



## مطالعه تجربی تاثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خاک تثبیت شده با سیمان و جایگزینی زئولیت

مسعود عامل سخی، رضا یوسفی، امیرعباس عمویی، عبدالرضا کریمی\*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷

### کلمات کلیدی:

تثبیت خاک  
الیاف پلی پروپیلن  
سیمان پرتلند  
زئولیت  
مقاومت تک محوری

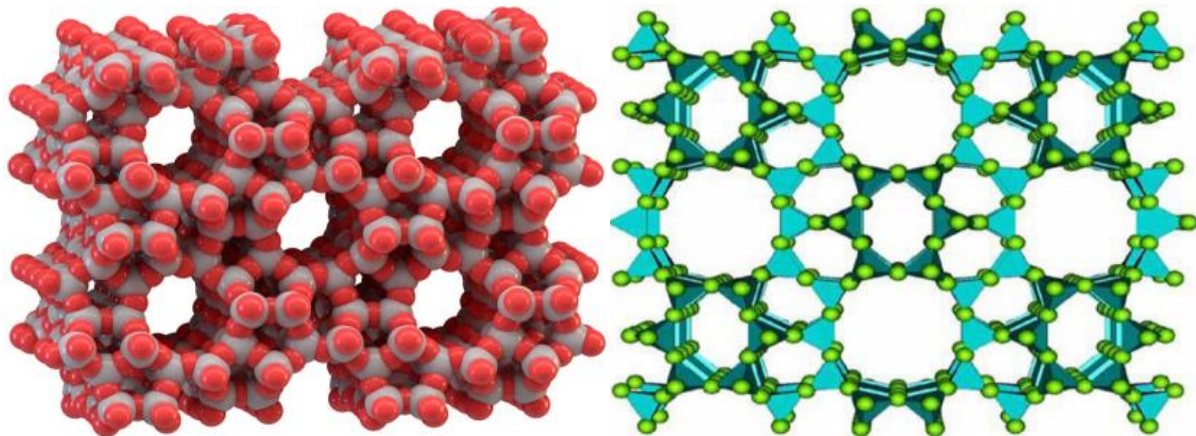
**خلاصه:** یکی از روش‌های رایج و کم‌هزینه جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای، تثبیت آن به وسیله مواد افزودنی مانند سیمان است. با توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید و مصرف سیمان، استفاده از آن همچنان در پروژه‌های عمرانی از ارکان اصلی به حساب می‌آید. به همین دلیل این پژوهش به دنبال یافتن راه‌حلی برای کاهش مصرف سیمان است. به منظور بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت تک‌محوری خاک، مقادیر الیاف پلی پروپیلن، سیمان، زئولیت، نوع خاک ماسه‌ای و همچنین زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته و در مجموع تعداد ۱۲۶ آزمایش مقاومت تک‌محوری انجام شده است. به منظور بهسازی این دو نوع خاک از مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن با توزیع تصادفی 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 ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به ماسه خوب دانه‌بندی و ۱ درصد به ماسه بد دانه‌بندی، مقدار رطوبت بهینه، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن، وزن مخصوص خشک هر دو نوع خاک، کاهش یافته است. همچنین طبق نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری، درصد بهینه جایگزینی زئولیت و الیاف پلی پروپیلن در طرح بهسازی ماسه خوب دانه‌بندی به ترتیب ۳۰٪ و ۰/۵٪ و در ماسه بد دانه‌بندی به ترتیب ۱۰٪ و ۰/۷۵٪ به دست آمده است. استفاده از مقادیر بهینه زئولیت و الیاف پلی پروپیلن در طرح جایگزینی سیمان، علاوه بر افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها، باعث افزایش کرنش گسیختگی آن‌ها نیز شده است.

### ۱- مقدمه

خاک همواره به عنوان یکی از مصالح اصلی پروژه‌های عمرانی از دیرباز مورد توجه بشر بوده و با پیشرفت علوم، پژوهش‌های مختلفی از سوی محققین بر روی رفتار خاک و خواص مهندسی آن صورت گرفته است. در این راستا به دلیل ضعف مقاومت برشی و نداشتن مقاومت کششی خاک، روش‌های مختلفی از سوی دانشمندان به منظور افزایش باربری و بهبود خواص مهندسی آن مطرح گردیده است. از جمله روش‌های بهبود خاک می‌توان به جایگزینی خاک، پیش بارگذاری یا تحکیم، تراکم در محل، تزریق با استفاده از انواع دوغاب، تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی و تسلیح کردن خاک اشاره نمود. خاک به عنوان محیط دانه‌ای طبیعی حاصل از فرسایش و دگرگونی سنگ‌ها، قابلیت تحمل و انتقال نیروهای کششی را نداشته و در مقابل بارهای وارده تغییر شکل می‌دهد. در بسیاری از شرایط در اثر اعمال نیروهای مختلف طبیعی و یا ناشی از سازه‌ها دچار گسیختگی شده

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





شکل ۱. ساختار زئولیت [۱۴ و ۱۵]

Fig. 1. Structure of zeolite

در استان سمنان را می‌توان به عنوان یکی از دلایل کاربرد زئولیت به جای سیمان نام برد.

زئولیت‌ها آلومینوسیلیکات‌هایی کریستالی از فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم هستند که از ترکیب  $[SiO_4]^{4-}$  و  $[AlO_4]^{5-}$  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 [۱۳].



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

از جمله استفاده از مواد شیمیایی مانند آهک و سیمان موجب بروز برخی مشکلات زیست‌محیطی نظیر آلودگی خاک‌ها و تغییر مسیر سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود [۶].

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 [۷]. از نظر آماری تخمین زده می‌شود که صنعت سیمان، مسئول تقریباً ۷٪ از کل انتشار  $CO_2$  در جهان است [۸].

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 [۹-۱۲].

استفاده از زئولیت می‌تواند به عنوان یک ماده معدنی طبیعی برای بهسازی ماسه مناسب باشد. همچنین وجود معادن بسیار در کشور به ویژه

افزایش یافته است [۲۰].

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 تک‌محوری 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 [۲۱].

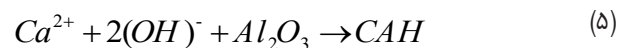
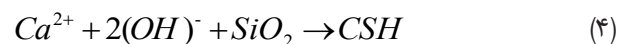
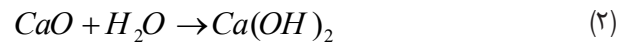
ملاعباسی و همکاران (۲۰۱۸) با در نظر گرفتن مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان، ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد جایگزینی زئولیت، نسبت تخلخل و همچنین نسبت ذرات  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  به تثبیت خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی بر روی خاک، نشان داده است که نمونه‌های تثبیت شده با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت 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 ژل‌های سیمانی، فرآیند هیدراسیون تسریع شده و منجر به بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک خواهد شد [۲۲].

عباسی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر زئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداختند. نتایج این بررسی نشان داده است که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان، افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت قابل دستیابی است [۲۳ و ۲۴].

عباسی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر جایگزینی زئولیت 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 زئولیت به جای سیمان، مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۶۲ درصد همراه با افزایش کرنش گسیختگی، افزایش یافته است [۲۵].

ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۶) به بررسی تاثیر جایگزینی زئولیت با سیمان در نمونه‌های خاک ماسه‌ای بابلسر پرداختند. آن‌ها از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت، مقاومت فشاری

سیلیکات کلسیم (CSH) و ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) ذرات خاک را متصل کرده و باعث افزایش مقاومت و سختی ذرات خاک می‌شود. معادلات (۲) تا (۵) نحوه انجام این واکنش‌ها را نشان می‌دهد [۱۷ و ۱۶].



احمدی و همکاران (۲۰۲۱) با جایگزینی مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد زئولیت و مقادیر ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد سیمان به تثبیت خاک رس پرداختند. نتایج تجربی آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری نشان داده است که با افزایش زئولیت به میزان ۳۰ درصد جایگزینی سیمان، مقاومت تک‌محوری خاک افزایش و با مقادیر بیشتر زئولیت کاهش یافته است [۱۸].

کردنائیچ 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 [۱۹].

