانند خاکاره در بهسازی خاک است. به منظور بررسی تأثیر افزودن زئولیت و خاکاره بر مقاومت تک محوری (UCS) خاک ماسه‌ای، مقادیر ۴٪ وزنی سیمان، مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد پودر و الیاف خاکاره و مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد جایگزینی زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده شده است. طبق نتایج آزمایش تراکم با افزودن زئولیت و خاکاره، رطوبت بهینه خاک افزایش و وزن مخصوص خشک خاک کاهش یافته است. همچنین طبق نتایج آزمایش تک محوری، میزان بهینه جایگزینی زئولیت به جای سیمان در خاک ماسه‌ای، ۳۰٪ به دست آمده است و با افزایش میزان زئولیت، کرنش گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است. از طرفی مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزودن ۳٪ پودر خاکاره و ۱٪ الیاف خاکاره به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین کرنش گسیختگی نمونه‌ها با افزایش میزان خاکاره افزایش یافته است. نتایج آزمایش‌ها نشان از تأثیر بیشتر الیاف خاکاره نسبت به پودر خاکاره در بهسازی خاک بوده است.

۱- مقدمه

این است که مصرف انرژی تا سال ۲۰۵۰ میلادی بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد که بیشتر آن مربوط به کشورهای در حال توسعه است [۹-۶]. بنابراین ما باید به دنبال راهی برای کاهش مصرف انرژی در جهان باشیم. در همین حال، برخی از خاک‌های دانه‌ای به دلیل خواص مقاومتی ضعیف خود، همواره مشکل‌ساز بوده‌اند. یکی از ویژگی‌های اصلی خاک‌های یکنواخت، مقاومت و چسبندگی پایین آن‌ها است. برای تثبیت این نوع خاک، استفاده از روش‌های شیمیایی مانند افزودن سیمان که یکی از پرکاربردترین گزینه‌هایی است که مهندسان از آن استفاده می‌کنند [۱۰].

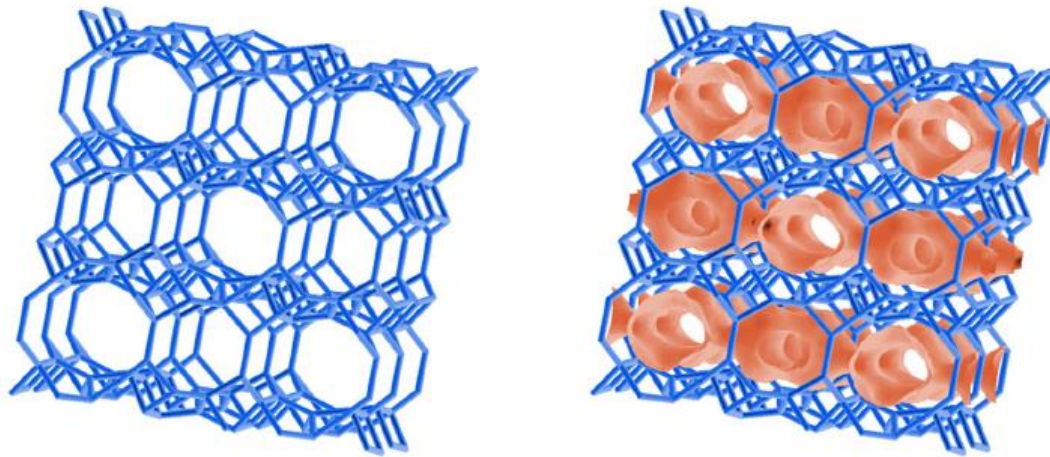
امروزه بسیاری از پروژه‌های عمرانی بخش قابل توجهی از منابع مالی خود را صرف اصلاح خاک می‌کنند. در عین حال، شرایط محیطی برای زندگی در مناطق شهری رو به وخامت است. همچنین مضر بودن روش‌های بهسازی و تثبیت شیمیایی مانند آهک و سیمان باعث ایجاد برخی مشکلات زیست محیطی مانند آلودگی خاک و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود [۱۲ و ۱۱].

ویژگی‌های خاک بستر، طراحی سازه‌ای سیستم روسازی بزرگراه‌ها را کنترل می‌کند. در ساخت بستر کارهای بزرگراهی، استفاده از انواع مواد طبیعی به دلیل ملاحظات فنی، اقتصادی و زیست محیطی عمدتاً اجتناب ناپذیر است. با توجه به هزینه و حجم بالای این پروژه‌ها، جایگزینی خاک سست بستر امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین بهسازی خاک بستر یک موضوع اساسی است. تثبیت و بهسازی خاک با استفاده از آهک، سیمان پرتلند و سایر مواد شیمیایی با این که یک راه حل موثر است اما مشکلات زیست محیطی را افزایش می‌دهد [۵-۱].

از طرفی استفاده بدون محدودیت از انرژی، محیط زیست را به خطر می‌اندازد و همچنین منابع طبیعی ما را از بین می‌برد. نتایج برخی از تحقیقات جدید حقیقی در مورد مصرف انرژی را روشن می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها

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





شکل ۱. ساختار زئولیت [۲۰]

Fig. 1. Structure of zeolite

زئولیت‌ها آلومینوسیلیکات‌هایی کریستالی از فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم هستند که از ترکیب $[AlO_4]^{5-}$ و $[SiO_4]^{4-}$ به وجود می‌آیند. ساختار زئولیت‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. زئولیت‌ها به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. یکی از نظریه‌هایی که در مورد شرایط و علت تشکیل زئولیت‌ها در طبیعت، ارائه شده این است که زئولیت‌ها اغلب در لایه‌های رسوبی، بعد از تشکیل و دفن رسوبات در اثر واکنش آلومینیم سیلیکات با آب حفره‌ها در درزها و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. تمامی کانی‌های زئولیت که تا به حال شناسایی شده‌اند، کانی‌های ثانویه بوده و از تخریب یا دگرسانی کانی‌های اولیه‌ای نظیر فلدسپات، رس‌ها و در نهایت از ژل‌های سیلیکاته طبیعی به وجود می‌آیند. معادله ۱ فرمول شیمیایی کلی زئولیت‌ها را بیان می‌کند؛ که در آن M^+ کاتیون‌های فلز قلیایی و M^{2+} کاتیون‌های قلیایی خاکی است [۱۹].



وجود اکسیدهایی مانند SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در زئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت باعث می‌شود که قابلیت انجام واکنش‌های شیمیایی را داشته باشد. واکنش‌های شیمیایی رخ داده باعث جدا شدن آهک (CaO) در زئولیت شده و با ایجاد ژل‌های سیمانی و پوزولانی متشکل از ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) ذرات

در حالی که صنعت سیمان مدرن‌ترین فناوری‌ها را برای کاهش آلودگی در پیش گرفته است، اما مراحل مختلف فرآیند تولید و حمل و نقل سیمان سهم زیادی در آلودگی محیط زیست دارند. مطالعات نشان می‌دهد برای تولید یک تن سیمان و کلینکر در ایران به ترتیب ۰/۶۵۵ و ۰/۷۹ تن گاز گلخانه‌ای CO_2 منتشر می‌شود [۱۳]. از نظر آماری تخمین زده می‌شود که صنعت سیمان، مسئول تقریباً ۷٪ از کل انتشار CO_2 در جهان است [۱۴]. از این رو 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. از این رو پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان مصرفی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند به عنوان یکی از بهترین راهکارها جهت حفاظت از محیط زیست 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. پوزولان‌هایی نظیر زئولیت 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 [۱۵-۱۸]. استفاده از زئولیت می‌تواند به عنوان یک ماده معدنی طبیعی برای بهسازی ماسه 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.

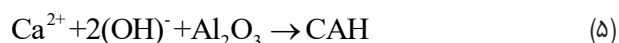
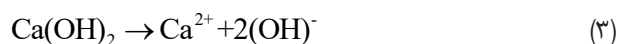
نانو آلومینا تاثیر بیشتری بر کاهش تورم نمونه‌های تثبیت شده دارد اما نانو سیلیس تاثیر بیشتری بر نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) داشته است [۲۵].
کردناییج و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تاثیر محلول سیمان و زئولیت بر مدول برشی کرنش کوچک (G_0) در ماسه پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که با جایگزینی مقدار ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان، مدول برشی کرنش کوچک خاک افزایش یافته و با جایگزینی بیشتر زئولیت، کاهش یافته است [۲۶].

جعفرپور و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی رفتار دوغاب سیمان و زئولیت بر مقاومت سه محوری خاک ماسه‌ای سست با تراکم نسبی ۳۰٪ مقادیر جایگزینی زئولیت ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد و نسبت آب به مواد سیمانی ۳، ۵ و ۷ پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که ماکزیمم تنش انحرافی نمونه‌های تزریق شده با جایگزینی ۵۰٪ زئولیت افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی مقاومت نمونه‌های تزریق شده با دوغاب سیمان و زئولیت با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی کاهش یافته است. علاوه بر این، با افزایش تنش وارد شده بر روی نمونه‌های تزریق شده از تنش تسلیم تا تنش ماکزیمم، به دلیل شکستگی پیوند، اثر چسبندگی بر مقاومت برشی به تدریج کاهش می‌یابد، در حالی که اثر زاویه اصطکاک ۴۰٪ افزایش یافته است [۲۷].

ملاعباسی و همکاران (۲۰۱۹) به تثبیت خاک ماسه‌ای با سیمان و زئولیت پرداختند. آن‌ها مقادیر سیمان ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد و زئولیت ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد جایگزینی سیمان را برای بهسازی خاک بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی در نمونه‌های تثبیت شده نشان داده است که مقدار بهینه جایگزینی زئولیت به جای سیمان، ۳۰٪ بوده است و با افزایش درصد سیمان، مقادیر بالاتری از مقاومت به دست آمده است [۲۸].

