

# تأثیر ترکیب ژئولیت و الیاف بر بهبود خصوصیات ژئومکانیکی خاک تثبیت شده با سیمان تحت چرخه‌های یخ و ذوب

مهدی صفا<sup>۱</sup>، امیررضا گودرزی<sup>۲\*</sup>، بهاره لרستانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دوره دکتری، رشته مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه آزاداسلامی، واحد همدان، همدان، ایران

۲. دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران

۳. دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاداسلامی، واحد همدان، همدان، ایران

a.goodarzi@iauh.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۵

## چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر استفاده ژئولیت همراه الیاف پلی‌پروپیلن در پایایی خصوصیات مهندسی خاک‌های نرم تثبیت شده با سیمان تحت چرخه‌های یخ و ذوب (F-T) بررسی شد. بدین منظور مقادیر صفر تا ۳۰ درصد وزنی، سیمان و مخلوط سیمان-ژئولیت (با نسبت‌های متفاوت)، بطور جداگانه به خاک مورد مطالعه اضافه، سپس با افزودن الیاف و عمل‌آوری تا ۹۰ روز، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ژئوتکنیکی در کنار آنالیزهای ریزساختاری صورت گرفت. نتایج بدست آمده موید آن است استفاده از مقادیر اندک سیمان می‌تواند سبب بهبود اولیه پارامترهای ژئومکانیکی خاک شود؛ اما با افزایش چرخه‌های F-T مقاومت نمونه‌ها گاهی تا ۶۰٪ کاهش می‌یابد. تأمین شرایط مطلوب، نیازمند مصرف زیاد سیمان و نگهداری طولانی بوده که علاوه بر افزایش هزینه تثبیت، رفتار مصالح را به شدت ترد شکن می‌کند. از طرفی، با افزودن ژئولیت (حداکثر تا یک چهارم سهم سیمان) با وجود امکان رشد ظرفیت باربری (تا ۱/۳ برابر)؛ اما همچنان مقاومت مصالح تحت چرخه‌های F-T افت زیادی نشان می‌دهد. مشاهده شد حضور الیاف در این سری از نمونه‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش پایایی رفتار خاک به ویژه در زمان‌های محدود نگهداری (کمتر از ۷ روز) و مقادیر کم افزودنی داشته و شاخص خرابی ناشی از فرآیند یخ و ذوب حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقاومت کششی سیستم اخیر (CZF) نسبت به سیمان تنها، بیش از ۱/۵ برابر بهبود و مقاومت پس‌ماند آن تا ۲۰۰٪ بیشتر است. علت این تغییرات با استناد به طیف‌های اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی، تشکیل ماتریس پیوسته‌تر خاک ناشی از گسترش نانو ساختارهای سیمانی و پیوند مستحکم الیاف با ذرات ارزیابی شد. در مجموع بر اساس نتایج حاصل، استفاده از ترکیب CZF، به دلیل امکان مصرف کمتر سیمان (حدود ۳۰٪) و همچنین کاهش زمان مورد نیاز عمل‌آوری (تا ۳ برابر)، به عنوان یک گزینه موثر برای بهسازی خاک‌های نرم تحت چرخه‌های یخ و ذوب، پیشنهاد می‌شود.

**واژگان کلیدی:** خاک نرم، سیمان، چرخه یخ و ذوب، ژئولیت، الیاف، بهبود خصوصیات ژئومکانیکی.

## ۱- مقدمه

نهشته‌های نرم رسی از جمله خاک‌های مسئله‌داری هستند که به دلیل مقاومت کم، قابلیت زیاد نشست و پتانسیل قابل ملاحظه آبستگي، می‌توانند سبب خسارات فراوانی برای سازه‌های مهندسی شوند [1-4]. رفتار اینگونه از مصالح بسیار پیچیده و تابعی از عوامل متعدد از جمله نوع و مشخصات کانی ساخت، ویژگی‌های مایع منفذی و شرایط سربار است [5-7]. طبق نتایج مطالعات گذشته، روش‌های مختلف فیزیکی-مکانیکی و شیمیایی مانند تثبیت الکتروکیتیک، مسلح‌سازی، جایگزینی یا ترکیب با خاک مرغوب و استفاده از مواد افزودنی برای رفع و کاهش مشکلات خاک‌های نرم پیشنهاد شده است [8-11]. به شکلی که بهسازی با ترکیبات متداول پایه کلسیمی (مانند آهک و سیمان) جزء راهکارهای رایج و ارزان برای مواجهه با این خاک‌ها است [12-13]. بطور کلی ساز و کار اصلاح خاک پس از اندرکنش با ماده افزودنی، وابسته به ویژگی‌های اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم و شرایط محیطی است [14-16]. در خاک‌های ریزدانه، واکنش‌های کوتاه مدت ناشی از انحلال افزودنی و افزایش فشار اسمز در مجاورت ذرات و همچنین جایگزینی یون‌های با ظرفیت بیشتر ماده اصلاح‌کننده به جای کاتیون‌های با ظرفیت کمتر خاک، می‌تواند سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه، نزدیک شدن ذرات به یکدیگر (تشکیل ساختار مجتمع) و در نتیجه بهبود رفتار مصالح شوند [17]. برخی از مواد نیز با افزایش pH محیط، باعث انحلال سطوح رسی شده که در صورت ترکیب با یون کلسیم آزاد در سیستم می‌توانند از طریق فعالیت پوزولانی، سبب تشکیل ژل‌های سیمانی مانند CAH<sup>۱</sup> و CSH<sup>۲</sup> شوند که بر اساس نتایج حاصل از پژوهش‌های قبل [3, 18] نقش به سزایی در جامدشدگی ذرات خاک و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی آن دارند. از طرفی وجود برخی محدودیت‌های فنی و اجرایی در زمینه کاربرد اینگونه از تثبیت‌کننده‌ها (مانند اثر مخرب سولفات و مواد آلی، رشد قیمت، انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای همزمان با تولید آنها، افزایش پتانسیل تردشکنی و همچنین کاهش کرنش

گسیختگی مصالح) موجب شده که پژوهشگران به دنبال مواد جایگزین با پیامد جانبی کمتر و در صورت امکان با تاثیرگذاری بیشتر باشند [4-6, 12, 15]. در این راستا ژئولیت طبیعی<sup>۳</sup> به دلیل یک سری ویژگی‌های خاص ساختاری، ابعاد کوچک، توانایی واکنش مناسب، دسترسی فراوان و هزینه اندک به عنوان یک گزینه مناسب برای ترکیب با آهک و یا سیمان پیشنهاد شده است [3, 19]. به شکلی که با وجود گستردگی پژوهشها در زمینه استفاده از ژئولیت برای اصلاح خاک‌ها مانند مطالعات چناربونی و همکاران [20]، جعفرپور و همکاران [21]، مریری و همکاران [22]، ملاعباسی و همکاران [23, 24] و رجبی و اردکانی [25] و همچنین کاربرد انواع فیبرهای طبیعی و مصنوعی برای بهبود مشخصات مکانیکی و کاهش پتانسیل تردشکنی خاک‌های تثبیت شده با مواد شیمیایی از جمله کارهای صورت گرفته توسط اکبری و همکاران [3]، روشن و همکاران [26]، آریال و کولای [27]، چوبیستی و همکاران [28]، وی و همکاران [29] و عربانی و حق‌شنو [30]، ولی تاکنون اثربخشی ترکیب سیمان-ژئولیت همراه الیاف در تثبیت خاک‌های نرم به طور دقیق بررسی و تحلیل نشده است. علاوه بر این، تغییر شرایط دمایی در مناطق سردسیر و امکان چرخه-های مکرر یخ و ذوب، نقش موثری بر پاسخ سیستم خاک-افزودنی داشته [9, 27, 31-32]؛ که در بسیاری از کارهای مورد اشاره در خصوص تاثیر ژئولیت، به این موضوع توجه نشده است. پس در پژوهش حاضر با افزودن جداگانه درصد‌های متفاوت سیمان و مخلوط سیمان-ژئولیت (با نسبت‌های مختلف جایگزین) به یک نمونه رس نرم طبیعی سعی شد با انجام مجموعه‌ای گسترده از آزمایش‌های مختلف، ضمن بررسی فرآیند اندرکنش خاک با مواد افزودنی مورد مطالعه و تعیین نسبت بهینه سیمان/ژئولیت، ساز و کار تاثیر چرخه‌های یخ و ذوب به ویژه از دیدگاه ریزساختاری تجزیه و تحلیل شود. همچنین، با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به سیستم، نقش همزمان تثبیت و مسلح‌سازی در افزایش پایایی ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت.