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٪

تک‌محوری به میزان ۲۰ تا ۷۸ درصد افزایش یافته است [۲۶ و ۲۷].  
 هونگ<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی اختلاط ماسه و زئولیت، با درصد‌های وزنی مختلف زئولیت ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد پرداخته است. نتایج آزمایش در مورد تراکم نشان داد که با افزایش نسبت وزنی زئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه تمایل به افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم تمایل به کاهش دارد [۲۸].

شی (۲۰۱۳) به بررسی تاثیر جایگزینی زئولیت به جای سیمان (با نسبت زئولیت به سیمان ۱ به ۹) در خاک رس سیلتی و شن ماسه‌دار پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که بالاترین میزان مقاومت تک‌محوری مربوط به جایگزینی ۱۰٪ زئولیت و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز بوده است [۲۹].

در مطالعه‌ای توسط دمیرباس<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) به بررسی تثبیت خاک‌های متورم شونده با استفاده از زئولیت بیگادیج و آهک پرداخته شده است. هدف از این مطالعه تجربی، بررسی اثرات زئولیت بیگادیج و آهک و مخلوط این دو ماده بر روی برخی خواص خاک از جمله حدود اتربرگ، توزیع اندازه دانه‌ها، درصد 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 [۳۰].

هوار<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۸۲) با انجام آزمایش‌های تراکم و CBR روی مخلوط ماسه شکسته و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن نشان داد که کاربرد الیاف، در حالی که انرژی مورد نیاز برای رسیدن به یک تراکم مشخص را افزایش می‌دهد، موجب افزایش CBR شده است [۳۱].

آرنزیک<sup>۴</sup> و چادهاری<sup>۵</sup> (۱۹۸۸) طی مطالعه آزمایشگاهی با دستگاه برش مستقیم و ساخت مدل فیزیکی از یک دیوار حائل مسلح که خاکریز پشت آن را ماسه ساحلی مسلح شده با پولک‌های آلومینیمی تشکیل داده است، نتیجه گرفتند که به کارگیری این عناصر باعث افزایش مقاومت برشی ماسه شده و میزان این افزایش، به مشخصات و درصد عناصر تسلیح بستگی دارد [۳۲].

وانگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۰) با انجام آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری، تأثیر افزودن بعضی از الیاف پلیمری را به خاک در بهسازی رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه رس‌دار مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که افزودن این الیاف به خاک، ضمن افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها، شکل‌پذیری آن‌ها

را نیز بهبود بخشیده است [۳۳].

استفاده از الیاف در بهسازی خاک، از ریشه درختان در خاک‌های تقویت شده نشأت گرفته شده است. مطالعات زیادی برای بررسی تأثیر بهسازی الیاف انجام شده است. بومیناتان<sup>۷</sup> و هری<sup>۸</sup> (۲۰۰۲) تأثیر بهسازی الیاف بر مقاومت روانگرایی خاکستر را بررسی کردند. آن‌ها اظهار داشتند که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت در برابر روانگرایی خاکستر به دلیل فراهم آوردن رفتار پیوسته و از بین رفتن فشار آب منفذی در بین ذرات خاکستر شده است [۳۴].

کایا<sup>۹</sup> و دوروکان<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۴) مشخصات تراکمی زئولیت و مخلوط زئولیت- بنتونیت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که با افزایش مقدار بنتونیت در مخلوط، وزن مخصوص خشک خاک کاهش و درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است و با افزودن مقادیر مختلف بنتونیت، کاهش وزن مخصوص خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه خاک چشم‌گیر نبوده است [۳۵].

در پژوهش انجام شده توسط مهران‌نیا و وفائیان (۲۰۱۱) از خاک ماسه‌ای که به وسیله الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد استفاده شده است. نتایج آزمایش برش مستقیم با فرمول میچالوفسکی<sup>۱۱</sup> مقایسه مقایسه شده است. نتایج بیان کرده است که این فرمول، مقاومت خاک مسلح شده را کمتر از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در واقع این فرمول نتایج محافظه کارانه‌تری نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین فرمول میچالوفسکی برای ماسه مسلح شده با الیاف هیچ چسبندگی در نظر نمی‌گیرد. در حالی که نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ماسه مخلوط شده با الیاف دارای چسبندگی است [۳۶].

در پژوهشی که توسط عابدی و همکاران (۲۰۱۵) صورت گرفته است از الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و درصدهای ۰/۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ برای بهسازی خاک ماسه‌ای بادی اصفهان استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به خاک، تغییر چندانی بر روی رطوبت بهینه، وزن مخصوص و چسبندگی خاک ایجاد نشده است. در حالی که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و ظرفیت باربری خاک شده است. مقدار افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک در الیاف با طول ۶ میلی‌متر، ۶٪ بوده است و در الیاف با طول

- 1 Hong
- 2 Demirbas
- 3 Hoare
- 4 Arenzic
- 5 Chowdhuri
- 6 Wang

- 7 Boominathan
- 8 Hari
- 9 Kaya
- 10 Durukan
- 11 Michalowski

حالت و معادل  $0/017$  دلار به ازای هر کیلوگرم، می‌تواند برای بهسازی ماسه با سیمان، مناسب باشد. در نگاه اول شاید استفاده از ژئولیت مقرون به صرفه نباشد ولی اگر تاثیرات بلند مدتی که کاهش مصرف سیمان و استفاده از ژئولیت 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 ژئولیت 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 الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی، افزایش مقاومت خمشی، افزایش سختی، افزایش مقاومت در برابر ضربه و انفجار و بهبود مود گسیختگی در ترکیب می‌شود. همچنین این الیاف ویژگی‌هایی نظیر ارزان بودن، استفاده آسان، ایمن، در دسترس، عدم جذب گرد و غبار دارند و به دلیل خنثی بودن در برابر حملات شیمیایی و باکتری‌ها بسیار مقاوم هستند. الیاف پلی‌پروپیلن علاوه بر عدم کلوخه شدن، خاصیت آب‌گریز یا هایدروفوبیک<sup>۲</sup> نیز دارد که باعث می‌شود در هنگام اختلاط با خمیر سیمان خیس نشود و بنابراین هیچ میزان آبی برای مصرف این الیاف در طرح اختلاط افزوده نخواهد شد. از آن جایی که اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه افزودن ژئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه بر روی خاک‌های سستی چون رس انجام شده است و منجر به تاثیر مطلوبی در خصوصیات ژئوتکنیکی این خاک‌ها شده است. پژوهش حاضر به بررسی تاثیر هم‌زمان ژئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت تک‌محوری خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخته است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت تک‌محوری (UCS) خاک ماسه‌ای، مقادیر سیمان، ژئولیت، دانه‌بندی خاک و همچنین زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته و در مجموع تعداد ۱۲۶ آزمایش مقاومت تک‌محوری انجام شده است. به منظور بهسازی این دو نوع خاک از مقادیر ۴ درصد وزنی سیمان، مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان و مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن با توزیع تصادفی در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده شده است. در جدول ۱ برنامه آزمایشگاهی انجام شده و طرح اختلاط نمونه‌ها گردآوری شده است.

۱۲ میلی‌متر ۱۱٪ است. همچنین با افزایش طول و درصد الیاف، ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد [۳۷].

در پژوهش انجام شده توسط چگینی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) با افزودن رشته‌های پیوسته<sup>۱</sup> به خاک سیلتی با انجام آزمایش سه‌محوری مشخص شده است که با افزایش این رشته‌ها، مقاومت روانگرایی خاک سیلتی افزایش یافته است. همچنین با افزایش طول رشته‌ها از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر، مقاومت روانگرایی نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین آزمایش‌ها نشان داده است که با افزایش فشار موثر محدود کننده ( $\sigma'_p$ ) مقاومت روانگرایی خاک کاهش یافته که علت آن کاهش خاصیت اتساع خاک است [۳۸].