ملاعباسی و همکاران (۲۰۱۸) با در نظر گرفتن مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان، ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد جایگزینی زئولیت، نسبت تخلخل و همچنین نسبت ذرات SiO_2 و Al_2O_3 به تثبیت خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی بر روی خاک، نشان داده است که نمونه‌های تثبیت شده با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان، مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده داشته‌اند. همچنین با افزایش میزان سیمان و تخلخل نمونه‌ها، کارایی و اثربخشی استفاده از زئولیت افزایش یافته است. از طرفی با افزایش درصد اکسیدهای موجود در زئولیت و به عبارتی ذرات فعال در واکنش‌های پوزولانی و تولید

خاک را متصل کرده و باعث افزایش مقاومت و سختی ذرات خاک می‌شود. معادلات (۲) تا (۵) نحوه انجام این واکنش‌ها را نشان می‌دهد [۲۲ و ۲۱].



فرش‌یاف و همکاران (۲۰۲۲) جهت ساخت خاکریز با دوام در هوای سرد از اختلاط شن و ماسه سیمانی (CSG) با مقادیر ۵/۷، ۱۰ و ۱۲/۵ درصد سیمان به طور تجربی استفاده نمودند. نتایج آزمایش نشان داده است که حتی اگر مشخصات تراکمی همه طرح‌های اختلاط، به میزان قابل توجهی به مقدار سیمان بستگی نداشته باشد، با این حال مقدار سیمان در اختلاط به طور قابل توجهی بر مقاومت فشاری، سختی و نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد [۲۳].

چنگ^۱ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تاثیر نفوذپذیری ماسه سنگ پیشا (Pisha) و چرخه‌های ذوب و یخ پرداختند. برای این منظور از سیمان برای جلوگیری از ریزش این خاک در آب استفاده شده است. بر اساس نتایج تجربی، یک رابطه بین حداکثر تنش اصلی و تعداد چرخه‌های ذوب و یخ تحت فشارهای محدود متفاوت ایجاد شد. این رابطه را می‌توان با معیار گسیختگی Mohr-Coulomb برای پیش‌بینی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه سنگ پیشا تحت تعداد متفاوتی از چرخه‌های ذوب و یخ ترکیب کرد [۲۴].

علی‌پور و همکاران (۲۰۲۲) تاثیر افزودنی‌های نانو سیلیس و نانو آلومینا بر خاک مارن تبریز را بررسی نمودند. با توجه به تغییر حجم این خاک، ناپایداری در آن امری اجتناب‌ناپذیر است. نتایج آزمایش نشان داده است که

تورم و نرخ تورم و همچنین بررسی اثر بهسازی بر درصد تورم و نرخ تورم خاک با تثبیت هر نوع سیلیکات آبدار بیگادیج بوده است [۳۷].

علاوه بر مشکلاتی که سیمان برای محیط زیست ایجاد می‌کند یکی دیگر از مهم‌ترین معضلات جامعه امروز، انباشت مواد زائد از محصولات مختلف است. یکی از راه‌حل‌های رفع این مشکل استفاده مجدد از این مواد زائد است که می‌تواند به عنوان مواد افزودنی در بهبود خصوصیات مهندسی خاک استفاده شوند. یکی از این مواد زائد، خاکاره است که محصول جانبی و پسماند حاصل از عملیات کار با چوب مانند اره کردن چوب می‌باشد. خاکاره کاربردهایی مانند استفاده در ساخت خمیر چوب و یا زغال چوب دارد. در کارخانجات چوب‌بری از این خاکاره‌های تولیدی به عنوان سوخت برای عملیات آسیاب کردن استفاده می‌شود. از خاکاره می‌توان در کشاورزی، ساخت بتن و یا در بهسازی خاک استفاده کرد [۳۸ و ۳۹]. به همین دلیل، بسیاری از محققان در مورد تأثیر خاکاره بر خصوصیات مهندسی خاک تحقیق کرده‌اند که این امر تأثیر بسزایی در خواص خاک داشته است. پژوهش‌های پیشین این مسئله را روشن نموده است که خاکاره اصطکاک بین دانه‌های خاک را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. از آن‌جا که خاکاره به عنوان یک جزء طبیعی از چوب، هیچ‌گونه افزودنی غیرطبیعی ندارد بنابراین با خاک سازگار است و آلودگی برای محیط زیست ندارد [۴۰].

تدین و دبیری (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر خاکاره با مقادیر وزنی ۳، ۶ و ۹ درصد بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که افزودن ۳٪ خاکاره منجر به افزایش مقاومت، ظرفیت باربری و تراکم‌پذیری و کاهش نسبت تخلخل، جذب آب و نشست شده است [۴۱].

راکش^۴ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به بررسی تثبیت خاک Black Cotton که خاکی بسیار ضعیف و دارای ذرات بسیار ریزی (حدود ۸۵ تا ۱۰۰ درصد رس) است پرداخته‌اند. این خاک تغییرات حجمی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصد از خود نشان می‌دهد و فشار تورمی آن تا حدود ۹۸۰ kPa می‌رسد. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که با افزودن ۲٪ سیمان به همراه ۱٪ خاکاره به خاک، حد روانی حدود ۳/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین ظرفیت باربری (CBR) حدود ۴/۶ برابر و مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها ۲/۱ برابر شده است [۴۲].

زل‌های سیمانی، فرآیند هیدراسیون تسریع شده و منجر به بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک خواهد شد [۲۹].

عباسی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر ژئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداختند. نتایج این بررسی نشان داده است که با جایگزینی ۳۰ درصد ژئولیت به جای سیمان، افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت قابل دستیابی است [۳۰ و ۳۱].

عباسی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر جایگزینی ژئولیت در نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداختند. آن‌ها برای رسیدن به این هدف از آزمایش‌های برش مستقیم استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که با جایگزینی ۵۰ درصد ژئولیت به جای سیمان، مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت به میزان ۶۲ درصد همراه با افزایش کرنش گسیختگی، افزایش یافته است [۳۲].

ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر جایگزینی ژئولیت با سیمان در نمونه‌های خاک ماسه‌ای بابل‌سر پرداختند. آن‌ها از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی ۳۰ درصد ژئولیت به جای سیمان نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت، مقاومت فشاری تک محوری به میزان ۲۰ تا ۷۸ درصد افزایش یافته است [۳۳ و ۳۴].

هونگ^۱ (۲۰۱۵) به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی اختلاط ماسه و ژئولیت، با درصدهای وزنی مختلف ژئولیت ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد پرداخته است. نتایج آزمایش در مورد تراکم نشان داد که با افزایش نسبت وزنی ژئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه تمایل به افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم تمایل به کاهش دارد [۳۵].

شی^۲ (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر جایگزینی ژئولیت به جای سیمان (با نسبت ژئولیت به سیمان ۱ به ۹) در خاک رس سیلتی و شن ماسه‌دار پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که بالاترین میزان مقاومت تک محوری مربوط به جایگزینی ۱۰٪ ژئولیت و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز بوده است [۳۶].

در مطالعه‌ای توسط دمیرباس^۳ (۲۰۰۹) به بررسی تثبیت خاک‌های متورم شونده با استفاده از ژئولیت بیگادیج و آهک پرداخته شده است. هدف از این مطالعه تجربی، بررسی اثرات ژئولیت بیگادیج و آهک و مخلوط این دو ماده بر روی برخی خواص خاک از جمله حدود اتربرگ، توزیع اندازه دانه‌ها، درصد

1 Hong
2 Shi
3 Demirbas

ژئوتکنیکی خاک و ارزان بودن باعث جلوگیری از انباشت چنین مواد زائدی در محیط زیست خواهد شد. از آنجایی که اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه افزودن زئولیت و خاکاره به صورت جداگانه بر روی خاک‌های ریزدانه انجام شده است و منجر به تاثیر مطلوبی در خصوصیات ژئوتکنیکی این خاک‌ها شده است. پژوهش حاضر به بررسی تاثیر هم‌زمان زئولیت و خاکاره بر مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی تاثیر زئولیت و خاکاره بر مقاومت تک محوری (UCS) خاک ماسه‌ای، مقادیر سیمان، زئولیت، خاکاره، دانه‌بندی خاکاره و همچنین زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته و در مجموع تعداد ۸۷ آزمایش مقاومت تک محوری انجام شده است. به منظور بهسازی خاک ماسه خوب دانه‌بندی (SW) از مقادیر ۴ درصد وزنی سیمان، مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان و مقادیر ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی سیمان خاکاره با دو نوع پودری و الیافی در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده شده است. در شکل ۲ برنامه آزمایشگاهی انجام شده و طرح اختلاط نمونه‌ها گردآوری شده است.

۳- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک ماسه‌ای، سیمان، زئولیت و خاکاره می‌باشد.

۳-۱- خاک ماسه‌ای

در این پژوهش از خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده (SW) استفاده شده است. دانه‌بندی این خاک، غیریکنواخت و با متوسط اندازه ذرات $1/18 \text{ mm}$ که از کارخانه آسفالتی واقع در شهرک شکوهیه قم برداشت شده است. مشخصات فیزیکی این خاک در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی آن، در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه نيزار قم مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق [۵۲] ASTM C150 این نوع سیمان به عنوان پرتلند اصلاح شده جهت ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت داشته و حمله سولفات در حد متوسط باشد تعریف شده است. سطح ویژه این سیمان 3081 gr/cm^2 می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی تهیه شده از کارخانه در جدول ۲ آمده است.