1. Calcium-aluminate-hydrate  
2. Calcium-silicate-hydrate

3. Natural zeolite

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

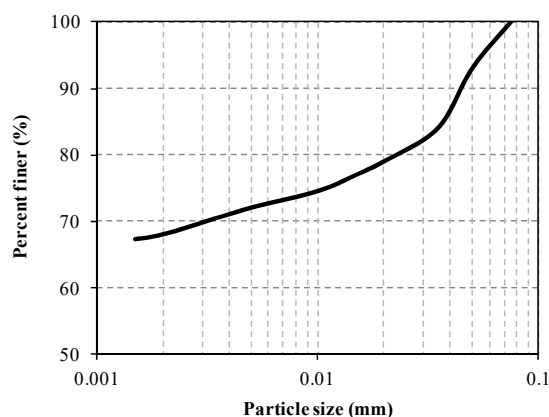


Fig. 1. Particle size distribution curves of the studied soil.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ II هگمتان

| Characteristics        | Quantity measured                                                                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mineral composition    | CaO=63.4, SiO <sub>2</sub> =21.5, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =4.9, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =3.8, MgO=1.5 |
| EC, mS/cm              | 10.86                                                                                                               |
| pH (in 1:20 ratio)     | 12.78                                                                                                               |
| SSA, m <sup>2</sup> /g | 0.31                                                                                                                |

Table 2. Physico-chemical properties of used cement.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت طبیعی مورد استفاده

| Characteristics        | Quantity measured                                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mineral composition    | SiO <sub>2</sub> =69.13, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =11.16, CaO=1.1, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.9, MgO=0.5 |
| EC, mS/cm              | 2.34                                                                                                                  |
| pH (in 1:20 ratio)     | 8.19                                                                                                                  |
| SSA, m <sup>2</sup> /g | 88.3                                                                                                                  |

Table 3. Physico-chemical properties of used zeolite.

با استناد با نتایج مطالعات گذشته [3, 9, 27]، از الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن (PP) با امکان توزیع پراکنده، برای مسلح کردن خاک استفاده شد. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف مصرفی به ترتیب برابر ۳۵۰ MPa و ۳۰ GPa و ۲/۷، قطر آنها ۱۹ μm و طولشان برابر ۱۲ میلی‌متر مدنظر قرار گرفت. به شکلی که با توجه به ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی این مطالعه، در بسیاری از پژوهش‌های قبل [36-38] عملکرد مطلوب در این طول گزارش شده است. طبق توضیحات بخش ۲-۲ در خصوص روش آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) و نتایج حاصل از آن روی نمونه‌های خاک مسلح شده با مقادیر مختلف PP، مقدار بهینه

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

با توجه به گزارش حضور کائولینیت به عنوان کانی غالب بیشتر نهشته‌های نرم رسی [4, 18, 27, 33] و به منظور اطمینان از یکسان بودن رفتار اولیه تمام نمونه‌ها (با هدف جلوگیری از بروز خطا حین آزمایش‌ها) از یک خاک طبیعی تقریباً خالص (بیشتر حاوی کائولینیت) برای این تحقیق استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه شناسایی مطابق با استاندارد ASTM [34] و دستورالعمل US EPA [35]، مشخصات رفتاری خاک مطابق جدول (۱) و منحنی دانه‌بندی آن طبق شکل (۱) بدست آمد. نتایج بیانگر نشست-پذیری قابل ملاحظه و ظرفیت باربری محدود این خاک بوده پس می‌توان آنرا به عنوان یک خاک نرم در نظر گرفت.

جدول ۱. مشخصات نمونه خاک نرم رسی مورد استفاده (مقدار UCS در

حالت دانسیته خشک حداکثر خاک است)

| Characteristics                        | Quantity measured      |
|----------------------------------------|------------------------|
| Mineral composition                    | Mainly kaolinite       |
| Exchangeable cations                   | Mainly Na <sup>+</sup> |
| Plasticity index (PI), %               | 19                     |
| Soil classification                    | CL                     |
| γ <sub>dmax</sub> , gr/cm <sup>3</sup> | 1.52                   |
| ω <sub>opt</sub> , %                   | 28.3                   |
| Compression index                      | 0.78                   |
| UCS, MPa                               | 0.19                   |

Table 1. Physico-chemical properties of soil sample.

سیمان مورد استفاده در این مطالعه، از نوع پرتلند تیپ II هگمتان بوده که ویژگی‌های آن و زئولیت طبیعی مورد استفاده نیز پس از انجام آزمایش‌های شناسایی اولیه، مطابق جداول (۲ و ۳) بدست آمد. مشاهده می‌شود مجموع مقادیر اکسیدهای آهن، سیلیس و آلومینیوم در زئولیت مصرفی بیش از ۸۱ درصد است؛ که از حداقل مقدار آن (۷۰٪) طبق استاندارد ASTM C618 بیشتر بوده، پس به عنوان یک پوزولان می‌توان از آن در ترکیب با سیمان استفاده نمود. لازم به ذکر است سیمان و ترکیب آن با زئولیت به طور جداگانه در یک بازه گسترده صفر تا ۳۰ درصد وزنی به خاک اضافه شدند.

خواهد شد. منتهی مراتب با توجه به اهداف این پژوهش، سعی شد با یکسان گرفتن مقدار اولیه تراکم در تمام نمونه‌ها امکان مقایسه نتایج بر حسب نوع و مقدار مواد افزودنی فراهم شود. پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از قالب به وسیله جک استاتیکی، به منظور جلوگیری از تبخیر و افت رطوبت اولیه نمونه‌ها و اطمینان از تکمیل واکنش‌های خاک-افزودنی، سطح آنها را بطور کامل با پارافیلیم پوشانده و درون ژرمیناتور با دمای کنترل شده  $25^{\circ}\text{C}$  و رطوبت ۸۵٪، هنگام دوره‌های زمانی ۱ تا ۹۰ روز نگهداری شدند. پس از تکمیل فرآیند عمل‌آوری و گذشت زمان موردنظر، مقدار UCS هر نمونه با استفاده از دستگاه تک‌محوری و سرعت بارگذاری  $1/2 \text{ mm/min}$  تعیین شد. همچنین بعد از فرآیند نمونه‌سازی مشابه مراحل مورد اشاره در فوق، مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم هر نمونه بر اساس روش عبدالجواد و همکاران [39] با اعمال نیرو روی سطح نمونه-های استوانه‌ای با دستگاه مدل Arma test و افزایش تدریجی بارگذاری تا زمان شکست نمونه، اندازه‌گیری شد. در ادامه و با توجه به اهداف پژوهش حاضر، مجموعه‌ای دیگر از نمونه‌ها حاوی مواد افزودنی مورد مطالعه همراه الیاف (به منظور فرآیند مسلح‌سازی) نیز تهیه شدند. بدین منظور و با هدف توزیع یکنواخت الیاف مصرفی در سیستم، پس از تهیه نمونه‌های همگن خاک-افزودنی مطابق توضیحات فوق، مقدار بهینه الیاف به تدریج به هر نمونه اضافه و توسط همزن مکانیکی بطور کامل مخلوط می‌شد. سپس مراحل ساخت و قرارگیری نمونه‌ها درون قالب فلزی و نگهداری آنها مطابق شرایط بدون فیبر دوباره انجام و پس از گذراندن دوره نگهداری لازم، آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و کششی غیرمستقیم روی این نمونه‌ها نیز صورت پذیرفت. از سوی دیگر، به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های متوالی یخ و ذوب (F-T) ۳ بر پاسخ سیستم خاک-افزودنی و پایداری مصالح، آزمایش F-T طبق استاندارد ASTM-D560 صورت پذیرفت. بدین منظور و با استناد به جزئیات کار در مطالعات قبل [40-42]، بعد از تهیه نمونه‌ها و فرآیند عمل‌آوری (شامل

الیاف برابر ۰/۷۵ درصد وزن خشک خاک انتخاب شد. در شکل (۲) تصویر مصالح مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود.