در پژوهش انجام شده توسط امینی و نورزاد (۲۰۱۸) بر روی خاک ماسه بابلسر با رشته‌های الیاف با قطر  $0/023$  میلی‌متر و با طول ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و به مقادیر وزنی ۰/۵ و ۱ درصد مورد آزمایش سه‌محوری سیکلی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که در حضور الیاف، تعداد سیکل برای وقوع روانگرایی افزایش یافته است. به این معنی که مقدار انرژی لازم برای گسیختگی سیکلی در نمونه‌های مسلح شده با الیاف بسیار بیشتر از نمونه‌های غیرمسلح است. همچنین با افزایش مقدار و طول الیاف برای مسلح نمودن خاک، مقاومت روانگرایی نمونه‌ها افزایش یافته است. با افزودن ۱٪ الیاف با طول ۱۸ میلی‌متر در فشار محدود کننده  $200 \text{ kPa}$  و چگالی نسبی ۴۰٪ انرژی لازم برای وقوع روانگرایی نسبت به نمونه پایه ۲/۵ برابر شده است [۳۹].

خرم و رجیبی (۲۰۲۰) به بررسی تاثیر الیاف طبیعی بازالت در درصد‌های وزنی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد و با سه طول مختلف ۶، ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر و با توزیع تصادفی بر خصوصیات مکانیکی خاک رس شهر ری پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی و طول الیاف، مقاومت فشاری و کششی، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است [۴۰].

جهت رسیدن به یک مقاومت مشخص، استفاده از ژئولیت می‌تواند ضمن رسیدن به مقاومت مورد نظر تا حد قابل‌قبولی مصرف سیمان را کاهش، و به دنبال آن اثرات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی تولید سیمان را کاهش دهد. از سوی دیگر استفاده از ژئولیت به عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان در ایران با وجود معادن ژئولیت به خصوص در استان سمنان و با قیمت حدود ۴۵۰۰ تومان در بیشترین حالت و معادل  $0/18$  دلار به ازای هر کیلوگرم و جایگزینی آن با درصدی از سیمان با قیمت حدود ۴۳۶ تومان در بیشترین

### ۳-۱- خاک ماسه‌ای

در این پژوهش از دو نوع خاک ماسه‌ای استفاده شده است. خاک نوع اول، غیریکنواخت و با متوسط اندازه ذرات  $1/8 \text{ mm}$  و خاک نوع دوم، یکنواخت و با متوسط اندازه ذرات  $2/36 \text{ mm}$  است که از کارخانه آسفالتی واقع در شهرک شکوهیه قم برداشت شده است. نمودار دانه‌بندی هر دو خاک، در شکل ۲ و مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۳-۲- سیمان

در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه نینزار قم مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق [۴۷] 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  $3081 \text{ gr/cm}^2$  می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۳ آمده است.

### ۳-۳- 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 ۴ و ۵ آمده است.

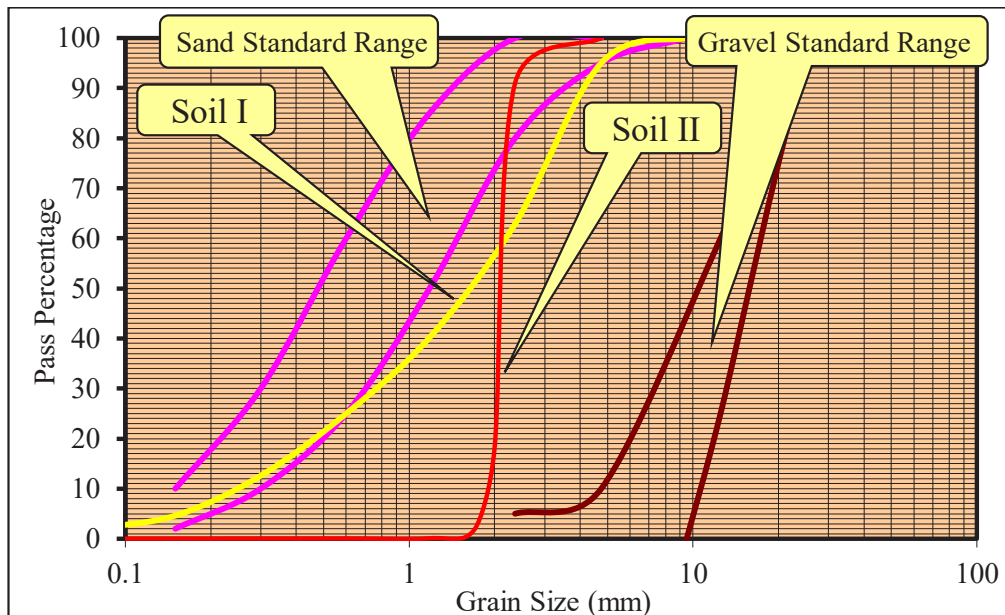
### جدول ۱. برنامه آزمایشگاهی

Table 1. Laboratory program

متغیر	جزئیات
نوع خاک	SP - SW
نوع سیمان	تیپ II
مقدار سیمان	۴ درصد
نوع زئولیت	کلینوپتیلولیت
مقدار زئولیت	۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد
نوع الیاف	پلی پروپیلن
مقدار الیاف	۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد
زمان عمل‌آوری	۱۴، ۷ و ۲۸ روز

### ۳- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل دو نوع خاک ماسه‌ای، سیمان، زئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای

### 2. Sandy soil grading diagram

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک‌های ماسه‌ای

Table 2. Physical characteristics of sandy soils

ویژگی	ماسه نوع I	ماسه نوع II	استاندارد
نوع خاک	SW	SP	ASTM D2487 [۴۱]
$\omega$ (%)	۱۱/۱	۸/۴۳	ASTM D698 [۴۲]
$\gamma_{d, \max}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۰۱	۱/۵۹	
$\gamma_{d, \min}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۸۵	۱/۴۷	ASTM D4253-4 و ۴۴ [۴۳]
$e_{\max}$	۰/۴۳۲	۰/۸۰۶	
$e_{\min}$	۰/۳۱۸	۰/۶	
D <sub>50</sub> (mm)	۱/۸	۲/۳۶	
C <sub>U</sub>	۸/۴	۱/۳۴	ASTM C136 [۴۵]
C <sub>c</sub>	۱/۲۱	۰/۹۲۵	
G <sub>s</sub>	۲/۶۳	۲/۶۵	ASTM D854 [۴۶]

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان نیزار قم

Table 3. Chemical characteristics of Qom Neyzar cement

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

جدول ۴. مشخصات فیزیکی زئولیت کلینوپتیلولیت

Table 4. Physical characteristics of clinoptilolite zeolite

ویژگی	واحد	مقدار
سختی	mmohs/cm	۰/۶۸۳
وزن مخصوص	gr/cm <sup>3</sup>	۰/۶۴
اندازه متوسط ذرات	$\mu$	۳۸
جذب آب	%	۶۵

جدول ۵. مشخصات شیمیایی زئولیت کلینوپتیلولیت

Table 5. Chemical characteristics of clinoptilolite zeolite

ترکیب شیمیایی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی پروپیلن

Table 6. Physical and chemical properties of polypropylene fibers

ویژگی	استحکام	ظرافت	دمای ذوب	مدول الاستیک	جذب آب	مقاومت کششی	وزن مخصوص	رنگ	طول
واحد	gr/denier	denier	°C	GPa	%	KPa	gr/cm <sup>3</sup>	-	mm
مقدار	۳/۵-۴	۳	۱۶۵	۲/۷	۰	۴۰۰	۰/۹۱	سفید	۱۲

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 ۴). فشردن دانه‌های جامد خاک در داخل هم و پر کردن فضای خالی بین دانه‌ها باعث افزایش وزن مخصوص خشک و کاهش نسبت تخلخل خاک می‌شود. وجود آب تا میزان مشخصی، سبب تسهیل این عملیات می‌گردد. به دست آوردن این حد رطوبت و وزن مخصوص خشک بیشینه خاک پس از به کار بردن میزان معینی انرژی کوبشی، هدف مهم آزمایش تراکم است. با انجام تراکم در خاک، آب اضافه شده جایگزین هوایی شده است که در خلل و فرج ذرات خاک وجود دارد. بعد از رسیدن به درصد بالایی از اشباع، آب فضاهایی که می‌تواند توسط ذرات خاک پر شود، اشغال می‌کند و مقدار هوای محبوس شده در خاک اساساً ثابت می‌ماند. بنابراین یک مقدار بهینه آب برای خاک مورد نظر و عمل تراکمی که بیشینه وزن مخصوص خاک را می‌دهد، وجود دارد. با افزایش درصد رطوبت خاک (OMC) و افزایش امکان غلتیدن ذرات خاک روی هم، مقاومت خاک کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش وزن مخصوص خشک خاک (MMD) و متراکم شدن ذرات خاک، مقاومت خاک افزایش می‌یابد.