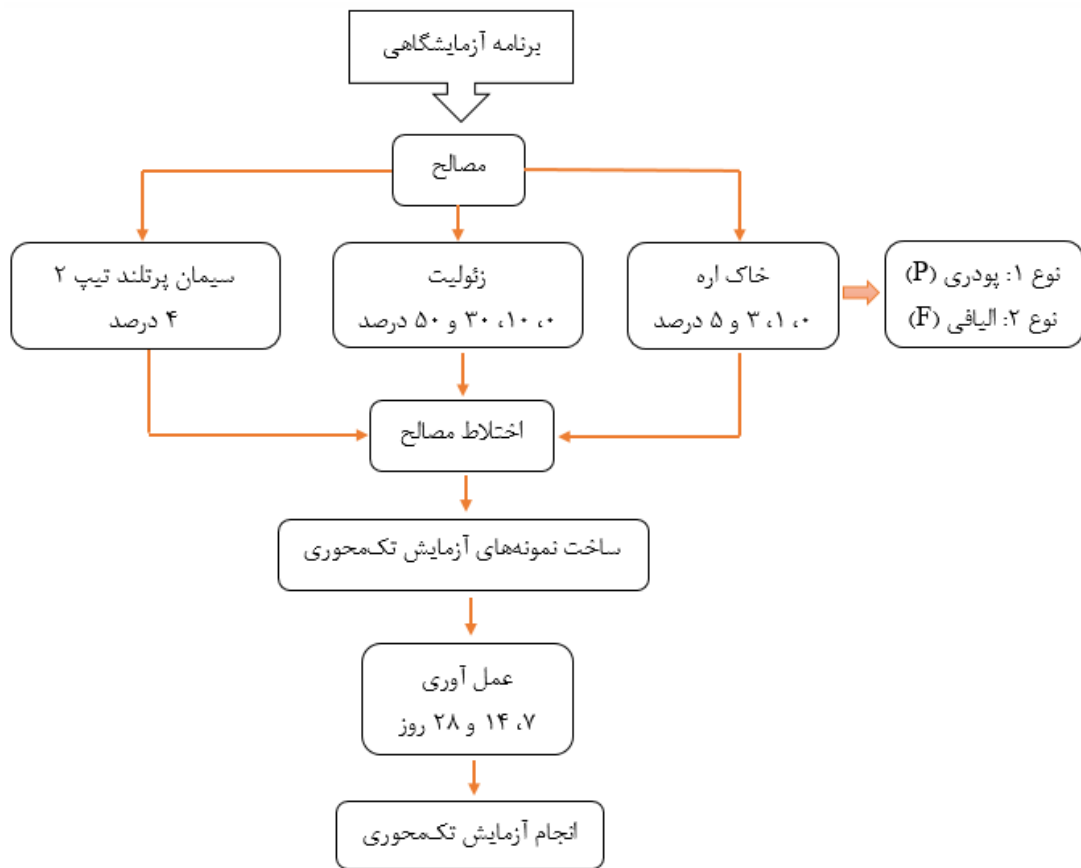
کومار^۱ و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تاثیر خاکاره بر بهسازی خاک رس قرمز (Laterite) و همچنین تغییرات وزن مخصوص خشک خاک و مقاومت برشی پرداخته‌اند. برای بهسازی این خاک از مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد خاکاره استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که با افزودن ۴٪ خاکاره، مقاومت برشی خاک افزایش و بعد از آن کاهش یافته است. همچنین افزودن خاکاره باعث کاهش وزن مخصوص خاک شده است [۴۳].

اویمی^۲ (۲۰۲۱) تاثیر افزودن خاکاره بر خاک Laterite را بررسی نمود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن ۱۵ درصد وزنی خاکاره به این خاک، مقاومت تک محوری ۷/۵ درصد افزایش یافته است [۴۴].

عبدالحلیم^۳ و البارودی^۴ (۲۰۱۴) از مقادیر ۰، ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خاک اریه برای بهسازی خصوصیات خاک رس استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته، جمع شدگی و همچنین عرض ترک خوردگی به شدت کاهش یافته است [۴۵].

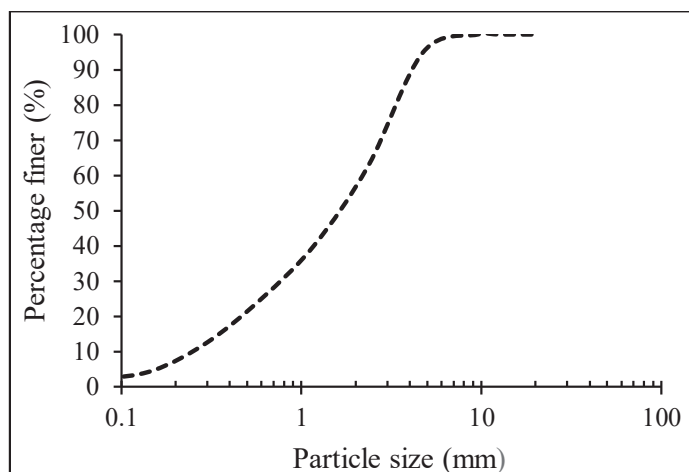
جهت رسیدن به یک مقاومت مشخص، استفاده از زئولیت می‌تواند ضمن رسیدن به مقاومت مورد نظر تا حد قابل قبولی مصرف سیمان را کاهش، و به دنبال آن اثرات جبران ناپذیر زیست‌محیطی تولید سیمان را کاهش دهد. از سوی دیگر استفاده از زئولیت به عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان در ایران با وجود معادن زئولیت به خصوص در استان سمنان و با قیمت حدود ۴۵۰۰ تومان در بیشترین حالت و معادل ۰/۱۸ دلار به ازای هر کیلوگرم و جایگزینی آن با درصدی از سیمان با قیمت حدود ۴۳۶ تومان در بیشترین حالت و معادل ۰/۱۷ دلار به ازای هر کیلوگرم، می‌تواند برای بهسازی ماسه با سیمان، مناسب باشد. در نگاه اول شاید استفاده از زئولیت مقرون به صرفه نباشد ولی اگر تاثیرات بلند مدتی که کاهش مصرف سیمان و استفاده از زئولیت بر محیط‌زیست دارد را در نظر بگیریم؛ این جایگزینی بسیار به صرفه است و ضمن کاهش هزینه‌های ناشی از تولید و مصرف سیمان، باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌هایی که کشورها برای مقابله و کاهش اثرات این گازها می‌کنند نیز می‌شود. از آنجا که زئولیت دارای وزن مخصوص کمتری از سیمان است، بنابراین از لحاظ وزنی باید مقادیر بیشتری نسبت به سیمان استفاده شود و در نتیجه هزینه‌های جابه‌جایی و حمل و نقل کمتری خواهد داشت. از طرفی استفاده از خاکاره علاوه بر بهبود خصوصیات

- 1 Kumar
- 2 Owoyemi
- 3 Abd Elhalim
- 4 Elbaroudy



شکل ۲. برنامه آزمایشگاهی

Fig. 2. Laboratory program



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای

Fig. 3. Sandy soil grading diagram

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌ای

Table 1. Physical characteristics of sandy soil

ویژگی	ماسه	استاندارد
نوع خاک	SW	ASTM D2487 [۴۶]
ω (%)	۱۱/۱	ASTM D698 [۴۷]
$(\text{gr}/\text{cm}^3) \gamma_{d, \max}$	۱/۷	
$(\text{gr}/\text{cm}^3) \gamma_{d, \min}$	۱/۴	ASTM D4253-4 و ۴۹ [۴۸]
e_{\max}	۰/۴۳۲	
e_{\min}	۰/۳۱۸	
D_{50} (mm)	۱/۸	
C_U	۸/۴	ASTM C136 [۵۰]
C_C	۱/۲۱	
G_s	۲/۶۵	ASTM D854 [۵۱]

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

Table 2. Chemical characteristics of Portland cement type 2

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	LOI
مقدار (%)	۲۰/۷۹	۴/۷۶	۳/۸۶	۰/۶۸	۶۲/۲۸	۳/۲۲	۱/۸۹	۱/۸۸

تصویری از دو نوع خاکاره مورد استفاده نشان داده شده است.

۳-۲- زئولیت

زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت بوده که از معدن کاوان سمنان تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این نوع زئولیت در جداول ۳ و ۴ آمده است.

۴- روند آزمایش تراکم

آماده‌سازی نمونه‌ها بلافاصله پس از اتمام مخلوط و آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D6۹۸ [۴۷] انجام شد. به این منظور از خاک ماسه‌ای پنج نمونه جهت به دست آوردن رطوبت بهینه برای تراکم استفاده گردید. مقادیر مختلف از خاک ماسه‌ای و خاکاره بر اساس درصد‌های بیان شده برای هر نمونه در مجموع به میزان ۳ کیلوگرم جدا شد و با رطوبت نسبتاً کم مخلوط شده و در قالب پروکتور استاندارد با استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرم با سقوط آزاد با فاصله ۳۰ سانتی‌متر متراکم شد. تراکم در ۳

۳-۳- خاکاره

خاکاره مورد استفاده از کارگاه نجاری تهیه شده است. به منظور تعیین تاثیر اندازه خاکاره بر مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای از دو نوع دانه‌بندی استفاده شد. خاکاره نوع اول، مانده بر روی الک ۳۰ و حالت پودر دارد و نوع دوم، مانده بر روی الک ۱۶ است و حالت الیافی و رشته ای دارد. در شکل ۴

جدول ۳. مشخصات فیزیکی زئولیت کلینوپتیلولیت

Table 3. Physical characteristics of clinoptilolite zeolite

ویژگی	واحد	مقدار
سختی	mmohs/cm	۰/۶۸۳
وزن مخصوص	gr/cm ³	۰/۶۴
اندازه متوسط ذرات	μ	۳۸
جذب آب	%	۶۵

جدول ۴. مشخصات شیمیایی زئولیت کلینوپتیلولیت

Table 4. Chemical characteristics of clinoptilolite zeolite

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	S	LOI
مقدار (%)	۷۲/۹۸	۱۱/۶۳	۱/۲۹	۰/۱۸۸	۱/۵۳	۱/۵۶	۱/۸۹	۲/۶۸	۰/۰۱۵	۰/۰۵۲	۰/۰۲	۶/۸۹



شکل ۴. الف) پودر خاکاره، ب) الیاف خاکاره

Fig. 4. a) Sawdust powder - b) sawdust fibers



شکل ۵. مراحل انجام آزمایش تراکم - الف) تجهیزات لازم، ب) کوبش خاک با چکش

Fig. 5. Steps for compaction test - a) necessary equipment, b) hammering

زیاد درصد رطوبت قبل از آزمایش، هر یک از نمونه‌ها را به طور جداگانه در پارچه‌های مرطوب قرار داده و سپس با کیسه‌های نایلونی پوشیده شده‌اند و با توجه به برنامه زمان‌بندی تحت آزمایش قرار داده شدند. از آنجایی که تمام آزمایش‌های این پژوهش در حالت کاملاً خشک انجام شد، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شد و سپس مورد آزمایش قرار گرفت. قالب‌های PVC و نحوه برش آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- نتایج آزمایش تراکم

طبق نتایج آزمایش تراکم (شکل ۷)، با افزودن میزان زئولیت به خاک ماسه‌ای، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) به دلیل وزن کم زئولیت در خاک کاهش یافته است. این در حالی است که رطوبت بهینه نمونه (OMC) به دلیل خاصیت جذب آب زئولیت افزایش یافته است. همچنین با افزودن خاکاره به خاک ماسه‌ای، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) کاهش یافته است. این کاهش در وزن مخصوص خشک خاک به دلیل چگالی پایین خاکاره نسبت به خاک است. از طرفی مقدار رطوبت بهینه (OMC) افزایش یافته است. از آنجا که پودر خاکاره فضای خالی کمتری ایجاد می‌کند در نتیجه وزن مخصوص بیشتری نسبت به الیاف خاکاره دارد. در واقع الیاف خاکاره چون فضای خالی بیشتری دارد، در نتیجه حجم بیشتری را اشغال می‌کند و وزن مخصوص خاک را بیشتر کاهش می‌دهد.