شکل ۲. تصویر خاک، سیمان، ژئولیت و الیاف مورد استفاده



Fig. 2. A view of soil, cement, zeolite and fibers used in this study

## ۲-۲- ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

با تعیین مقاومت‌های فشاری محدود نشده (UCS) ۱ و کششی غیرمستقیم، تأثیر مواد افزودنی مورد مطالعه بر مشخصات مکانیکی مصالح بررسی شد. اندازه‌گیری UCS، طبق استاندارد ASTM-D2166 صورت پذیرفت. به منظور تثبیت خاک ۲، ابتدا درصد‌های معین (صفر تا ۳۰ درصد وزن خشک خاک) مواد افزودنی مورد استفاده شامل سیمان تنها و ترکیب آن با ژئولیت (در درصد‌های جایگزینی ۱۰ تا ۷۰ درصد ژئولیت به جای سیمان) به خاک اضافه شدند. سپس با مخلوط کردن نمونه‌ها و افزودن آب معادل رطوبت بهینه، مجدد هر نمونه بطور کامل همگن و با دانسیته خشک بیشترین خاک مورد مطالعه طبق جدول (۱)، درون استوانه‌های فلزی به ارتفاع ۷۰ و قطر ۳۵ میلی‌متر متراکم شدند. شایان ذکر است بنابر نتایج پژوهش‌های گذشته [27, 33, 30] قطعاً حضور افزودنی سبب تغییر مشخصات تراکم

1. Unconfined compression strength
2. Soil stabilization

دلیل تشکیل نانوساختارهای سیمانی) نسبت داد. بر اساس نتایج شکل (۳) ملاحظه می‌شود با افزودن ۰.۵٪ سیمان و در صورت عمل‌آوری مناسب (به منظور تکمیل کلیه واکنش‌های خاک‌افزودنی)، مقاومت خاک بیش از ۱۲ برابر افزایش یافته و به حدود ۲ مگاپاسکال می‌رسد؛ به شکلی که طبق دستورالعمل<sup>۳</sup> ACI، می‌توان از آن برای مصالح زیراساس استفاده نمود [43].

شکل ۳. تاثیر مقدار افزودنی و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک نرم تثبیت با سیمان تنها

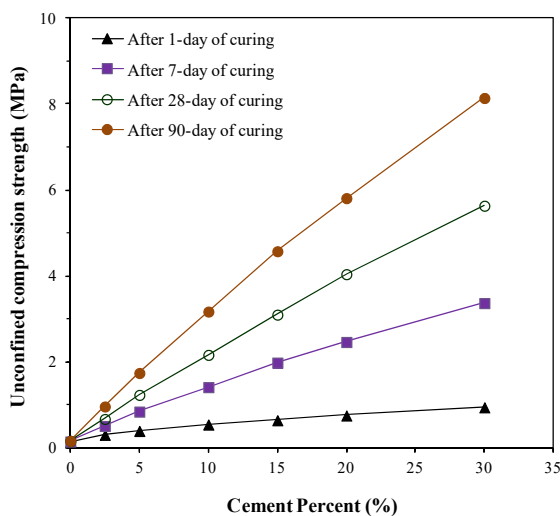


Fig. 3. Effect of additive content and time of curing on the compression strength of cemented soil

از سوی دیگر، با وجود بهبود اولیه مقاومت مصالح حتی در حضور مقادیر اندک افزودنی، نتایج ارائه شده در شکل (۴-ا) (نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان و عمل‌آوری شده تا ۷ روز) و شکل (۴-ب) (نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری شده تا ۲۸ روز) نشان می‌دهند فرآیند یخ و ذوب می‌تواند سبب افت قابل ملاحظه مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان تنها شود. مقایسه نتایج بدست آمده در شکل‌های (۴-ا و ۴-ب) بیانگر آنست که میزان تاثیر مخرب (کاهش مقاومت) چرخه‌های F-T بر رفتار نمونه‌های نگهداری شده در زمان‌های اندک و حاوی مقادیر کم افزودنی (به عبارتی با سطح جامدشدگی محدود) به مراتب بیشتر است. شایان ذکر است در مجموع برای نمونه‌های

نگهداری در دمای کنترل شده  $25^{\circ}\text{C}$  و رطوبت ۸۵٪ درون دستگاه ژرمیناتور، در دوره‌های زمانی موردنظر مطابق توضیحات قبل)، هر نمونه را دوباره درون پلاستیک بطور کامل محصور کرده و سپس در دو مرحله مجزا و طی زمان‌های ۲۴ ساعت در دماهای ابتدا  $20^{\circ}\text{C}$  (به منظور ایجاد شرایط یخبندان) و سپس  $25^{\circ}\text{C}$  (به منظور ذوب شدن یخ) نگهداری شد. انجام این کار به عنوان یک چرخه مدنظر و تا ۱۲ مرتبه تکرار و تغییرات UCS در هر چرخه تعیین شد. در این راستا با انجام آزمایش‌های مکانیکی و به منظور ارزیابی ساز و کار چرخه‌های F-T و بررسی بهتر اندرکنش خاک-افزودنی، آزمایش‌های ریزساختاری نیز انجام شدند. نمونه‌های لازم برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از تکه‌های خاک خرد باقی‌مانده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده اخذ و با استفاده از دستگاه مدل VEGA3 TESCAN (با درشت‌نمایی<sup>۲</sup> حداکثر تا ۲۰۰۰ برابر بر حسب شرایط نمونه) عکس‌برداری شدند. در ادامه، نمونه‌ها را کاملاً پودر کرده (عبوری از الک نمره ۲۰۰) و سپس با استفاده از دستگاه XRD مدل بروکر D8، طیف پراش اشعه ایکس آنها نیز تهیه شد.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

به منظور بررسی تاثیر سیمان بر رفتار مکانیکی رس نرم مورد مطالعه، ابتدا تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف سیمان، طبق توضیحات ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها تعیین و نتایج آن در شکل (۳) ارائه شد. نتایج حاصل بیانگر آنست که با افزودن مقدار سیمان و زمان بیشتر نگهداری، UCS افزایش می‌یابد. با استناد به مطالعات قبل [10, 11, 16] و نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌های ریزساختاری شکل (۸) علت این بهبود رفتار را می‌توان به ترکیبی از انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت (شامل ایجاد ساختار مجتمع ناشی از فرآیند تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز) و بلندمدت (جامدشدگی ذرات خاک به