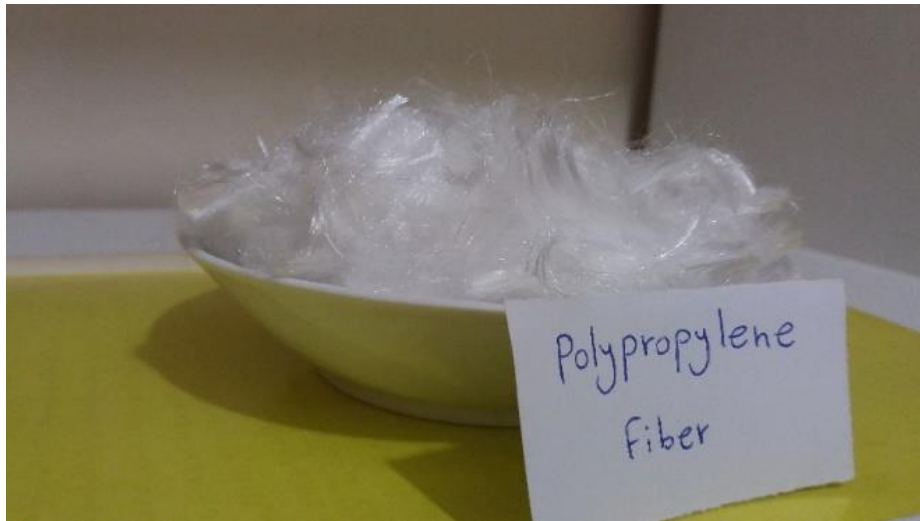
۳-۴ الیاف پلی پروپیلن (Poly Propylene Fiber)

الیاف پلی پروپیلن با فرمول شیمیایی  $(C_3H_6)_n$  از طریق پلیمریزاسیون پروپیلن به صورت یک پلیمر خطی تهیه می‌گردند و به اختصار PPF نامیده می‌شوند. از آنجا که خاک‌های دانه‌ای قابلیت تحمل و انتقال بارهای کششی را ندارند استفاده از الیاف پلی پروپیلن می‌تواند مقاومت کششی خاک را افزایش دهد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی پروپیلن در جدول ۶ ذکر شده است. همچنین تصویری از الیاف مصرفی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴- روند آزمایش تراکم (ASTM D698)

آماده‌سازی نمونه‌ها بلافاصله پس از اتمام مخلوط و آزمایش تراکم بر اساس استاندارد [۴۲] ASTM D698 انجام شد. در هر طرح و برای هر دو نوع خاک پنج نمونه برای به دست آوردن رطوبت بهینه برای تراکم استفاده گردید. مقادیر مختلف از دو نوع خاک ماسه‌ای، سیمان، زئولیت و الیاف پلی پروپیلن 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 لایه، هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم و





شکل ۳. الیاف پلی پروپیلن

Fig. 3. Polypropylene fibers



شکل ۴. مراحل انجام آزمایش تراکم - الف) تجهیزات لازم، ب) خاک مورد آزمایش، ج) کوبش خاک با چکش

Fig. 4. Steps for compaction test - a) necessary equipment, b) tested soil, c) hammering



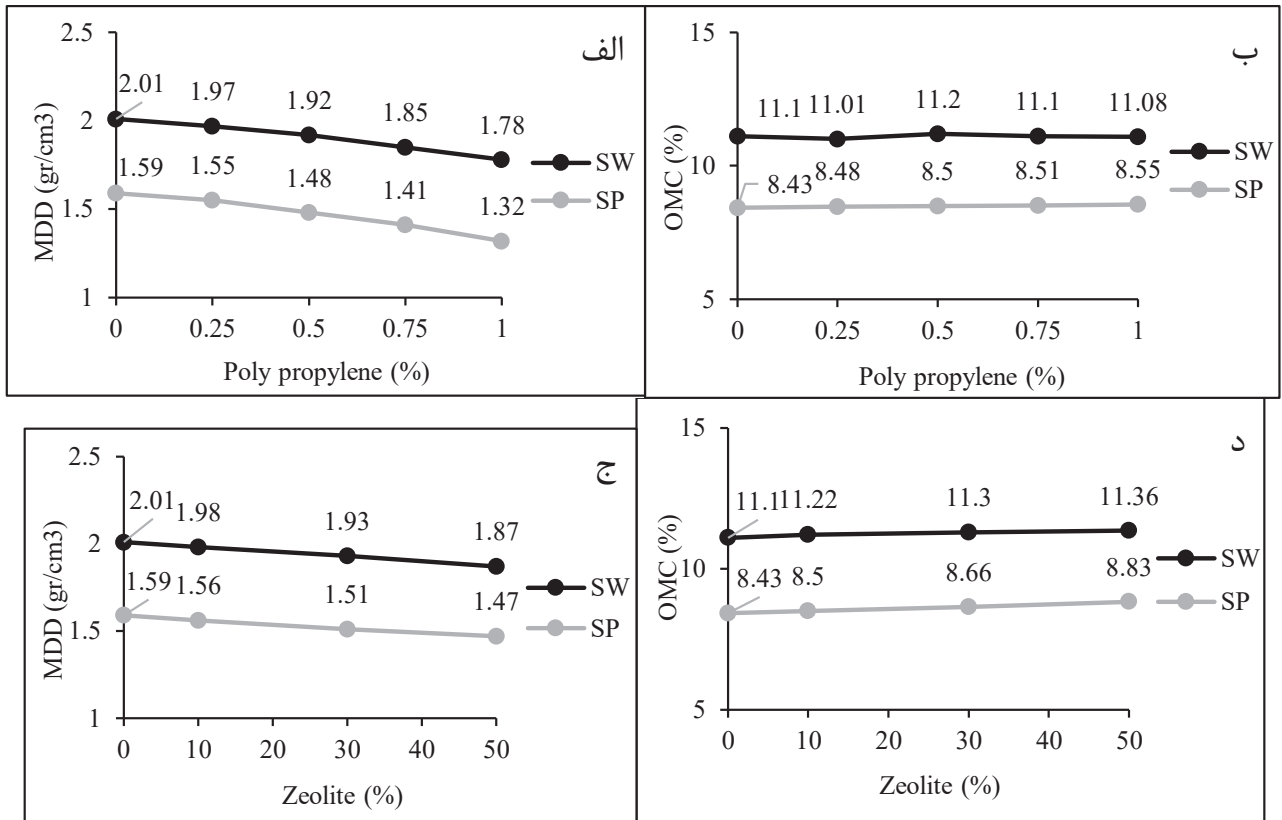
شکل ۵. مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها - الف) قالب آزمایشگاهی PVC، ب) عمل‌آوری نمونه‌ها داخل پوشش مرطوب، ج) نمونه‌های خارج شده از پوشش مرطوب، د) تصویری از یک نمونه قبل از انجام آزمایش تک‌محوری

Fig. 5. Steps for making and curing samples - a) PVC mold, b) processing of samples inside wet coating, c) samples removed from wet coating, d) a sample before UCS test

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 تک‌محوری و جلوگیری از تغییرات 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 ۵ نشان داده شده است.