لایه، هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم و سطح خاک روی قالب بدون اعمال فشار صاف شده است. سپس پایه قالب برداشته شد و خاک و قالب وزن شدند. نمونه‌های تهیه شده از بالا، وسط و پایین از خاک گرفته شده است. این روش تا زمانی که وزن خاک در قالب از حداکثر مقدار عبور و شروع به کاهش کند تکرار شده است (شکل ۵).

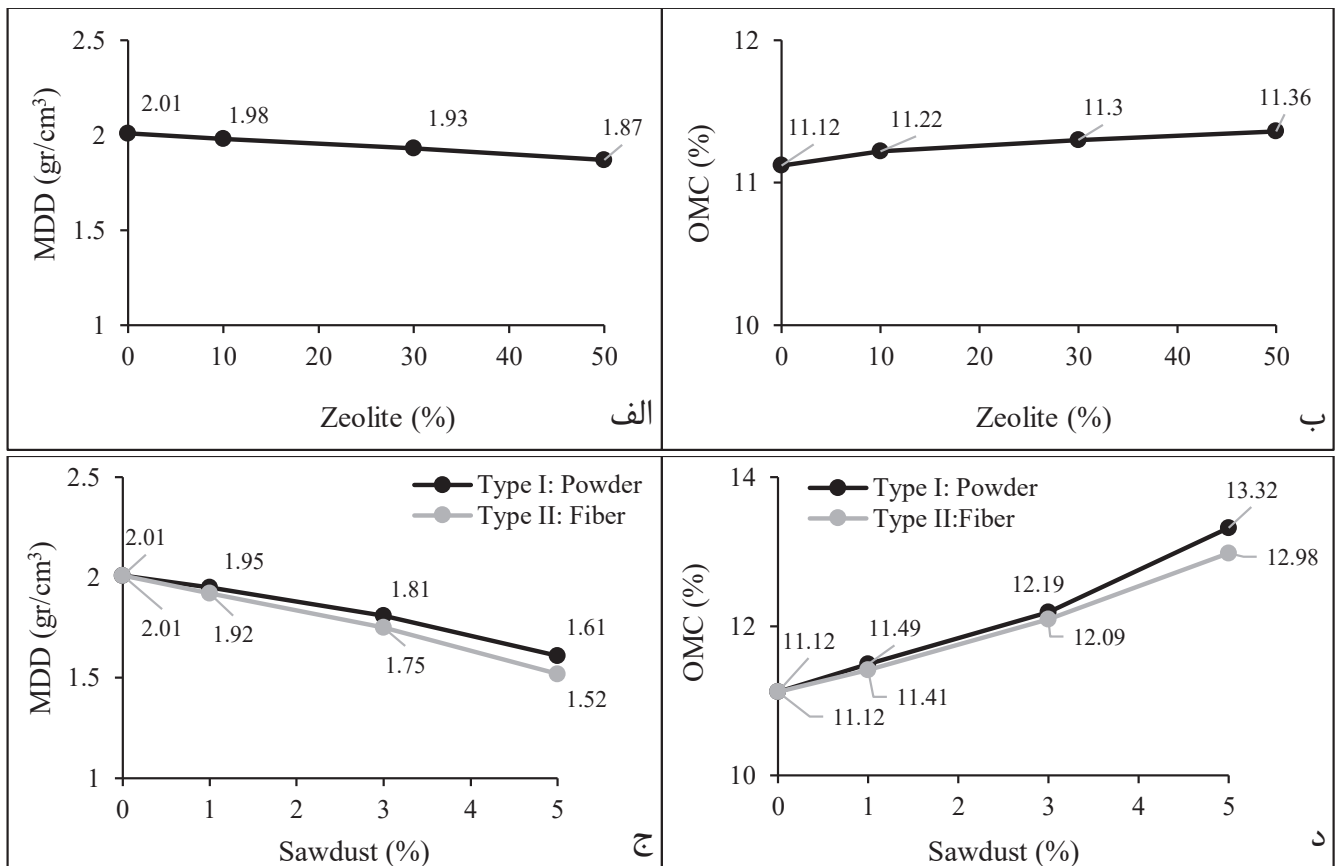
۵- روش ساخت نمونه‌ها

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا سیمان، زئولیت و خاکاره را به مدت ۱۵ دقیقه با خاک ماسه‌ای به وسیله همزن برقی با سرعت پایین مخلوط نموده تا به خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهد. سپس آب مقطر را به میزان درصد رطوبت به ترکیب اضافه نموده تا جایی که ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود (به دلیل وجود املاح در آب آشامیدنی شهر قم از آب مقطر استفاده گردید). از آنجا که نمونه‌ها برای عمل‌آوری نیاز به زمان دارند و باید درون قالب نگهداری شوند، از لوله‌ی پلیکا (PVC) به عنوان قالب استفاده شده است. اندازه ابعاد قالب‌ها با قطر ۳۸ mm بوده که به ارتفاع ۷۶ mm بریده شده است. در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D2166 [۵۳] نسبت طول به قطر نمونه‌ها باید بین ۲/۵-۲ باشد. همچنین جهت سهولت در خارج کردن نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، قالب‌ها به صورت عمودی نیز به دو قسمت مجزا تقسیم شده‌اند. پس از ساخت نمونه‌های مناسب برای آزمایش تک محوری و جلوگیری از تغییرات



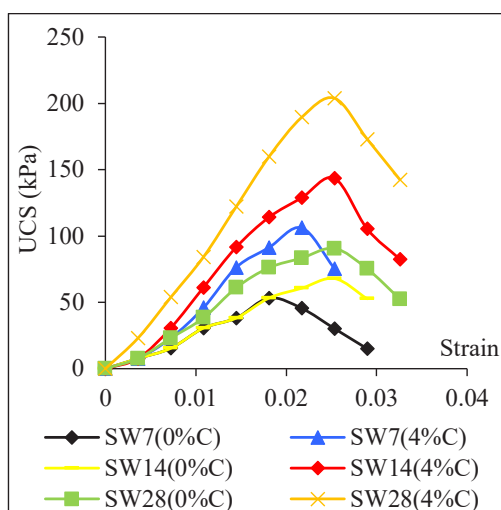
شکل ۶. مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها - الف) قالب PVC، ب) تجهیزات و اختلاط مصالح ج) عمل‌آوری نمونه‌ها داخل پوشش مرطوب

Fig. 6. Steps for making and curing samples - a) PVC mold, b) equipment and mixing materials, c) samples curing inside the wet cover



شکل ۷. نتایج آزمایش تراکم - الف) وزن مخصوص خشک خاک (MDD) با افزودن زئولیت، ب) رطوبت بهینه خاک (OMC) با افزودن زئولیت، ج) وزن مخصوص خشک خاک (MDD) با افزودن خاکاره، ب) رطوبت بهینه خاک (OMC) با افزودن خاکاره

Fig. 7. Results of compaction test - a) MDD by adding zeolite, b) OMC by adding zeolite, c) MDD by adding sawdust, d) OMC by adding sawdust



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

Fig.8. Stress-strain diagram of stabilized specimens by cement in 7, 14 and 28 days curing

جایگزینی ۳۰٪ زئولیت، بیشتر از نمونه بدون زئولیت است که نشان دهنده افزایش رفتار نرم و شکل‌پذیر نمونه‌های زئولیتی نسبت به نمونه‌های سیمانی است. در واقع وجود اکسیدهایی نظیر SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در ساختار زئولیت و تسریع در فرآیند هیدراسیون سیمان که منجر به ایجاد ژل‌های سیمانی و پوزولانی متشکل از ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) باعث بهبود در عملکرد نمونه‌ها شده است.

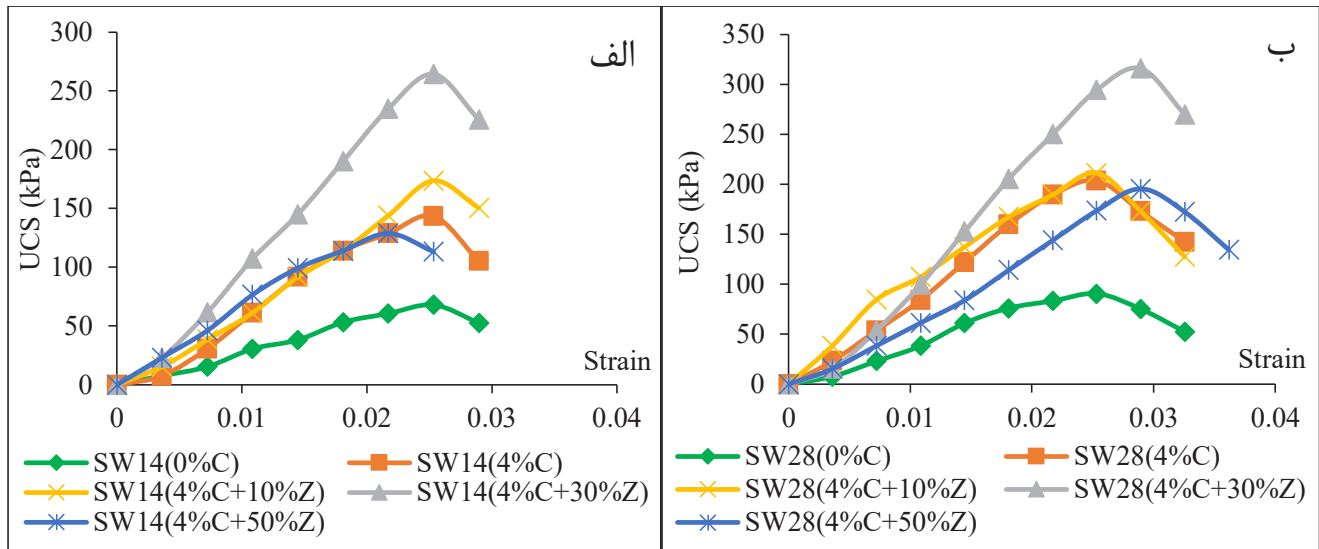
همان‌طور که در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است، با افزودن میزان ۳۰٪ جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به بیشینه خود رسیده است و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی با مشاهده در شکل ۱۰-ب که تغییرات مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای را با جایگزینی زئولیت به جای سیمان نسبت به خاک پایه نشان می‌دهد؛ جایگزینی زئولیت نسبت به خاک پایه در تمام حالات تاثیر مثبت داشته است و در بیشینه حالت خود یعنی جایگزینی ۳۰ درصد، مقاومت تک محوری در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب به $264/33$ kPa و $316/022$ kPa رسیده است و نسبت به خاک پایه افزایش ۲/۵ برابری را نشان می‌دهد.