1. Scanning electron microscope  
2. Magnification (SEM MAG)

ترک و گسترش آنها درون توده خاک ناشی از تغییر نیروهای داخلی و ایجاد ساختار جدید ذرات نسبت داد. در واقع هنگامی که دما کاهش می‌یابد، ابتدا رطوبت موجود در منافذ میکروسکوپی خاک منجمد و به دنبال آن منبسط شده که سبب تغییر الگوی تنش بین ذره‌ای، شکست پیوندهای سیمانی و در نتیجه ایجاد ترک‌های میکرو (از حالت شکل a-5 مربوط به نمونه اولیه حاوی ۱۰٪ سیمان به حالت شکل b-5 مربوط به نمونه خاک حاوی ۱۰٪ سیمان بعد از طی دو چرخه یخ و ذوب) در سیستم می‌شود. با توجه به شکل (5-5b)، وضعیت فوق با ایجاد نواحی برشی ضعیف سبب افت چشمگیر مقاومت خواهد شد [32, 44-45]. بر اساس تغییر وضعیت ساختار ظاهری نمونه‌ها در شکل (5-5c) (مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰٪ سیمان بدون اعمال چرخه F-T تا ۱۲ چرخه یخ و ذوب) مشاهده می‌شود با افزایش چرخه‌های F-T، ابعاد ریز ترک‌ها (فضای خالی بین ذرات) بیشتر و با فراهم شدن امکان ایجاد عدسی‌های یخی، منجر به ناپیوستگی‌های ماکروسکوپی و به دنبال آن کاهش بیشتر مقاومت می‌شود. به شکلی که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (4-a و 4-b)، جلوگیری از بروز ناپایداری (کاهش) زیاد در ویژگی‌های مکانیکی مصالح تحت چرخه‌های یخ-ذوب و تأمین سطح مقاومت توصیه شده توسط ACI، نیازمند مصرف زیاد افزودنی و حداقل ۲۸ روز عمل-آوری با هدف رشد کافی نانو ساختارهای سیمانی برای اتصال مناسب ذرات است. این شرایط علاوه بر افزایش هزینه اقتصادی طرح و آثار مخرب زیست‌محیطی به دلیل رشد مصرف سیمان، مطابق شکل (۶) سبب رفتار ترد (کاهش قابل ملاحظه مقاومت پسماند بعد از پیک گسیختگی) به دلیل افزایش نرخ جامدشدگی مصالح نیز خواهد شد. به عنوان نمونه طبق نمودار تنش-کرنش نمونه حاوی ۳۰ درصد سیمان، میزان کاهش مقاومت پیک حدود ۴۰٪ است. این رفتار در بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی مانند دیوارهای حائل و روسازی می‌تواند منجر به خسارات فراوانی شود [9, 16, 29].

خاک حاوی ۲/۵ تا ۳۰٪ سیمان در زمان‌های ۷ روز (شکل 4-a) و ۲۸ روز (شکل 4-b)، مقاومت فشاری خاک حدود ۴۰ درصد کم شده است. این یافته با نتایج حاصل از مطالعات قبل [9, 44-47] مبنی بر امکان کاهش مقاومت خاک تثبیت شده بر اثر چرخه‌های F-T همخوانی مناسبی دارد (مقدار افت مقاومت در مطالعه لی و همکاران [44] و لیو و همکاران [45] حدود ۳۵٪، لو و همکاران [46] حدود ۵۰٪ و ساجیلی و دایان [9] و بز و سزر [47]، مقدار افت مقاومت مصالح ریزدانه تثبیت شده با آهک را گاهی بیش از ۷۰ درصد گزارش کرده‌اند).

شکل ۴. تاثیر فرآیند یخ-ذوب بر کاهش مشخصات مکانیکی مصالح حاوی سیمان تنها عمل‌آوری شده در زمان‌های مختلف

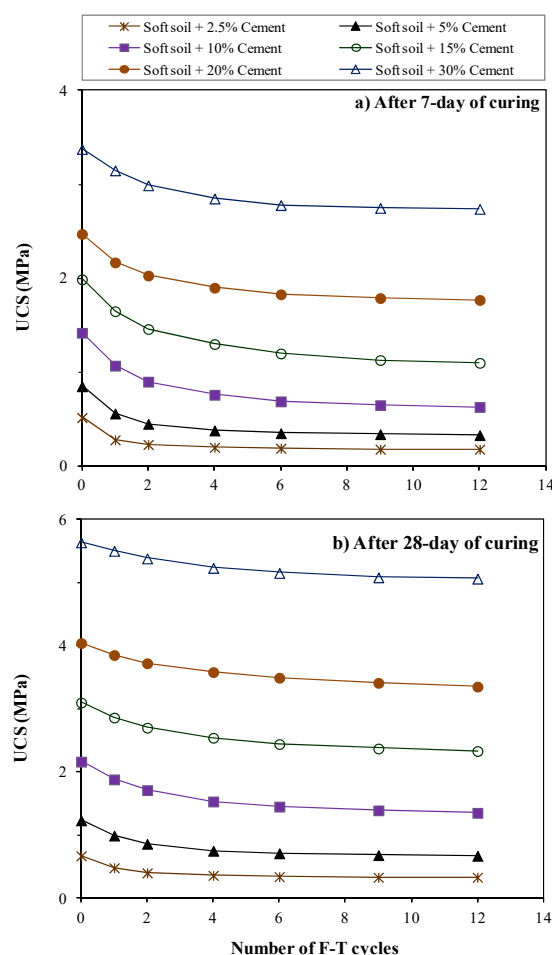


Fig. 4. Effect of F-T cycles on the soil mechanical performance

با استناد به تصاویر ارائه شده در شکل (5)، علت افت مقاومت خاک تحت چرخه‌های F-T را می‌توان به دلیل بروز

شکل ۶. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تنها

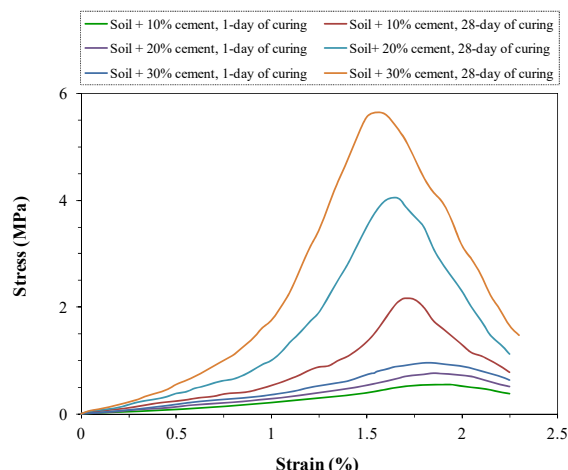


Fig. 6. Stress-strain relationship curves of cemented soil samples

در ادامه پژوهش حاضر، با جایگزین کردن زئولیت به جای بخشی از سیمان (با هدف استفاده کمتر سیمان) و همچنین افزودن الیاف به سیستم و مسلح‌سازی آن، امکان مقابله با مشکلات فوق‌الذکر مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس ابتدا در شکل (a-۷) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های متفاوت ترکیب سیمان-زئولیت (CZ) با نسبت‌های مختلف جایگزینی ۱۰ تا ۷۰ درصد زئولیت به جای سیمان پس از ۷ روز عمل‌آوری و در شکل (b-۷) تغییرات مقاومت فشاری همین سری از نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری آورده شده است. نتایج ارائه شده بیانگر آنست که در هر دو سری از شرایط نگهداری موردنظر، افزودن زئولیت به نمونه‌ها (حداکثر تا حدود ۲۵٪ سهم سیمان) می‌تواند علاوه بر امکان کاهش مصرف سیمان، سبب بهبود مقاومت خاک نیز شود. در این راستا مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۳ (حاوی سیمان تنها) و ۷ (حاوی ترکیب CZ) نشان می‌دهد مقدار UCS نمونه‌های حاوی زئولیت بهینه، تقریباً تا ۱/۳ برابر بیش از سیمان تنها است. با استناد به طیف‌های پراش اشعه ایکس ارائه شده در شکل (۸)، علت بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب CZ را می‌توان به امکان رشد بهتر و تنوع بیشتر