##### ۵- روش ساخت نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا به مدت ۱۵ دقیقه سیمان و زئولیت را با خاک‌های ماسه‌ای به صورت خشک به وسیله همزن برقی با سرعت پایین مخلوط کرده، سپس الیاف پلی‌پروپیلن را به ترکیب اضافه نموده تا به خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهد. سپس آب مقطر را به اضافه نموده تا جایی که ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود. 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 تک‌محوری مطابق با استاندارد [۴۸] ASTM D2166 نسبت طول به



شکل ۶. نتایج آزمایش تراکم - الف) وزن مخصوص خشک با افزودن الیاف، ب) رطوبت بهینه با افزودن الیاف، ج) وزن مخصوص خشک با افزودن زئولیت، د) رطوبت بهینه با افزودن زئولیت

Fig.6. Results of compaction test - a) dry density by adding fibers, b) optimum moisture content by adding fibers, c) dry density by adding zeolite, d) optimum moisture content by adding zeolite

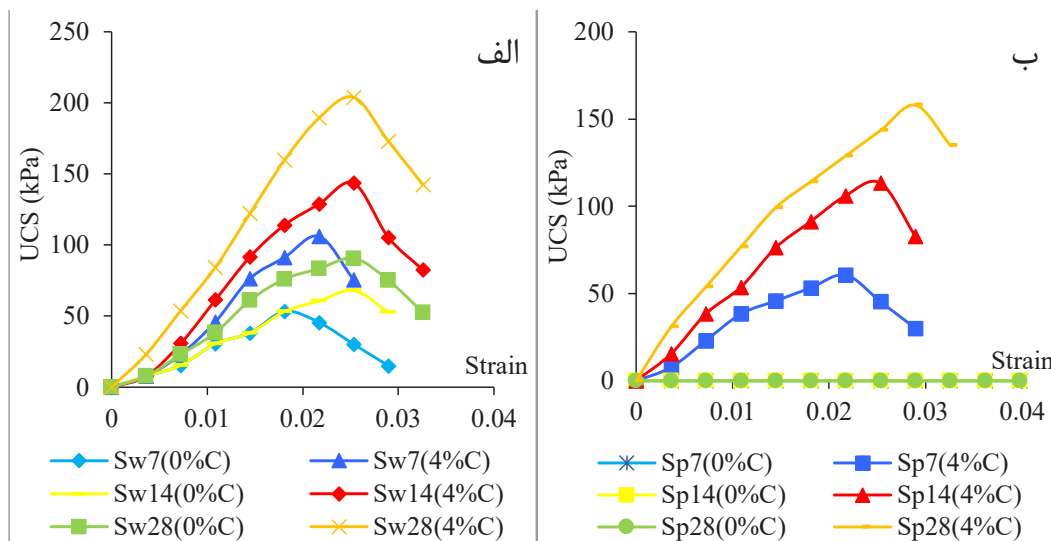
## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱ نتایج آزمایش تراکم

طبق نتایج آزمایش تراکم (شکل ۶)، با افزودن ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به ماسه خوب دانه بندی (SW) و ۱ درصد به ماسه بد دانه بندی (SP)، مقدار رطوبت بهینه (OMC)، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. البته این میزان افزایش به دلیل عدم جذب آب الیاف، خیلی محسوس نیست و به نوعی الیاف پلی پروپیلن تاثیری در مقدار رطوبت بهینه خاک ندارد. از طرفی با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) در هر دو نوع خاک، کاهش یافته است. این کاهش در وزن مخصوص خشک خاک به دلیل چگالی پایین الیاف نسبت به خاک است. همچنین با افزایش میزان جایگزینی زئولیت به جای سیمان، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) به دلیل وزن کم زئولیت، در هر دو نوع خاک کاهش یافته است. این در حالی است که رطوبت بهینه نمونه (OMC) به دلیل خاصیت جذب آب زئولیت افزایش یافته است.

### ۶-۲ نتایج آزمایش تک محوری با افزودن سیمان

پس از عمل آوری، 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 عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمایش تک محوری در ماسه خوب دانه بندی (الف) و ماسه بد دانه بندی (ب) با افزودن سیمان، تنش و کرنش گسیختگی خاک با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافته است. ماسه بد دانه بندی بدون افزودن سیمان، مقاومتی از خود نشان نداده است. از طرفی با مقایسه نتایج آزمایش تک محوری در این دو خاک، می‌توان مشاهده کرد که کرنش گسیختگی ماسه بد دانه بندی مقدار اندکی از ماسه خوب دانه بندی بیشتر است؛ در حالی که تنش کمتری را تحمل می‌کند. علت آن می‌تواند فضای خالی بیشتر بین ذرات ماسه بد دانه بندی باشد. بنابراین در کرنش تقریباً برابر، ماسه خوب دانه بندی به علت داشتن ریزدانه دارای تنش گسیختگی بیشتری است.



شکل ۷. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در الف) ماسه SW - ب) ماسه SP در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

Fig. 7. Stress-strain diagram of specimens stabilized by cement in a) SW sand - b) SP sand (7, 14 and 28 days curing)

ریزدانه سبب اختلاط بهتر سیمان و زئولیت و چسبندگی بیشتر مواد حاصل با ذرات درشت خاک می‌شود.

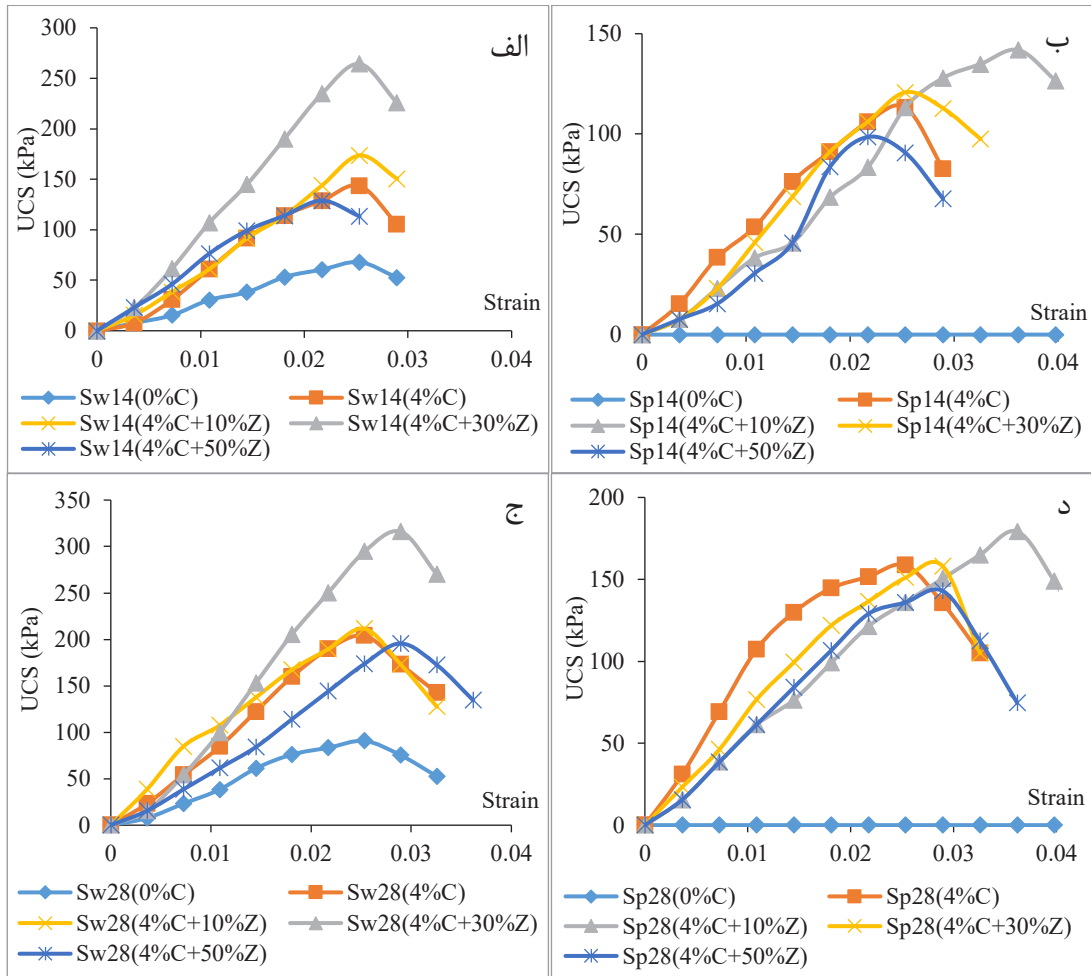
همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزودن سیمان به ماسه خوب دانه‌بندی نسبت به ماسه بد دانه‌بندی در طول زمان عمل‌آوری، شیب تندتری در افزایش مقاومت تک‌محوری و در نتیجه تنش گسیختگی نمونه‌ها دارد. همچنین شیب بیشتر در افزایش مقاومت تک‌محوری در صورت افزودن زئولیت بهینه و جایگزینی آن به جای سیمان که در ماسه خوب دانه‌بندی ۳۰٪ و در ماسه بد دانه‌بندی ۱۰٪ به دست آمد نیز برقرار است.