۶-۲- نتایج آزمایش تک محوری با افزودن سیمان

پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها از قالب خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شده و سپس جهت انجام آزمایش در دستگاه تک محوری قرار گرفته است. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با افزودن ۴٪ سیمان در مدت زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمایش تک محوری در ماسه خوب دانه‌بندی (SW) با افزودن سیمان، تنش و کرنش گسیختگی خاک با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته است.

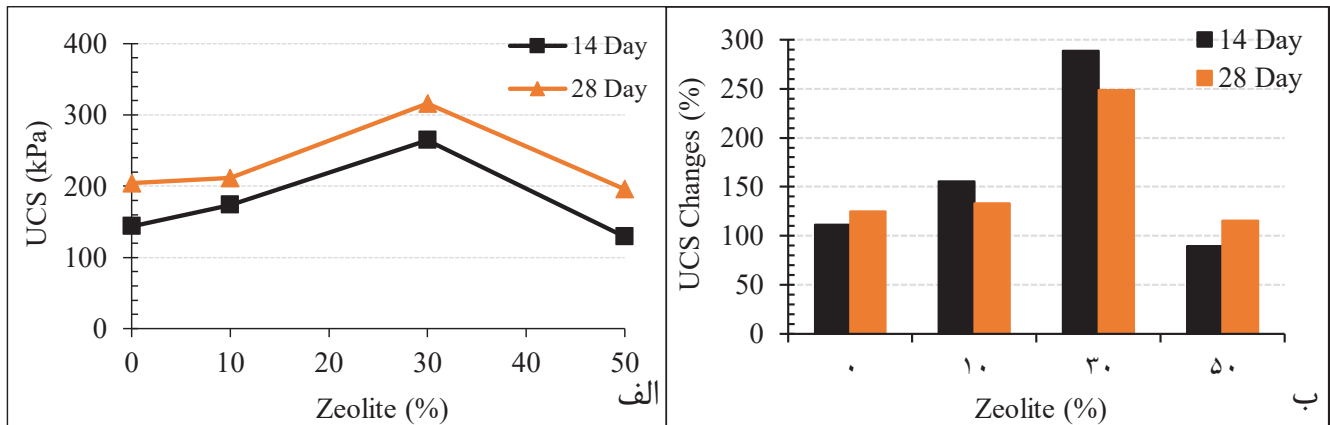
۶-۳- نتایج آزمایش تک محوری با افزودن زئولیت

نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سیمانی با جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد زئولیت در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. از آنجایی که زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷ روز مقاومتی ایجاد نمی‌کند، نمودار تنش-کرنش در این مدت نشان داده نشده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ماسه خوب دانه‌بندی (SW)، بیشینه تنش تک محوری با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان بیشتر از نمونه‌های بدون زئولیت است و با افزایش درصد جایگزینی زئولیت از مقاومت تک محوری نمونه‌ها کاسته شده است. همچنین کرنش گسیختگی نمونه تثبیت شده با



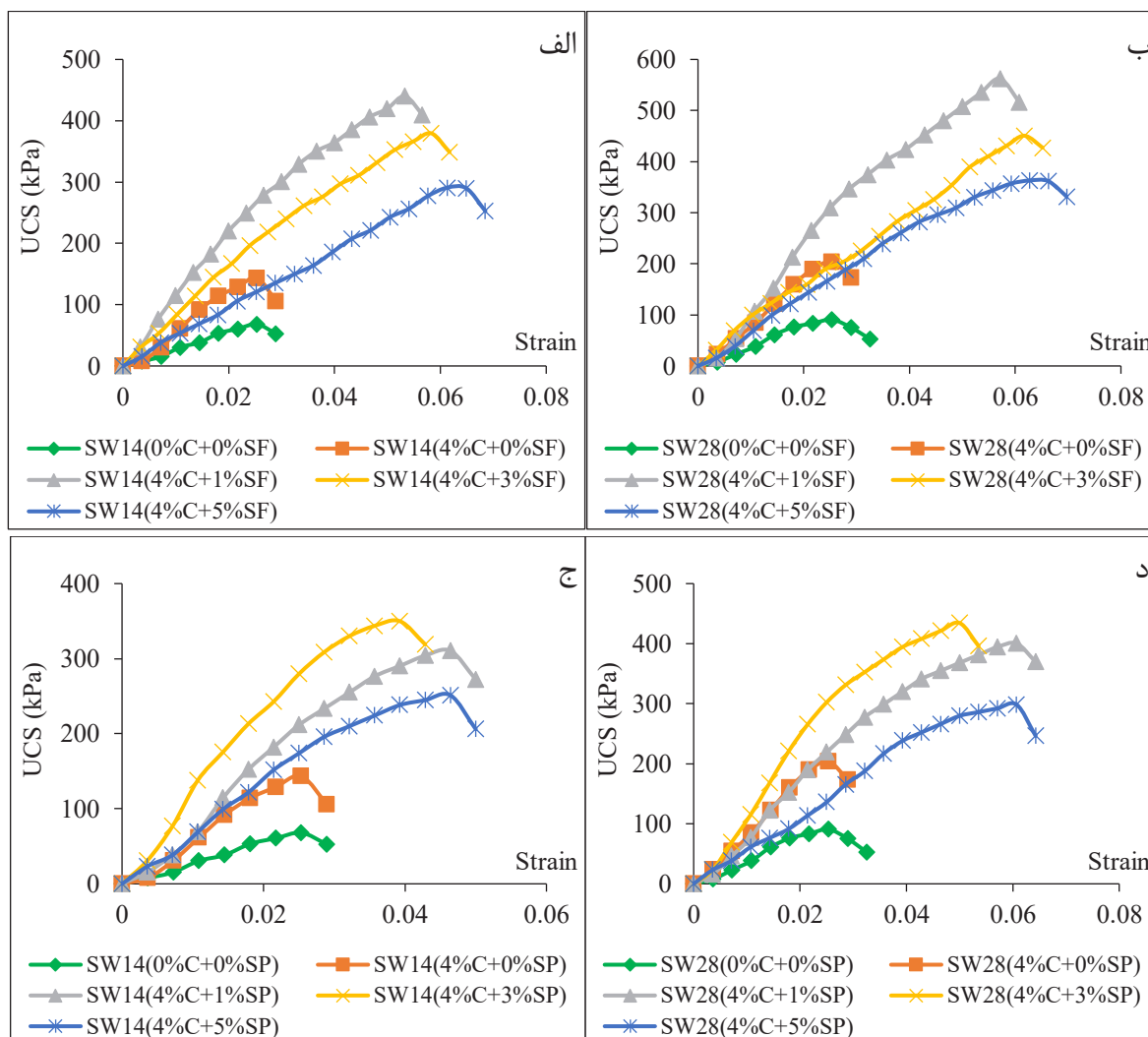
شکل ۹. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت در الف) عمل‌آوری ۱۴ روز - ب) عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 9. Stress-strain diagram of stabilized specimens by cement and zeolite in a) 14 days curing, b) 28 days curing



شکل ۱۰. الف) مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی زئولیت، ب) تغییرات مقاومت تک محوری با افزایش درصد جایگزینی زئولیت

Fig. 10. a) UCS of specimens by increasing zeolite replacement, b) UCS changes by increasing zeolite replacement