شکل ۵. آسیب‌پذیری ساختار خاک بر اثر چرخه‌های یخ و ذوب

(a) و (b) به ترتیب نمونه حاوی ۱۰٪ سیمان قبل و بعد از دو چرخه F-T

(c) ساختار ظاهری نمونه حاوی ۱۰٪ سیمان طی دوازده چرخه F-T

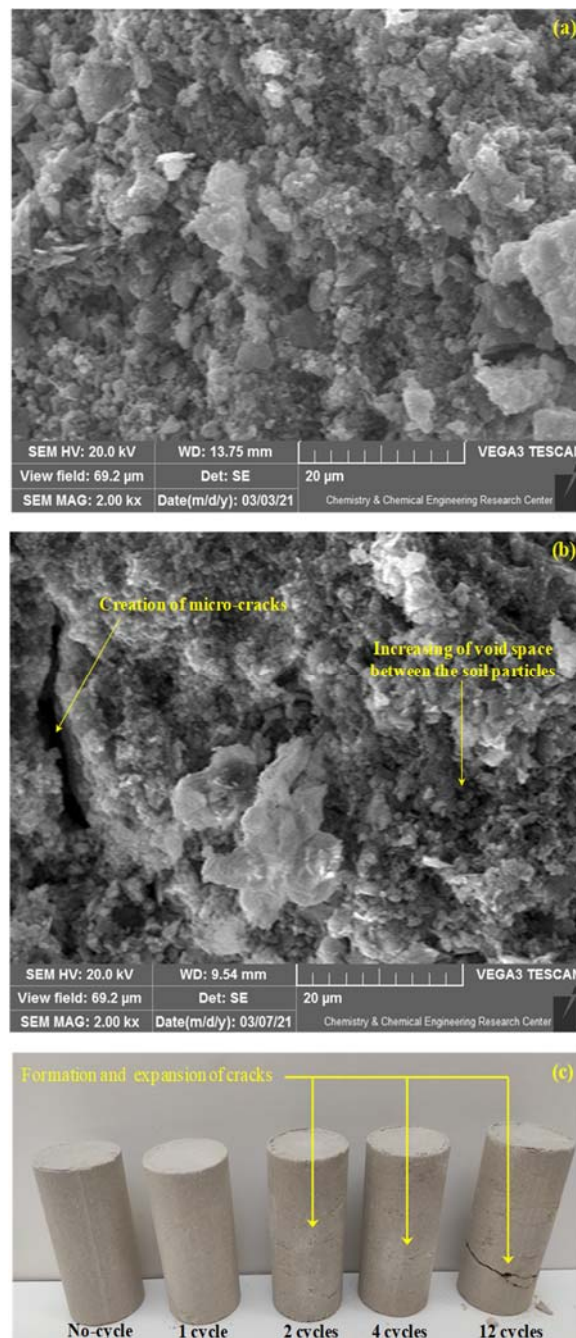


Fig. 5. Effect of F-T cycles on the soil structure

(a) and (b) Soil samples+10% cement before and after 2 F-T cycles

(c) structure of soil sample+10% cement under 12 F-T cycles

### 1. Cement-zeolite

۲. مشاهده می‌شود در نمونه تثبیت شده با CZ، شدت پیک‌های مربوط به

ایکس و همچنین از بین رفتن بخشی از سطوح رسی برای مشارکت در واکنش‌های پوزولانی ارزیابی کرد.

(ایجاد پیک‌های جدید) نانوساختارهای سیمانی و در نتیجه افزایش نسبی تراکم ساختار (کاهش فضای خالی بین ذرات) خاک نسبت داد.

شکل ۸. طیف‌های پراش اشعه ایکس: a، b و c به ترتیب شامل خاک طبیعی، نمونه حاوی ۱۰٪ سیمان تنها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری و نمونه حاوی ۱۰٪ ترکیب CZ بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

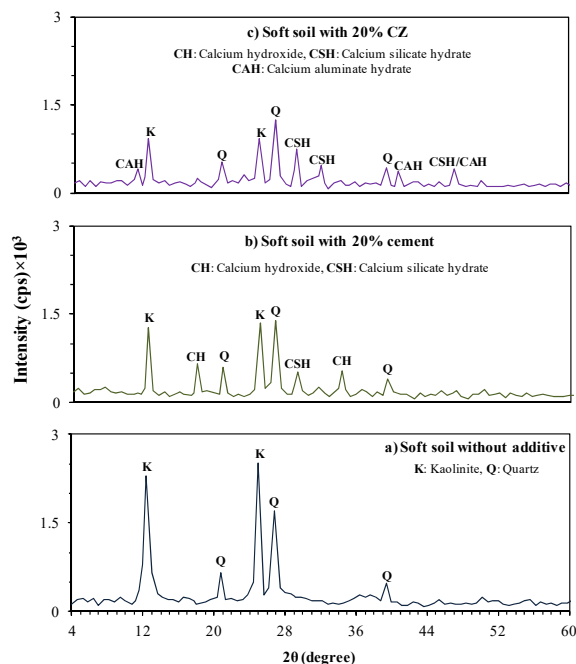


Fig. 8. XRD patterns of a) the natural soil, b) treated sample with cement alone and c) treated sample with CZ

از طرفی در طیف پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ترکیب CZ (شکل ۸-۲)، مشاهده می‌شود علاوه بر افزایش شدت (رشد ارتفاع پیک) و حضور بیشتر (تعدد بازتابش در زوایای مختلف) پیک‌های مربوط به CSH نسبت به نمونه حاوی سیمان تنها شکل (۸-۱) و به عبارتی امکان حضور گسترده‌تر این ترکیب در سیستم تثبیت شده با CZ، دیگر پیک‌های سیمانی (مانند CAH و CSH/CAH) نیز در این نمونه پدیدار شده‌اند. در واقع ویژگی‌های کانی‌ساخت ژئولیت طبیعی جدول (۳) و همچنین کوچک‌تر بودن ابعاد آن نسبت به سیمان، ضمن فراهم کردن زمینه برای رشد ثانویه مواد سیمانی، سبب توزیع گسترده‌تر و بهتر این مواد در فضای

شکل ۷. تأثیر حضور ژئولیت بر ویژگی‌های مقاومتی خاک نرم تثبیت شده با سیمان در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

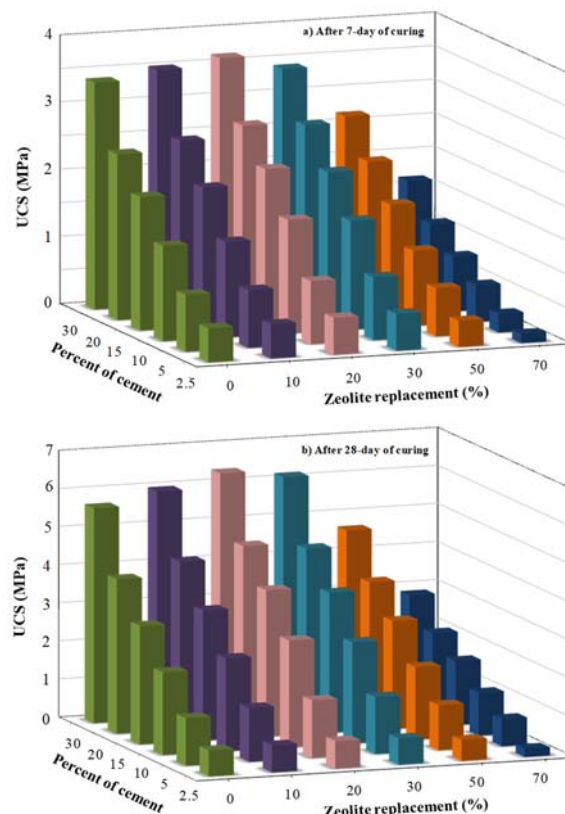


Fig. 7. Effect of adding zeolite on the compressive strength of cement stabilized soft soil

به عبارت دیگر، همان‌گونه که در شکل (۸-۱) (خاک تنها بدون ماده افزودنی) مشاهده می‌شود پیک‌های مربوط به ترکیبات سیمانی (مانند CAH و CSH) وجود ندارد. در نمونه تثبیت شده با سیمان تنها شکل (۸-۲)، حضور ماده افزودنی سبب ایجاد پیک‌های جدید (مواد سیمانی و پیدایش ترکیب هیدرواکسید کلسیم ناشی از واکنش هیدراسیون سیمان) شده است. علاوه بر این، افزودن سیمان سبب کاهش شدت پیک کانی رسی شده که علت آنرا می‌توان ناشی از پوشیده شدن سطح ذرات با مواد سیمانی و در نتیجه کاهش بازتابش پرتو

۱. مانند CSH و CAH از طریق فعالیت‌های پوزولانی (مربوط به واکنش آهک آزاد موجود در سیمان با اکسیدهای سیلیس و آلومینیوم موجود در ژئولیت)

ترکیبات سیمانی بیشتر از نمونه حاوی سیمان تنها است.