#### ۴-۶ نتایج آزمایش تک‌محوری با افزودن الیاف پلی پروپیلن

نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سیمانی با جایگزینی مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد و همچنین ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن در ماسه خوب دانه‌بندی و بد دانه‌بندی در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج آزمایش تک‌محوری نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌های سیمانی باعث افزایش قابل توجه تنش و کرنش گسیختگی هر دو نمونه خاک ماسه‌ای می‌شود. افزایش در کرنش نمونه‌ها ناشی از رشته‌های الیاف پلی پروپیلن است که باعث برقراری اتصال بین ذرات دورتر خاک با یکدیگر شده و در لحظه گسیختگی نمونه‌ها، الیاف

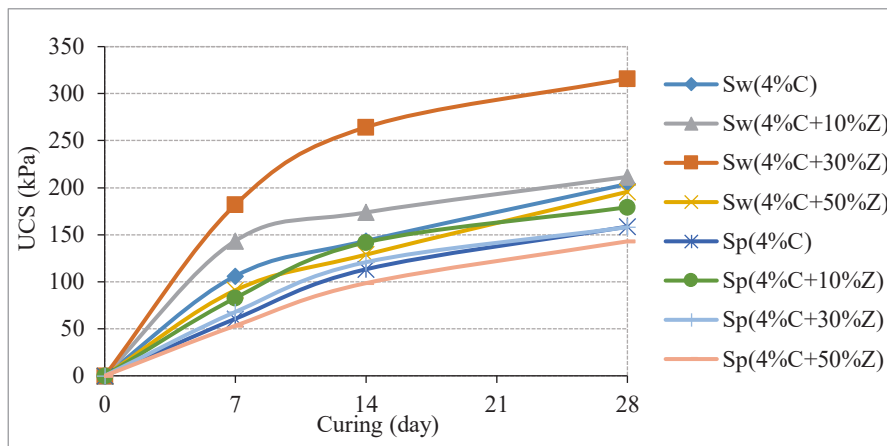
#### ۳-۶ نتایج آزمایش تک‌محوری با افزودن زئولیت

نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سیمانی با جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد زئولیت در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۸ 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، بیشینه تنش تک‌محوری با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان بیشتر از نمونه‌های بدون زئولیت است و با افزایش درصد جایگزینی زئولیت از مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاسته شده است. همچنین کرنش گسیختگی نمونه تثبیت شده با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت، بیشتر از نمونه بدون زئولیت است که نشان دهنده افزایش رفتار نرم و شکل‌پذیر نمونه‌های زئولیتی نسبت به نمونه‌های سیمانی است. از طرفی در ماسه بد دانه‌بندی، بیشینه تنش تک‌محوری با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان بیشتر از نمونه‌های بدون زئولیت است و با افزایش درصد جایگزینی زئولیت از مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاسته شده است. همچنین کرنش گسیختگی نمونه تثبیت شده با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت، بیشتر از نمونه بدون زئولیت است که نشان دهنده افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های زئولیتی نسبت به نمونه‌های سیمانی است. اختلاف در مقدار بهینه جایگزینی زئولیت به جای سیمان در ماسه خوب دانه‌بندی (SW) و بد دانه‌بندی (SP) می‌تواند ناشی از وجود ریزدانه در ماسه خوب دانه‌بندی باشد.



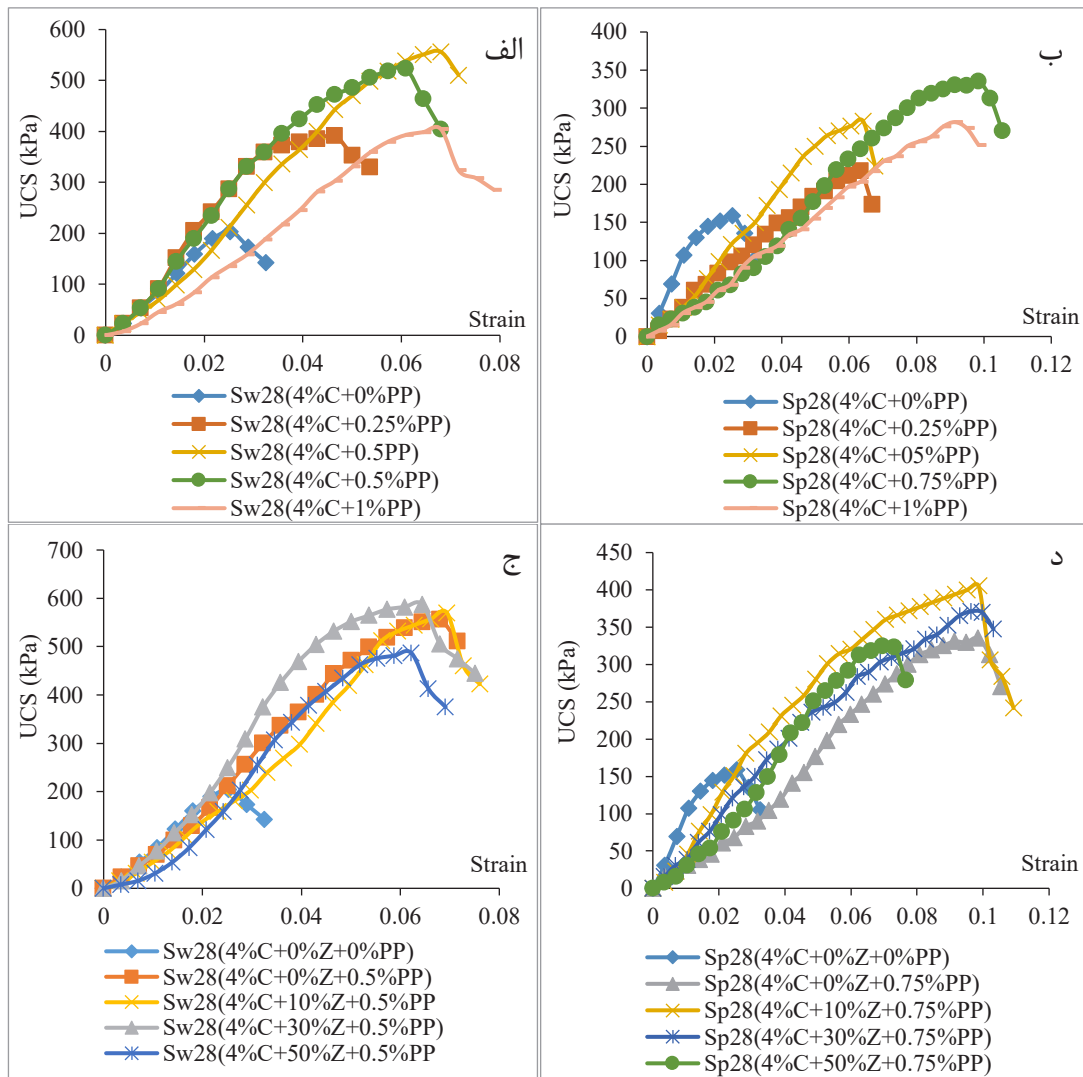
شکل ۸. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت در (الف) ماسه SW در عمل‌آوری ۱۴ روز - (ب) ماسه SP در عمل‌آوری ۱۴ روز - (ج) ماسه SW در عمل‌آوری ۲۸ روز و (د) ماسه SP در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 8. Stress-strain diagram of specimens stabilized by cement and zeolite in a) SW sand (14 days curing), - b) SP sand (14 days curing), - c) SW sand (28 days curing), d) SP sand (28 days curing)



شکل ۹. مقایسه نتایج نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت در ماسه SW و ماسه SP در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

Fig. 9. Comparison of the results of samples stabilized by cement and zeolite in SW sand and SP sand at 7, 14 and 28 days curing time