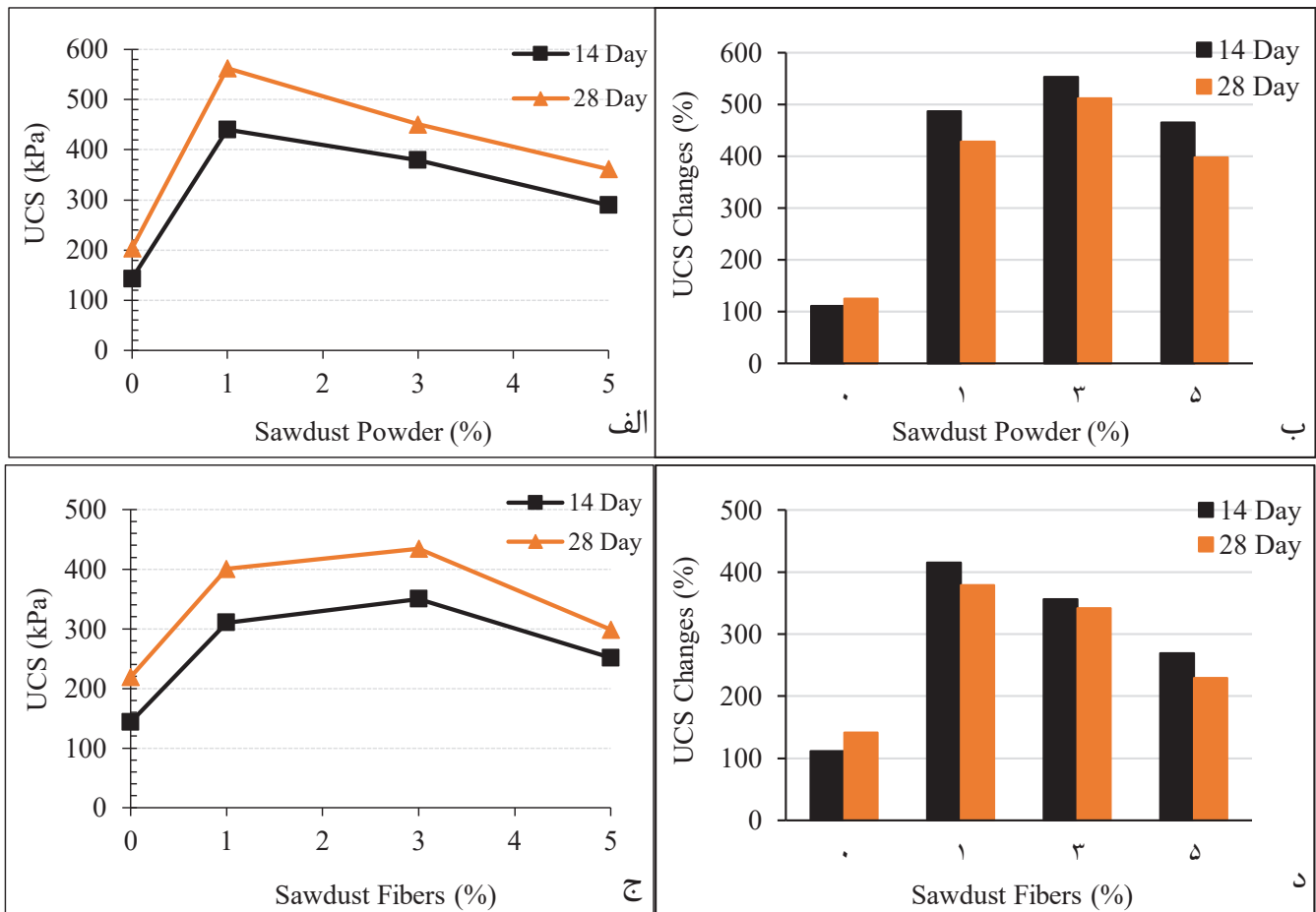
شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش حالات بهینه در الف) ماسه تثبیت شده با سیمان و الیاف خاک اره (SF) در عمل‌آوری ۱۴ روز، ب) ماسه تثبیت شده با سیمان و الیاف خاک اره (SF) در عمل‌آوری ۲۸ روز، ج) ماسه تثبیت شده با سیمان و پودر خاک اره (SP) در عمل‌آوری ۱۴ روز، د) ماسه تثبیت شده با سیمان و پودر خاک اره (SP) در عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 11. Stress-strain diagram - a) stabilized sand by cement, zeolite and sawdust fibers in 14 days curing, b) stabilized sand by cement, zeolite and sawdust fibers in 28 days curing, c) stabilized sand by cement, zeolite and sawdust powder in 14 days curing, d) stabilized sand by cement, zeolite and sawdust powder in 28 days curing

خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب به $440/14$ kPa و $562/55$ kPa رسیده است که نسبت به خاک پایه، $6/47$ و $6/2$ برابر و نسبت به خاک تثبیت شده با ۴٪ سیمان، $3/64$ و $2/75$ برابر افزایش داشته است. از طرفی با افزودن ۳٪ پودر خاک‌اره، مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب به $349/88$ kPa و $434/31$ kPa رسیده است که نسبت به خاک پایه، $5/14$ و $4/79$ برابر و نسبت به خاک تثبیت شده با ۴٪ سیمان، $2/43$ و $3/02$ برابر افزایش داشته است. نتایج آزمایش‌ها نشان از تاثیر بهتر استفاده از الیاف خاک‌اره نسبت به پودر خاک‌اره است؛ به طوری که

۴-۶- نتایج آزمایش تک محوری با افزودن خاک‌اره

نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سیمانی با افزودن مقادیر ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد پودر و الیاف خاک‌اره در ماسه خوب دانه‌بندی (SW) در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج آزمایش تک محوری نشان می‌دهد که افزودن مشخصی خاک‌اره به نمونه‌های سیمانی باعث افزایش قابل توجه تنش و کرنش گسیختگی در خاک ماسه‌ای می‌شود. مطابق با قسمت الف و ب در شکل ۱۱، درصد بهینه استفاده از الیاف خاک‌اره به منظور افزایش در خصوصیات خاک، مقدار ۱٪ به دست آمده است. در این حالت با افزودن ۱٪ الیاف خاک‌اره، مقاومت تک محوری



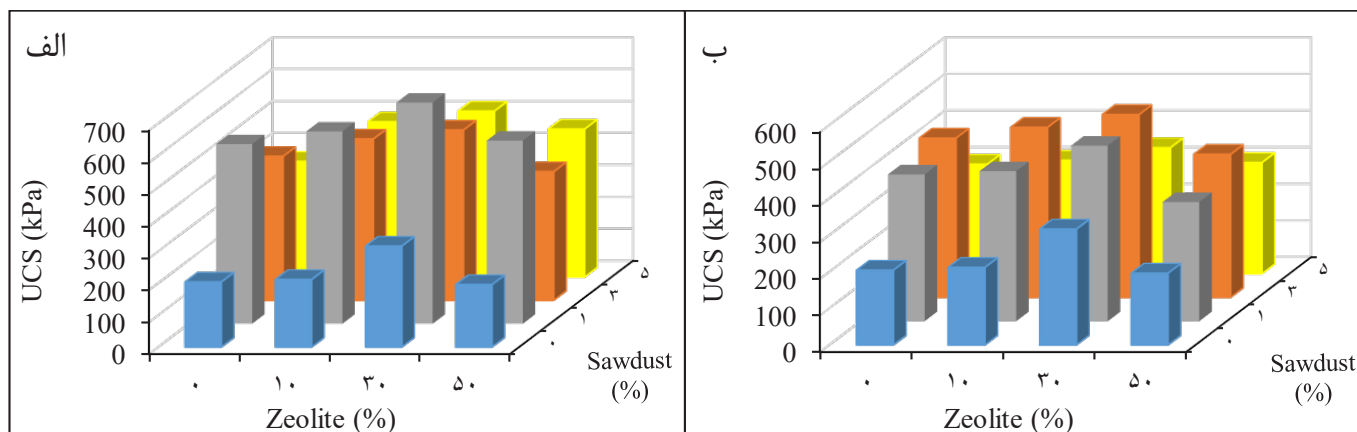
شکل ۱۲. الف) مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف خاکاره، ب) تغییرات مقاومت تک محوری با افزایش درصد الیاف خاکاره، ج) مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزایش درصد پودر خاکاره، د) تغییرات مقاومت تک محوری با افزایش درصد پودر خاکاره

Fig. 12. a) UCS of specimens by increasing sawdust fibers, b) UCS changes by increasing sawdust fibers, c) UCS of specimens by increasing sawdust powder, d) UCS changes by increasing sawdust powder

می‌دهد؛ خاکاره در تمام حالات تاثیر مثبت داشته است. اما نکته‌ای که مشاهده می‌شود این است که با افزودن خاکاره و افزایش زمان عمل‌آوری از تاثیر خاکاره بر مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای کاسته شده است. تاثیر بهتر و بیشتر الیاف خاکاره نسبت به پودر خاکاره به این دلیل بوده است که الیاف خاکاره باعث برقراری اتصال بین ذرات دورتر خاک با یکدیگر شده و در لحظه گسیختگی نمونه‌ها، رشته‌ای خاکاره به کشش افتاده و مقاومت و کرنش بیشتری از خود نشان می‌دهد. اما استفاده از مقادیر بیشتر از ۳٪ پودر خاکاره به دلیل این که در عملکرد سیمان در چسبندگی بین ذرات خاک تاثیر منفی داشته است باعث کاهش در مقاومت تک محوری خاک شده است.

مقاومت تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با افزودن الیاف خاکاره حدود ۱/۲ برابر پودر خاکاره است. همچنین با افزودن هر دو نوع خاکاره، کرنش گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است که نشان از رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها در لحظه شکست است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزودن میزان ۱٪ الیاف خاکاره و ۳٪ پودر خاکاره، مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به بیشینه خود رسیده است و پس از آن کاهش یافته است که نشان از تاثیر مطلوب خاکاره در مقدار مشخص و بهینه است. از طرفی با مشاهده در شکل ۱۲-ب و د که تغییرات مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای را با افزودن خاکاره نسبت به خاک پایه نشان



شکل ۱۳. مقاومت تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، زئولیت و خاکاره در عمل‌آوری ۲۸ روز - الف) الیاف خاکاره، ب) پودر خاکاره

Fig. 13. a) UCS of specimens stabilized by cement, zeolite and sawdust with 28 days of curing time – a) sawdust fibers, b) sawdust powder

که ۴/۷۹ و ۶/۲ برابر نسبت به نمونه‌های بدون افزودن خاکاره و ۲/۱۲ و ۲/۷۵ برابر نسبت به خاک پایه است. همچنین با افزودن میزان ۳٪ پودر خاکاره و ۱٪ الیاف خاکاره به ماسه تثبیت شده با ۴٪ سیمان و ۳۰٪ جایگزینی زئولیت، مقاومت تک محوری خاک به ترتیب به ۴۹۸/۶۸ kPa و ۶۹۲/۵۶ kPa رسیده است که ۵/۵ و ۷/۶۴ برابر نسبت به نمونه‌های بدون افزودن خاکاره و ۲/۴۴ و ۳/۳۹ برابر نسبت به خاک پایه است.