به منظور مقایسه تاثیر فرآیند یخ و ذوب بر رفتار خاک تثبیت شده با سیمان تنها و ترکیب CZ، تغییرات مقاومت در این نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اعمال چرخه‌های F-T به تفکیک و بر اساس شاخص خرابی (D) طبق رابطه (۱) محاسبه و نتایج آن در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) (به ترتیب مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تنها و CZ) ارائه شد (در رابطه ۱،  $q_n$  مقاومت فشاری محدود نشده مصالح بعد از n چرخه یخ و ذوب و  $q_0$  مقاومت فشاری اولیه نمونه است).

$$\text{Degree of damage (D)} = (1 - q_n/q_0) \quad (1) \quad [44]$$

نتایج ارائه شده در شکل (۱۰) بیانگر آن است که در حضور سیمان تنها متوسط شاخص خرابی برای مجموع نمونه‌های تثبیت شده با ۲/۵ تا ۳۰ درصد افزودنی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری تقریباً ۳۱ درصد و طبق نتایج شکل ۱۱، متوسط این شاخص برای مجموع نمونه‌های حاوی ۲/۵ تا ۳۰ درصد ترکیب CZ بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، تقریباً ۲۳٪ است.

شکل ۱۰. تاثیر فرآیند F-T بر تغییرات شاخص خرابی خاک تثبیت شده با سیمان تنها (بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری)

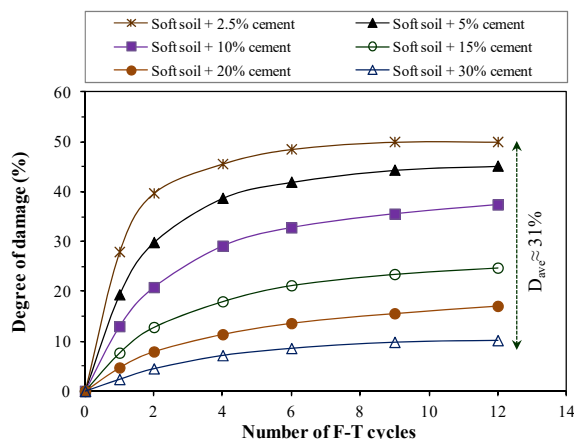


Fig. 10. Effect of F-T cycles on the degree of damage index of soil with sole cement (28-day of curing)

خالی مابین ذرات خاک در حضور CZ نسبت به سیمان تنها خواهند شد. رشد بهتر و تنوع بیشتر نانو ساختارهای سیمانی درون این سیستم و همچنین کاهش میزان آهک آزاد (حذف پیک CH) در آن می‌تواند موجب پیوستگی بیشتر و بهتر اجزاء به یکدیگر شده [32, 44-45] که طبق نتایج موجود در شکل‌های (۷ و ۱۴)، سبب ارتقاء ویژگی‌های مهندسی خاک می‌شود. موضوع قابل توجه در عملکرد نمونه‌های حاوی CZ آنست که با افزایش سهم جایگزینی زئولیت (تقریباً بیش از یک چهارم مقدار سیمان)، روند بهبود پارامترهای مهندسی مصالح مختل خواهد شد. مشابه این رفتار در سایر خاک‌های مسئله‌دار تثبیت شده با ترکیب سیمان و زئولیت نیز گزارش شده [21-22, 24, 48] که علت آن را می‌توان به افت سطح فعالیت پوزولانی ناشی از کمبود مقدار آهک آزاد موجود در سیستم برای ترکیب با زئولیت نسبت داد [23, 49]. به عبارت دیگر، افزودن بیش از اندازه زئولیت به جای سیمان، سبب اختلال در فرآیند جامدشدگی ذرات و در پایان افت ویژگی‌های مهندسی مصالح خواهد شد. از طرفی دیگر، نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد در نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب CZ نیز بخشی از مشخصات مقاومتی بر اثر چرخه‌های F-T کاهش خواهد یافت.

شکل ۹. تاثیر فرآیند یخ-ذوب بر مقاومت مصالح حاوی ترکیب سیمان و زئولیت بهینه بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

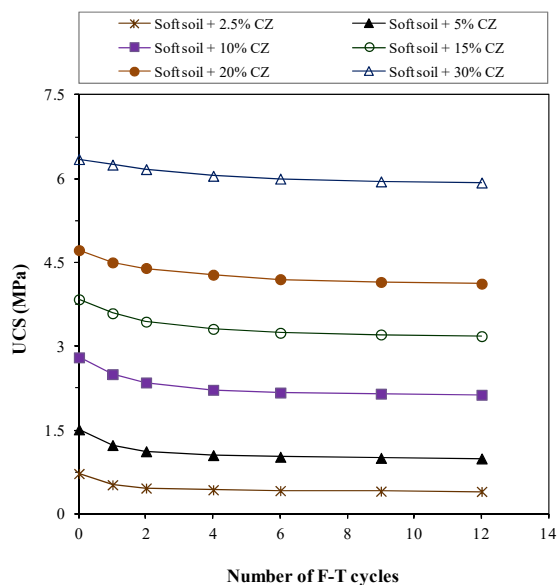


Fig. 9. Effect of F-T cycles on the mechanical performance of soil with CZ after 28-day of curing

شکل ۱۱. تأثیر فرآیند F-T بر تغییرات شاخص خرابی خاک تثبیت شده با ترکیب CZ (بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری)

(CZF) ۱ بعد از ۷ روز عمل‌آوری تقریباً ۲۵٪ است. بر این اساس مقایسه عملکرد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تنها و ترکیب CZF، بیانگر آنست که حضور الیاف (به ویژه در نمونه‌های با مقادیر محدود افزودنی) بطور چشمگیری (گاهی حدود دو برابر) سبب کاهش آثار مخرب فرآیند F-T بر ویژگی‌های مکانیکی مصالح شده است. این یافته با نتایج سایر پژوهشگران [9, 16, 27]، منبى بر نقش مثبت الیاف بر پایایی رفتار خاک تحت تنش‌های محیطی هماهنگی مناسبی دارد. ساز و کار الیاف در اصلاح پارامترهای رفتاری خاک را می‌توان به مجموعه‌ای از عوامل مختلف نسبت داد.