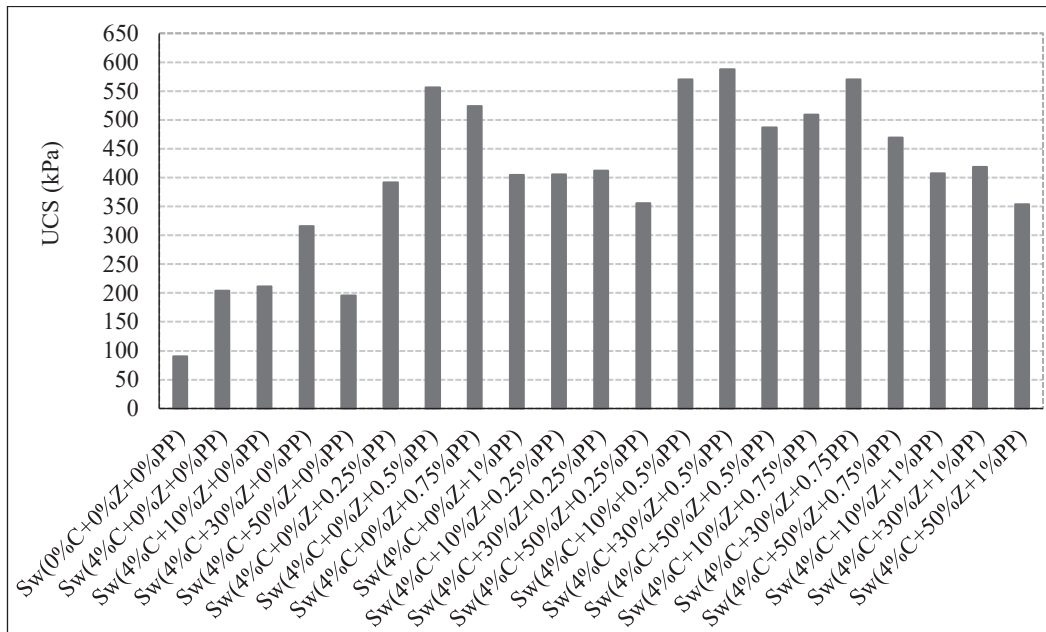


شکل ۱۰. نمودار تنش- کرنش حالات بهینه در الف) ماسه SW تثبیت شده با سیمان و الیاف، ب) ماسه SP تثبیت شده با سیمان و الیاف، ج) ماسه SW تثبیت شده با سیمان، زئولیت و الیاف در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 10. Stress-strain diagram of optimum states in a) SW sand stabilized by cement and fibers, b) SP sand stabilized by cement and fibers, c) SW sand stabilized by cement, zeolite and fibers, d) SP sand stabilized by cement, Zeolite and fibers at 28 days curing

۴-۵- مقایسه نتایج آزمایش تک‌محوری در ماسه خوب دانه‌بندی نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری در طرح بهسازی و تثبیت ماسه خوب دانه‌بندی با استفاده از سیمان، زئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزودن ۴٪ سیمان به این خاک، مقاومت تک‌محوری از ۶۲/۹۰ kPa به ۹۱/۲۰۳ kPa افزایش یافته است. یعنی مقاومت تک‌محوری نمونه بهسازی شده بیش از ۲ برابر داشته است. همچنین با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به

به کشش افتاده و مقاومت بیشتری در برابر گسیختگی از خود نشان می‌دهد. در ماسه خوب دانه‌بندی (SW) درصد بهینه الیاف ۵/۰ درصد وزن کل خاک است و در ماسه بد دانه‌بندی (SP) این مقدار ۷۵/۰ درصد است. علت این اختلاف، وجود ریزدانه در خاک خوب دانه‌بندی است که فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر کرده است و چسبندگی بیشتری در نمونه ایجاد می‌کند. بنابراین در حین اختلاط الیاف با خاک، باعث چسبندگی الیاف و ریزدانه شده و در نتیجه به ایجاد توده‌های پراکنده از الیاف در نمونه می‌انجامد.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش تک‌محوری در ماسه خوب دانه‌بندی و عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 11. Results of unconfined test in well-grained sandy soil (SW) and 28 days curing

است. حال با افزودن ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن به ماسه تثبیت شده با ۰/۴٪ سیمان، مقاومت تک‌محوری خاک به ۳۳۵/۳۳ kPa رسیده است یعنی ۰/۸۷٪ افزایش در مقاومت داشته است. از طرفی با افزودن ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن به طرح ۰/۴٪ سیمان و ۰/۱۰٪ جایگزینی زئولیت، مقاومت تک‌محوری خاک به ۴۰۵/۰۷ kPa افزایش یافته است که ۰/۲۰٪ افزایش در مقاومت را نشان می‌دهد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

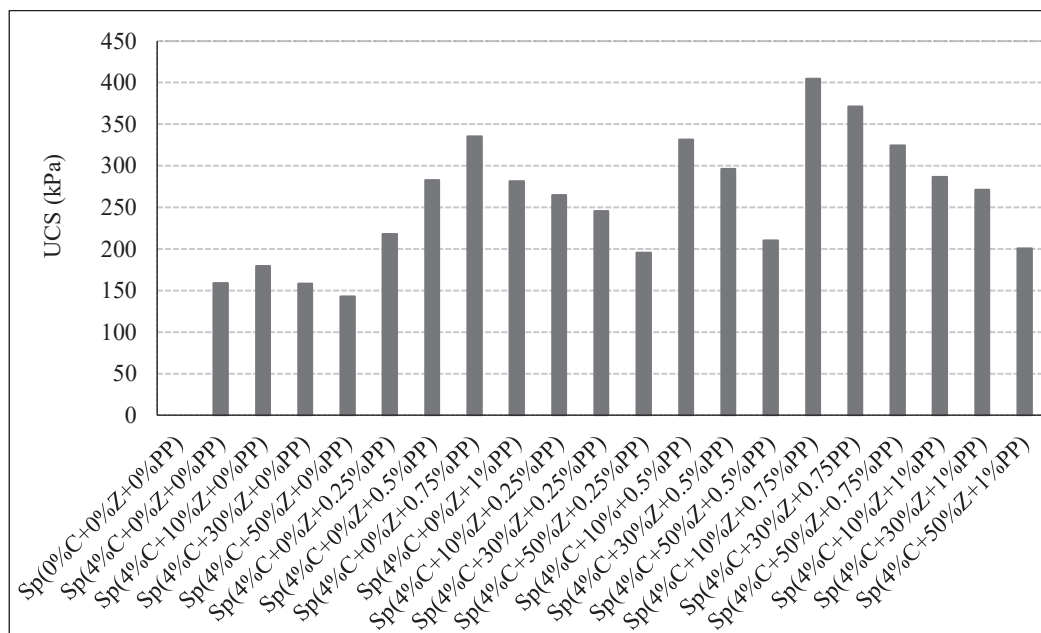
پژوهش حاضر حاصل آزمایش‌های انجام شده در زمینه ژئوتکنیک زیست‌محیطی است. استفاده از زئولیت به منظور جایگزینی سیمان به همراه افزودن الیاف پلی‌پروپیلن علاوه بر کاهش میزان تولید و مصرف سیمان، جنبه زیست‌محیطی طرح را دو چندان نموده است. نتایج این پژوهش عبارت است از:

۱- طبق نتایج آزمایش تراکم، با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به هر دو ماسه SW و SP به دلیل عدم جذب آب در الیاف، تغییر محسوسی در مقدار رطوبت بهینه (OMC) خاک مشاهده نشد و می‌توان گفت الیاف پلی‌پروپیلن

جای سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه ۳۱۶/۰۲۲ kPa رسیده است یعنی بیش از ۳ برابر افزایش در مقاومت داشته است. حال با افزودن ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن به ماسه تثبیت شده با ۰/۴٪ سیمان، مقاومت تک‌محوری خاک به ۵۵۶/۰۵۷ kPa رسیده است یعنی بیش از ۵ برابر افزایش در مقاومت داشته است. از طرفی با افزودن ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن به طرح ۰/۴٪ سیمان و ۰/۳۰٪ جایگزینی زئولیت، مقاومت تک‌محوری خاک به ۵۸۷/۱۹ kPa افزایش یافته است.