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر زیست محیطی افزودن زئولیت و خاکاره بر بهسازی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخته شد. استفاده از زئولیت و خاکاره علاوه بر بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای و ارزان بودن، باعث کاهش تولید و مصرف مواد شیمیایی نظیر سیمان، جلوگیری از آلودگی آب و خاک و کاهش ضایعات انباشته در محل دفن زباله می‌شود. در نتیجه استفاده از چنین طرح بهسازی در گام نخست باعث افزایش مقاومت تک محوری خاک شده و در نهایت باعث کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌گردد. نتایج این پژوهش عبارت است از:

۱- طبق نتایج آزمایش تراکم، با افزودن میزان زئولیت به خاک ماسه‌ای، بیشینه وزن مخصوص خشک خاک (MDD) به دلیل وزن پایین زئولیت کاهش یافته است و رطوبت بهینه خاک (OMC) به دلیل خاصیت جذب آب زئولیت افزایش یافته است. همچنین با افزودن خاکاره به خاک ماسه‌ای، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) کاهش یافته است. این کاهش

شکل ۱۳ مقاومت تک محوری نمونه‌ها را با افزودن زئولیت و خاکاره در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز نشان داده است. با توجه به شکل ۱۳-الف که نتایج آزمایش‌های تک محوری را در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، زئولیت و الیاف خاکاره نشان می‌دهد با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت و افزودن ۳٪ خاکاره به خاک ماسه‌ای، مقاومت تک محوری به بیشینه خود می‌رسد و با افزودن مقدار بیشتر زئولیت و خاکاره از مقاومت تک محوری خاک کاسته می‌شود. از طرفی با توجه به شکل ۱۳-ب که نتایج آزمایش‌های مقاومت تک محوری را در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، زئولیت و پودر خاکاره نشان می‌دهد با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت و افزودن ۱٪ خاکاره به خاک ماسه‌ای، مقاومت تک محوری به بیشینه خود می‌رسد و افزودن مقادیر بیشتر زئولیت و خاکاره باعث کاهش در مقاومت تک محوری نمونه‌ها می‌شود.

جدول ۵ مقاومت تک محوری نمونه‌ها و همچنین میزان تغییرات آن را با افزودن زئولیت و خاکاره در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز نشان داده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مقاومت تک محوری ۲۸ روزه خاک پایه با افزودن ۴٪ سیمان از ۹۰/۶۲ kPa به ۲۰۳/۹۱ kPa رسیده است که افزایش ۲/۲۵ برابری را نشان می‌دهد. همچنین با جایگزینی مقدار ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان، مقاومت تک محوری خاک به ۳۱۶/۰۲ kPa رسیده است که ۳/۴۸ برابر نسبت به خاک پایه و ۱/۵۴ برابر نسبت به ماسه تثبیت شده با ۴٪ سیمان افزایش مقاومت دارد. از طرفی با افزودن میزان ۳٪ پودر خاکاره و ۱٪ الیاف خاکاره به ماسه تثبیت شده با ۴٪ سیمان، مقاومت تک محوری خاک به ترتیب به ۴۳۴/۳۱ kPa و ۵۶۲/۵۵ kPa رسیده است

جدول ۵. مقایسه بین مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزودن زئولیت و خاکاره

Table 5. Comparison between UCS of samples with the addition of zeolite and sawdust

نمونه	میزان زئولیت (%)	میزان خاکاره (%)	مقاومت تک محوری (kPa)		میزان تغییرات مقاومت ۲۸ روزه نسبت به خاک پایه	میزان تغییرات مقاومت ۲۸ روزه نسبت به خاک پایه + ۴٪ سیمان
			۲۸ روز	۲۸ روز		
SW(0%C)	-	-	۹۰/۶۲	-	-	۰/۴۴
SW(4%C)	-	-	۲۰۳/۹۱	۲/۲۵	-	-
SW(4%C+10%Z)	۱۰	-	۲۱۱/۴۶	۲/۳۳	۱/۰۳۷	۱/۰۳۷
SW(4%C+30%Z)	۳۰	-	۳۱۶/۰۲	۳/۴۸	۱/۵۴	۱/۵۴
SW(4%C+50%Z)	۵۰	-	۱۹۵/۶۳	۲/۱۵	۰/۹۵	۰/۹۵
SW(4%C+1%SP)	-	۱	۴۰۰/۳	۴/۴۱	۱/۹۶	۱/۹۶
SW(4%C+3%SP)	-	۳	۴۳۴/۳۱	۴/۷۹	۲/۱۲	۲/۱۲
SW(4%C+5%SP)	-	۵	۲۹۸/۴	۳/۲۹	۱/۴۶	۱/۴۶
SW(4%C+1%SF)	-	۱	۵۶۲/۵۵	۶/۲	۲/۷۵	۲/۷۵
SW(4%C+3%SF)	-	۳	۴۵۰/۷۶	۴/۹۷	۲/۲۱	۲/۲۱
SW(4%C+5%SF)	-	۵	۳۶۳/۱۱	۴	۱/۷۸	۱/۷۸
SW(4%C+10%Z+1%SP)	۱۰	۱	۴۰۹/۱۳	۴/۵۱	۲	۲
SW(4%C+10%Z+3%SP)	۱۰	۳	۴۶۳/۷۵	۵/۱۱	۲/۲۷	۲/۲۷
SW(4%C+10%Z+5%SP)	۱۰	۵	۳۰۹/۱۷	۳/۴۱	۱/۵۱	۱/۵۱
SW(4%C+30%Z+1%SP)	۳۰	۱	۴۷۸/۴۸	۵/۲۸	۲/۳۴	۲/۳۴
SW(4%C+30%Z+3%SP)	۳۰	۳	۴۹۸/۶۸	۵/۵	۲/۴۴	۲/۴۴
SW(4%C+30%Z+5%SP)	۳۰	۵	۳۴۳/۳۷	۳/۷۸	۱/۶۸	۱/۶۸
SW(4%C+50%Z+1%SP)	۵۰	۱	۳۲۵/۱۱	۳/۵۸	۱/۵۹	۱/۵۹
SW(4%C+50%Z+3%SP)	۵۰	۳	۳۹۰/۱۴	۴/۳	۱/۹۱	۱/۹۱
SW(4%C+50%Z+5%SP)	۵۰	۵	۳۰۲/۹۴	۳/۳۴	۱/۴۸	۱/۴۸
SW(4%C+10%Z+1%SF)	۱۰	۱	۶۰۲/۰۵	۶/۶۴	۲/۹۵	۲/۹۵
SW(4%C+10%Z+3%SF)	۱۰	۳	۵۰۴/۹۹	۵/۵۷	۲/۴۷	۲/۴۷
SW(4%C+10%Z+5%SF)	۱۰	۵	۴۸۵/۵۴	۵/۳۵	۲/۳۸	۲/۳۸
SW(4%C+30%Z+1%SF)	۳۰	۱	۶۹۲/۵۶	۷/۶۴	۳/۳۹	۳/۳۹
SW(4%C+30%Z+3%SF)	۳۰	۳	۵۳۳/۲۱	۵/۸۸	۲/۶۱	۲/۶۱
SW(4%C+30%Z+5%SF)	۳۰	۵	۵۱۹/۱۸	۵/۷۲	۲/۵۴	۲/۵۴
SW(4%C+50%Z+1%SF)	۵۰	۱	۵۷۳/۴	۶/۳۲	۲/۸۱	۲/۸۱
SW(4%C+50%Z+3%SF)	۵۰	۳	۴۰۲/۸۳	۴/۴۴	۱/۹۷	۱/۹۷
SW(4%C+50%Z+5%SF)	۵۰	۵	۴۶۲/۹۳	۵/۱	۲/۲۷	۲/۲۷

خاکاره به این دلیل بوده است که حالت الیاف باعث برقراری اتصال بین ذرات دورتر خاک با یکدیگر شده و در لحظه گسیختگی نمونه‌ها، رشته‌ای خاکاره به کشش افتاده و مقاومت و کرنش بیشتری از خود نشان می‌دهد. اما استفاده از مقادیر بیشتر از ۱٪ پودر خاکاره به دلیل این که در عملکرد سیمان در چسبندگی بین ذرات خاک تاثیر منفی داشته است باعث کاهش در مقاومت تک محوری خاک شده است.

۸- فهرست علائم

ω	درصد رطوبت خاک، %
$\gamma_{d, max}$	بیشینه وزن مخصوص خاک، gr/cm^3
$\gamma_{d, min}$	کمینه وزن مخصوص خاک، gr/cm^3
SW	ماسه خوب دانه‌بندی شده
C_c	ضریب خمیدگی
C_u	ضریب یکنواختی
G_s	چگالی ویژه خاک
e_{max}	بیشینه نسبت تخلخل خاک
e_{min}	کمینه نسبت تخلخل خاک
D_{50}	بزرگ‌ترین اندازه ذرات خاک که ۵۰ درصد ذرات خاک از آن ریزتر هستند، mm
MDD	بیشینه وزن مخصوص خشک خاک، gr/cm^3
OMC	رطوبت بهینه خاک، %

منابع

- [1] Shafabakhsh. GH, Sadeghnejad. M, Sajed. Y, Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder, Case Studies in Construction Materials, 1 (2014) 69–76.
- [2] Ferber. V, Auriol. J. C, Cui. Y. J, Magnan. J. P, On the swelling potential of compacted high plasticity clays, Engineering Geology, 104 (2009) 200–210.
- [3] Puppala. A. J, Advances in ground modification with chemical additives: from theory to practice, Transportation Geotechnics, 9 (2016) 123–138.
- [4] Hashemian. L, Kavussi. A, Aboalmaali. H, Application of foam bitumen in cold recycling and hydrated lime

در وزن مخصوص خشک خاک به دلیل چگالی پایین خاکاره نسبت به خاک است. از طرفی مقدار رطوبت بهینه (OMC) افزایش یافته است. از آن‌جا که پودر خاکاره، فضای خالی کمتری ایجاد می‌کند در نتیجه وزن مخصوص بیشتری نسبت به الیاف خاکاره دارد. در واقع الیاف خاکاره چون فضای خالی بیشتری دارد، در نتیجه حجم بیشتری را اشغال می‌کند و وزن مخصوص خاک را بیشتر کاهش می‌دهد.