شکل ۱۲. تأثیر فرآیند F-T بر تغییرات شاخص خرابی خاک تثبیت شده با سیمان تنها (بعد از ۷ روز عمل‌آوری)

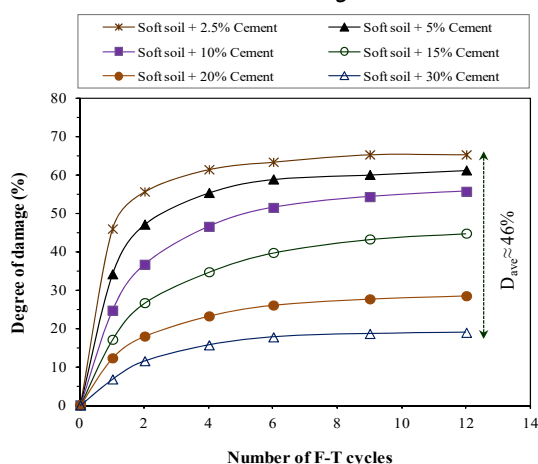


Fig. 12. Effect of F-T cycles on the degree of damage index of soil with sole cement (7-day of curing)

شکل ۱۳. تأثیر فرآیند F-T بر تغییرات شاخص خرابی خاک حاوی ترکیب CZ همراه الیاف (بعد از ۷ روز عمل‌آوری)

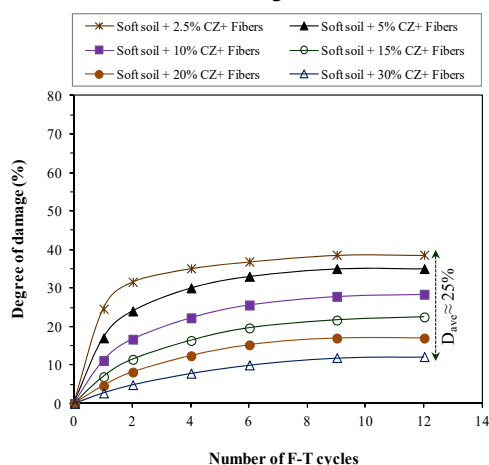


Fig. 13. Effect of F-T cycles on the degree of damage index of soil with CZ and fibers (7-day of curing)

شکل ۱۱. تأثیر فرآیند F-T بر تغییرات شاخص خرابی خاک تثبیت شده با ترکیب CZ (بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری)

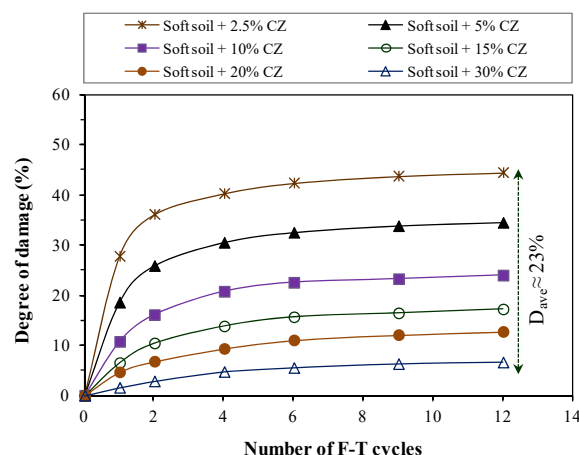


Fig. 11. Effect of F-T cycles on the degree of damage index of soil with CZ (28-day of curing)

به عبارت دیگر مقایسه نتایج موجود در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) موید آن است که آثار مخرب فرآیند یخ و ذوب در حضور سیمان-ژئولیت به مراتب کمتر از نمونه‌های حاوی سیمان تنها است. در واقع همانطور که پیشتر مطرح شد در مصالح حاوی CZ، فرآیند جامدشدگی ذرات بهتر و تراکم آنها بیشتر (البته به شرط مقدار بهینه جایگزینی ژئولیت با سیمان) و در نتیجه احتمال وجود فضای خالی درون توده خاک و به عبارتی قابلیت جذب و نگهداشت اولیه رطوبت کمتر است. بنابراین بر اثر چرخه‌های F-T، امکان ایجاد و گسترش ترک‌های میکرو و ماکرو بر اثر یخ و ذوب و خسارات به دنبال آن در این سری از نمونه‌ها به مراتب کاهش خواهد یافت؛ اگرچه همچنان افت مقاومت در آنها مشاهده می‌شود. در ادامه و به منظور پایایی بیشتر و تأثیرپذیری حداقلی سیستم از تغییر شرایط محیطی، الیاف نیز به ترکیب خاک-افزودنی اضافه و رفتار نمونه‌ها دوباره مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۲)، متوسط میزان شاخص خرابی برای مجموع نمونه‌های تثبیت شده با ۲/۵ تا ۳۰ درصد سیمان تنها بعد از ۷ روز عمل‌آوری تقریباً ۴۶ درصد بوده و طبق نتایج موجود در شکل (۱۳)، متوسط این شاخص برای مجموع نمونه‌های حاوی ۲/۵ تا ۳۰ درصد ترکیب سیمان-ژئولیت و الیاف

مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ترکیب CZF در شکل (۱۵) نشان می‌دهد در شرایط یکسان آزمایش به ویژه زمان-های کم عمل‌آوری، مقاومت کششی این نمونه‌ها نسبت به سیمان تنها شکل (۱۴-ا) گاهی تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. به طوری که تغییرات مورد اشاره با توجه به نتایج شکل (۱۳)، موجب بهبود تحمل تنش‌های ناشی از فرآیند یخ و ذوب و در نتیجه جلوگیری از افت مقاومت در این سری از نمونه‌ها شده است.

شکل ۱۵. تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ترکیب CZF در شرایط مختلف عمل‌آوری

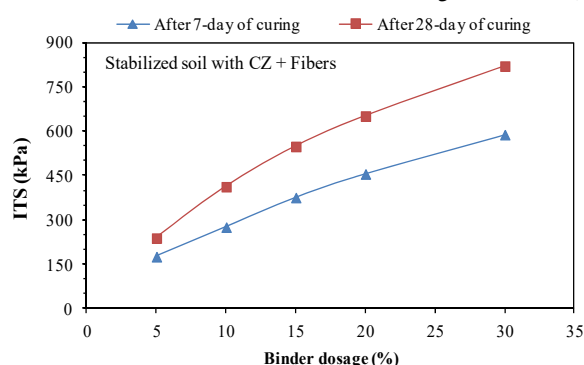


Fig. 15. ITS value change of stabilized soils with CZF at the various time of curing

علاوه بر موارد فوق و با توجه به تصویر SEM شکل (۱۶)، تشکیل گسترده نانوساختارهای سیمانی در حضور ترکیب سیمان-ژئولیت و چسبیدن آنها روی الیاف می‌تواند نقش برجسته‌ای در اتصال بهتر ذرات با یکدیگر و جلوگیری از احتمال بیرون کشیدگی رشته‌های فیبر از درون خاک هنگام اعمال تنش‌های محیطی و در نتیجه پایای بیشتر رفتار مصالح حاوی CZF ایفا نماید.

شکل ۱۶. شکل‌گیری نانوساختارهای سیمانی روی الیاف در نمونه اصلاح شده با ترکیب CZF

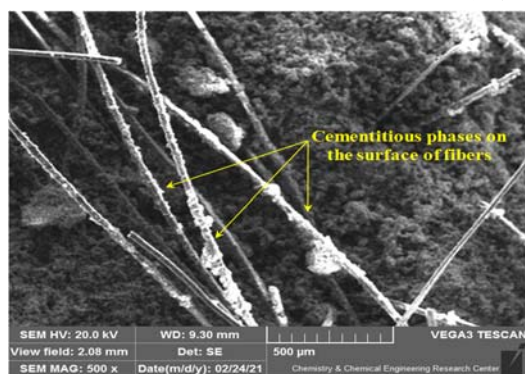


Fig. 16. Formation of cementitious phases on the fibers surface of sample with CZF

نخست آنکه الیاف سبب افزایش درهم‌تنیدگی ذرات و اتصال بهتر اجزاء می‌شود [8, 22, 26, 28]. این حالت با تشکیل یک پیوستگی سه بعدی توده خاک، می‌تواند شکل-گیری اولیه و انتشار میکرو ترک‌های مورد اشاره ناشی از فرآیند F-T را کاهش دهد. از سوی دیگر، نظر به قابلیت تحمل کشش بسیار زیاد الیاف پلی‌پروپیلین نسبت به خاک، انتظار می‌رود حضور آنها بتواند تا حد زیادی از جداسازی ذرات و فروپاشی ساختار خاک بعد از وقوع ریزترک‌ها ناشی از توالی یخ و ذوب، ممانعت بعمل آورد. به شکلی که این قابلیت با نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۴ و ۱۵)، مبنی بر افزایش قابل ملاحظه مقدار ITS در حضور الیاف مورد تایید قرار گرفت.