#### ۶-۶- مقایسه نتایج آزمایش تک‌محوری در ماسه بد دانه‌بندی

نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری در طرح بهسازی و تثبیت ماسه بد دانه‌بندی با استفاده از سیمان، زئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این خاک بدون افزودن سیمان، مقاومتی از خود نشان نداده است و با افزودن ۰/۴٪ سیمان به این خاک، مقاومت تک‌محوری به ۱۵۸/۶ kPa رسیده است. همچنین با جایگزینی ۰/۱۰٪ زئولیت به جای سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه ۱۷۹/۲۳ kPa رسیده است یعنی ۰/۱۳٪ افزایش در مقاومت داشته



شکل ۱۲. نتایج آزمایش تک‌محوری در ماسه بد دانه‌بندی و عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 12. Results of unconfined test in poorly grained sandy soil (SP) and 28 days curing

(SP) مقاومت تک‌محوری و کرنش گسیختگی خاک نسبت به نمونه‌های سیمانی به ترتیب در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، ۲۱۸ و ۱۴۷ درصد و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، ۱۷۲ و ۱۲۲ درصد افزایش یافته است. رشته‌های الیاف پلی‌پروپیلن باعث برقراری اتصال بین ذرات دورتر خاک با یکدیگر شده و در لحظه گسیختگی نمونه، الیاف به کشش افتاده و مقاومت بیشتری در برابر گسیختگی از خود نشان می‌دهد.

۴- در طرح افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و زئولیت، بهینه‌ترین حالت اختلاط در ماسه (SW) مربوط به طرح ۴٪ سیمان، ۳۰٪ جایگزینی زئولیت و ۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است که نسبت به طرح بدون جایگزینی زئولیت، ۵۷/۵٪ و نسبت به طرح بدون الیاف، ۸۵/۸۱٪ افزایش در مقاومت تک‌محوری نشان می‌دهد. در حالی که بهینه‌ترین حالت اختلاط در ماسه (SP) مربوط به طرح ۴٪ سیمان، ۱۰٪ جایگزینی زئولیت و ۷۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بوده است که نسبت به طرح بدون جایگزینی زئولیت، ۲۰/۸٪ و نسبت به طرح بدون الیاف، ۱۲۶٪ افزایش در مقاومت تک‌محوری نشان می‌دهد.

تأثیری در مقدار رطوبت بهینه خاک ندارد. از طرفی با افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن، به علت چگالی پایینی که دارند، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) در هر دو نوع خاک، کاهش یافته است. همچنین با افزایش میزان جایگزینی زئولیت به جای سیمان، بیشینه وزن مخصوص خشک (MDD) به دلیل وزن کم زئولیت، در هر دو نوع خاک کاهش یافته است. این در حالی است که رطوبت بهینه نمونه (OMC) به دلیل خاصیت جذب آب زئولیت افزایش یافته است.

۲- درصد بهینه جایگزینی زئولیت به جای سیمان در ماسه (SW) و ماسه (SP) به ترتیب با ۱۰٪ و ۳۰٪ به دست آمده است. با این طرح جایگزینی، مقاومت تک‌محوری ماسه (SW) و (SP) نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی زئولیت به ترتیب در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، ۸۴ و ۲۹ درصد و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، ۵۴ و ۱۳ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزودن زئولیت به نمونه‌های سیمانی، کرنش گسیختگی نیز افزایش یافته است که نشان از رفتار نرم خاک در لحظه شکست است.

۳- با افزودن ۵٪ و ۷۵٪ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به ماسه (SW) و



- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Fertu. T, Gavrilesu. M, Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams, *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1) (2012) 867-878.
- [14] Riberio. F, Radrigues. L, Claude. N, *Zeolites science and technology*, Boston, Martinus Nijhoff Publishers, (1984).
- [15] Moshoeshe. M, Tabbiruka. M. S, Obuseng. V, A review of the chemistry, structure, properties and applications of zeolites, *American Journal of Materials Science*, 7(5) (2017) 196-221.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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, 121630 (2021).
- [19] 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).
- [20] Jafarpour. P, Ziaie Moayed. R, Kordnaeij. A, Behavior of
- [1] Salehi. A, Evaluation of resistance parameters of clay reinforced by polypropylene fibers and stabilized by polymer, Master Thesis in Civil Engineering, Geotechnics, Isfahan University of Technology, (2012) (in Persian).
- [2] Anagnostopoulos. C, Tzetzis. D, Berketis. K, Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils, *Geomechanics and Geoengineering*, 9(3) (2014) 241-251.
- [3] Anggraini. V, Asadi. A, Huat. B, Nahazanan. H, Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil, *Measurement*, 59 (2015) 372-381.
- [4] Changizi. F, Haddad. A, Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO<sub>2</sub> and recycled polyester fiber, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4) (2015) 367-378.
- [5] Gunaratne. M, *The foundation engineering handbook*, Taylor and Francis Group, CRC Press, (2006).
- [6] Mahdavi. R, Ajal Louyian. R, Biological comparison of sandy soil samples and improved samples, *International Conference on New Developments in Civil Engineering*, North University, Amol, (2017) (in Persian).
- [7] Esmailipour. E, The effect of recession on cement industry and solutions to exit from it, *Cement Technology Journal*, (2015) (in Persian).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Tobon. J, Restrepo. O, Paya. J, Comparative analysis of performance of portland cement blended with nano silica and silica fume, *Dyna Magazine*, 163 (2010) 37-48.

- Materials, 256 (2013) 112–115.
- [30] Demirbas. G, Stabilization of expansive soils using bigadic zeolite, PhD Thesis, University of METU, Ankara, Turkey, (2009).
- [31] Hoare. D, Synthetic fabrics soil filter, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 108(10) (1982) 1230-1246.
- [32] Arenzic. R, Chowdhury. R, Laboratory investigation of earth wall simultaneously reinforced by strips and random reinforcement, Geotechnical Testing Journal, 11(4) (1988) 241-247.
- [33] Wang. Y, Frost. J, Murray. J, Utilization of recycled fiber for soil stabilization, Proceedings of the Fiber Society Meeting, Guimaraes, Portugal, (2000) 59-62.
- [34] Boominathan. A, Hari. S, Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9) (2002) 1027–1033.
- [35] Kaya. A, Durukan. S, Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner, Applied Clay Science, 25 (2004) 83-91.
- [36] Mehrannia. N, Vafacian. M, Laboratory determination of soil strength characteristics mixed by fibers and comparison with Michalowski and Maher formulas, 6th International Congress of Civil Engineering, Semnan University, (2011) (in Persian).
- [37] Abedi. J, Soltanian. S, Gheysari. M, Influence of polypropylene fibers on mechanical properties of sand, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 9(1) (2015) 22-31 (in Persian).
- [38] Chegenizadeh. A, Keramatikerman. M, Nikraz. H, Liquefaction resistance of fibre reinforced low-plasticity silt, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 104 (2018) 372–377.
- [39] Fardad Amini. P, Noorzad. R, Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing, Journal of Soil Dynamics and Earthquake zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12 (2020) 149-159.
- [21] Mola-Abasi. 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.
- [22] MolaAbasi. H, Khajeh. A, Naderi Semsani. S, Effect of the ratio between porosity and  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on tensile strength of zeolite-cemented sands, Journal of Materials in Civil Engineering, 30(4) (2018) 04018028.
- [23] 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).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] Mola-Abasi. H, Shooshpasha. I, Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 (2016) 746-752.
- [28] Hong. S, Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures, Master Thesis, USA, (2015).
- [29] Shi. J. X, The applications of zeolite in sustainable binders for soil stabilization, Applied Mechanics and

- methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [45] 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).
- [46] 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).
- [47] Annual Book of ASTM C150 Standards, Standard specifications for cements. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [48] 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)..
- Engineering, 104 (2018) 45-53.
- [40] Khorram. N, Rajabi. M, Effect of natural Basalt fibers on mechanical properties of clay Rey town, Journal of Civil Engineering Amirkabir, 52(10) (2020) 1-15 (in Persian).
- [41] Annual Book of ASTM D2487 Standards, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [42] Annual Book of ASTM D698 Standards, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012).
- [43] 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).
- [44] Annual Book of ASTM D4254 Standards, Standard test

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Amel Sakhi, R. Yousefi, A. A. Amooei, A. R. Karimi , *Experimental Study on the Effect of Adding Polypropylene Fibers on Soil Stabilized by Cement and Zeolite Replacement*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 1553-1572.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19684.7235