۲- طبق نتایج آزمایش مقاومت تک محوری، درصد بهینه جایگزینی زئولیت به جای سیمان در خاک ماسه‌ای ۳۰٪ به دست آمده است. همچنین به دلیل عدم تشکیل واکنش‌های پوزولانی زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷ روز، مقاومت تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت در این مدت کاهش یافته است و به این معناست که زئولیت در کوتاه مدت تاثیر مطلوبی ندارد. از طرفی با این طرح جایگزینی، مقاومت تک محوری ماسه (SW) نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی زئولیت در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، از ۱۴۳/۴۹ kPa به ۲۶۴/۳۳ kPa و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز از ۲۰۳/۹۱ kPa به ۳۱۶/۰۲ kPa رسیده است که نشان از افزایش ۸۴ و ۵۵ درصدی در مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای دارد. همچنین با افزودن زئولیت به نمونه‌های سیمانی، کرنش گسیختگی خاک نیز افزایش یافته است که نشان از رفتار نرم و شکل‌پذیر خاک در لحظه شکست است که می‌تواند ناشی از بهبود فرآیند هیدراسیون و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به کمک پوزولان‌ها و ژل‌های سیمانی تولید شده توسط زئولیت باشد. در این حالت پیوند بین ذرات خاک به دلیل واکنش‌های شیمیایی و ایجاد ژل‌های سیمانی (CAH و CSH) مستحکم‌تر شده و توده خاک حالت یکنواخت‌تری گرفته است و در نهایت منجر به افزایش مقاومت تک محوری خاک در مقایسه با حالت بدون افزودنی شده است.

۳- طبق نتایج آزمایش‌های تک محوری در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، زئولیت و الیاف خاکاره با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت و افزودن ۳٪ خاکاره به خاک ماسه‌ای، مقاومت تک محوری به بیشینه خود رسیده است و با افزودن مقدار بیشتر زئولیت و خاکاره از مقاومت تک محوری خاک کاسته شده است. همچنین در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، زئولیت و پودر خاکاره، با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت و افزودن ۱٪ خاکاره به خاک ماسه‌ای، مقاومت تک محوری به بیشینه خود رسیده است و افزودن مقادیر بیشتر زئولیت و خاکاره باعث کاهش در مقاومت تک محوری نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده تاثیر مطلوب استفاده از خاکاره به شکل الیاف نسبت به حالت پودر آن است. تاثیر بهتر و بیشتر الیاف خاکاره نسبت به پودر

- performance of portland cement blended with nano silica and silica fume, *Dyna Magazine*, 163 (2010) 37-48.
- [17] Shooshpasha. I, Abbasi. M, Najafnia. H, Investigation of the combined effect of cement and nanosilica on shear strength of Babolsar sandy soil, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1) (2016) 179-188 (in Persian).
- [18] Ramzaniapour. A, Firoozmakan. Sh, Ebadi. T, Bahrami. H, The effect of nanosilica on the physical properties and durability of concrete, 6th Civil Engineering Congress, Semnan, (2011) (in Persian).
- [19] Fertu. T, Gavrilesco. M, Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams, *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1) (2012) 867-878.
- [20] Ahmadi Chenarboni. H, Lajevardi. H, Mola-Abasi, H. Zeighami, E. The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils, *Construction and Building Materials*, 272(1) (2020) 1-10.
- [21] Kordnaeij. A, Ziaie Moayed. R. Soleimani. M, Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement, *Soils and Foundations*, 59 (2019) 905–919.
- [22] Caputo. D, Liguori. B, Colella. C, Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: the effect of zeolite structure, *Cement and Concrete Composites*, 30(5) (2008) 455–462.
- [23] Farshbaf Aghajani. H, Soltani-Jigheh. H, Salimi. M, Karimi. S, Estekanchi. V, Akbarzadeh Ahari. R, Investigating the strength, hydraulic conductivity, and durability of the CSG (cemented sand-gravel) check dams: a case study in Iran, *SN Applied Sciences*, 4(6) (2022) 1-19.
- [24] Geng. K, Chai. J, Qin. Y, Li. X, Zhou. H, Collapse inhibition mechanism analysis and durability properties of cement-stabilized Pasha sandstone, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(4) (2022) 1-18.
- [25] Alipour. R, Heshmati. A. A, Karimiazar. J, Esazadefar. N, Asghari-Kaljahi. E, Bahmani. S. H, Resistance and in airport pavement strengthening, *Case Studies in Construction Materials*, 1 (2014) 164–171.
- [5] Ismail. A. I. M, Ryden. N, The quality control of engineering properties for stabilizing silty Nile delta clay soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 32 (2014) 773–781.
- [6] Omar. A. M, Energy use and environmental impacts: A general review, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(5) (2009).
- [7] Owusu. P. A, Sarkodie. S. A, A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation, *Cogent Engineering*, 3(1) (2016).
- [8] Rosen. M. A, Energy sustainability: A pragmatic approach and illustrations, *Sustainability*, 1(1) (2006) 55–80.
- [9] Ahmadi. P. F, Ardeshir. A, Ramezaniapour A. M, Bayat. H, Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite, *Ceramics International Journal*, 44(7) (2018) 7588–7598.
- [10] Gunaratne. M, *The foundation engineering handbook*, Taylor and Francis Group, CRC Press, (2006).
- [11] Liu. L, Liu. H, L, Stuedlein. A, Evans. T. M, Xiao. Y, Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(10) (2019) 1502-1513.
- [12] Obeta. I. N, Ikeagwuani. C, Attama. C. M, Okafor. J, Stability and durability of sawdust ash-lime stabilized black cotton soil, *Nigerian Journal of Technology*, 38(1) (2019) 75-80.
- [13] Esmaeilipour. E, The effect of recession on cement industry and solutions to exit from it, *Cement Technology Journal*, (2015) (in Persian).
- [14] Kordnaeij. A, Ziaie Moayed. R, Soleimani. M, Small strain shear modulus equations for zeolite–cement grouted sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6) (2019) 5097–5111.
- [15] Mola-Abasi. H, Kordtabar. B, Kordnaeij. A, Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5) (2016) 1539–1551.
- [16] Tobon. J, Restrepo. O, Paya. J, Comparative analysis of

- soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (2016) 746-752.
- [35] Hong. S, Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures, Master Thesis, USA, (2015).
- [36] Shi. J. X, The applications of zeolite in sustainable binders for soil stabilization, *Applied Mechanics and Materials*, 256 (2013) 112–115.
- [37] Demirbas. G, Stabilization of expansive soils using bigadic zeolite, PhD Thesis, University of METU, Ankara, Turkey, (2009).
- [38] James. J, Strength benefit of sawdust/wood ash amendment in cement ctabilization of an expansive soil, *Revista Facultad de Ingeniería.*, 28(50) (2019) 44-61.
- [39] Bolarinwa. A, Ola. S. A, A review of the major problem soils in nigeria, *Journal of Engineering and Technology*, 1(1) (2016) 17-25.
- [40] Sun. S, Liu. B, Wang. T, Improvement of expansive soil properties using sawdust, *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 44(1) (2018) 78–85.
- [41] Tadayon. R, Dabiri. R, Investigation of the effect of sawdust on the geotechnical behavior of clay soils, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 32(1) (2019) 20-34. (in Persian)
- [42] Rakesh. V, Shwetank. R, Chinmayee. R, Lokendra. P, Mayur. R, Stabilisation of black cotton soil using sawdust and cement, *International Journal for Scientific Research and Development*, 5(9) (2017) 728-731.
- [43] Kumar. K. A, Narayanan. P, Chiranthana. N, Stability of red clay and laterite soil with sawdust as an ammendment, *International Journal of Combined Research and Development*, 2(2) (2014) 18-23.
- [44] Owoyemi. O, Effect of sawdust on the geotechnical properties of a lateritic soil, *Journal of Mining and Geology*, 57(1) (2021) 127-139.
- [45] Abd Elhalim. A, Elbaroudy. A, Influence addition of fine sawdust on the physical properties of expansive soil in the Middle Nile Delta, Egypt, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(2) (2014) 483-490.
- [46] Annual Book of ASTM D2487 Standards, Standard test swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (2022) 1-14.
- [26] Kordnaeij. A, Ziaie Moayed. R, Soleimani. M, Small strain shear modulus equations for zeolite–cement grouted sands, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5) (2020) 1–4 (in Persian).
- [27] Jafarpour. P, Ziaie Moayed. R, Kordnaeij. A, Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12 (2020) 149-159.
- [28] MolaAbasi. H, Saberian. M, J, Li. Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition, *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 784–795.
- [29] MolaAbasi. H, Khajeh. A, Naderi Semsani. S, Effect of the ratio between porosity and SiO₂ and Al₂O₃ on tensile strength of zeolite-cemented sands, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4) (2018) 04018028.
- [30] Abbasi. M, Study of the effect of zeolite on the tensile strength of Babolsar sandy soils, Master Thesis, Mazandaran Institute of Higher Industrial Education, (2014) (in Persian).
- [31] Abbasi. M, Shooshpasha. I, Mola-Abasi. H, Investigation of the effect of zeolite on tensile strength of sandblasted Babolsar sand cement, *Journal of Civil Engineering, Sharif University*, 33(1) (2017) 117-120 (in Persian).
- [32] Abbasi. M, ShooshPasha. I, MollaAbbasi. H, Investigation of the effect of zeolite on shear strength of Babsalar sand, stabilized by cement, *Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University*, 49(1) (2019) 96-89 (in Persian).
- [33] Mola-Abasi. H, Shooshpasha. I, Investigation of the effect of zeolite on Babolsar sandy soil strength, cement-stabilized using uniaxial compressive strength test, *Journal of Civil Engineering, Tarbiat Modares University*, 16(4) (2016) 203-213 (in Persian).
- [34] Mola-Abasi. H, Shooshpasha. I, Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy

- [50] Annual Book of ASTM C136 Standards, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [51] Annual Book of ASTM D854 Standards, Standard test for specific gravity of soil solids by water pycnometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [52] Annual Book of ASTM C150 Standards, Standard specifications for cements. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [53] Annual Book of ASTM D2166 Standards, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [47] Annual Book of ASTM D698 Standards, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [48] Annual Book of ASTM D4253 Standards, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [49] Annual Book of ASTM D4254 Standards, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Yousefi, A. A. Amoei, A. R. Karimi, M. Amel Sakhi, *Environmental Effect of Adding Zeolite and Sawdust on the Unconfined Strength of Stabilized Soil by Cement*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(11) (2023) 4287-4306.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20693.7502