شکل ۱۴. تغییرات مقاومت کششی (a) نمونه‌های حاوی سیمان تنها و (b) نمونه‌های حاوی ترکیب CZ در شرایط مختلف عمل‌آوری

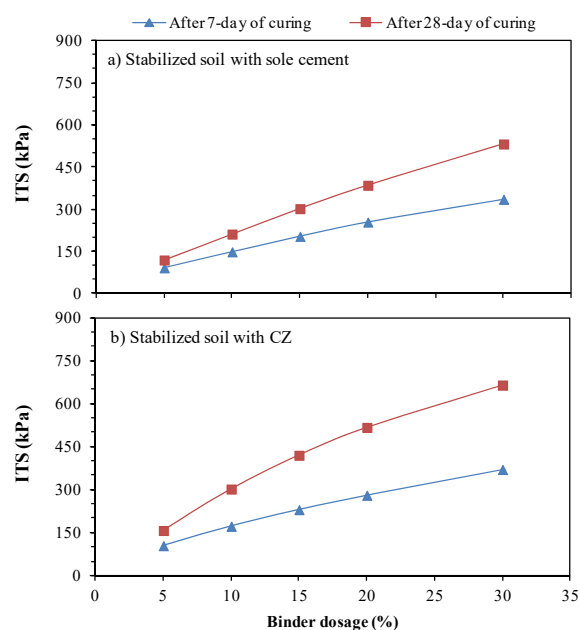


Fig. 14. ITS value changes, a) stabilized soils with sole cement and b) stabilized soils with CZ at various time of curing

در این راستا، مقایسه نتایج ارائه شده در شکل (۱۴-ا)

(مربوط به خاک تثبیت شده با سیمان تنها بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری) و (۱۴-ب) (مربوط به خاک تثبیت شده با ترکیب CZ بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری) بیانگر آن است که حضور ژئولیت در نمونه‌ها حدود ۲۰ درصد سبب افزایش مقدار ITS شده است. از طرفی، تغییرات مقادیر

خاک-افزودنی، مشاهده افزایش قابل ملاحظه مقاومت پسماند و به عبارتی محدودیت در قابلیت تردشکنی مصالح است. در این راستا مقایسه نمودارهای تنش-کرنش در شکل‌های (۶ و ۱۸) موید آن است که انجام با هم عملیات تثبیت و مسلح‌سازی سبب کاهش چشمگیر افت مقاومت بعد از پیک، خواهد شد. به عنوان نمونه در کرنش ۲٪، با توجه به شکل (۶) متوسط تنش در حضور سیمان تنها تقریباً ۴۰٪ مقادیر ارائه شده در شکل (۱۸) مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب CZF است. این رفتار را می‌توان به ترکیبی از عوامل مورد اشاره در خصوص بهبود پایایی این سری از نمونه‌ها مانند افزایش اتصال ذرات و پیوستگی سه بعدی توده خاک (طبق نتایج حاصل از شکل‌های (۷، ۱۳ و ۱۷) مربوط به افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی و شکل (۱۶) افزایش اندرکنش بین ذرات به دلیل اتصال ترکیبات سیمانی با الیاف) نسبت داد.

شکل ۱۸. نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های حاوی ترکیب CZ همراه الیاف بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

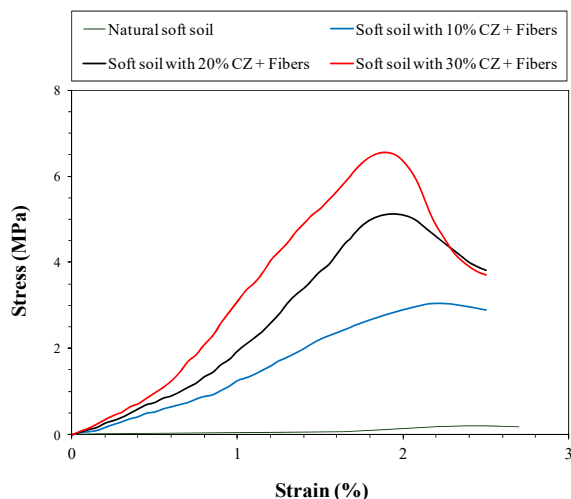


Fig. 18. Stress-strain relationship curves of soil samples treated with CZF after 28 days of curing

شایان ذکر است که در مقادیر زیاد افزودنی، قابلیت مسلح‌سازی در جلوگیری از بروز رفتار تردشکن مصالح تثبیت شده، کاهش نشان می‌دهد. این یافته با نتایج گزارش شده در مطالعات گذشته [38, 50] هم‌پوشانی کامل داشته و علت آنرا را می‌توان ناشی از محدود شدن عملکرد الیاف به

در مجموع با توجه به ساز و کارهای مورد اشاره و طبق نتایج شکل (۱۷)، در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد CZ همراه الیاف و پس از گذشت ۷ روز عمل‌آوری، مشاهده می‌شود بعد از ۱۲ چرخه یخ و ذوب مقاومت خاک همچنان در محدوده مطلوب ACI بوده که بر اساس شکل (۴-ا) رسیدن به این شرایط در مصالح تثبیت شده با سیمان تنها، نیازمند حداقل ۲۰٪ افزودنی است. به بیان دیگر در شرایط محدود عمل‌آوری، استفاده از ترکیب CZF سبب کاهش مصرف سیمان تا ۳۰٪ خواهد شد. از طرفی، مقایسه نتایج شکل‌های (۱۷ با ۴-ب) بیانگر آنست که در حضور سیمان تنها نیز با نگهداری طولانی (۲۸ روز عمل‌آوری) و به شرط تکمیل واکنش‌ها، مقدار افزودنی لازم در حضور سیمان تنها نیز ۱۵٪ خواهد شد؛ که با توجه به جایگزینی ژئولیت بهینه در نمونه‌های حاوی CZF، حتی در صورت امکان زمان طولانی مراقبت، بهسازی با این ترکیب، مقدار سیمان مصرفی را حداقل تا ۲۵٪ کاهش خواهد داد.

شکل ۱۷. تاثیر فرآیند یخ-ذوب بر مقاومت مصالح حاوی ترکیب سیمان-ژئولیت همراه الیاف بعد از ۷ روز عمل‌آوری

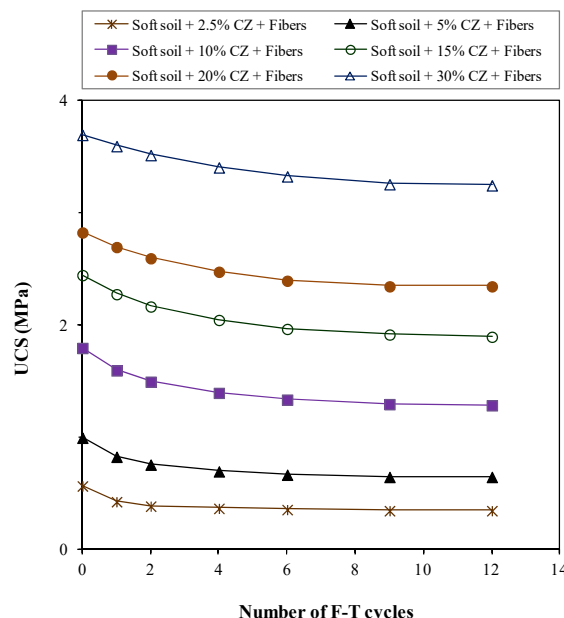


Fig. 17. Effect of F-T cycles on the mechanical performance of soil with CZ+fibers after 7 days of curing

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۸)، نکته بسیار مهم دیگر در مورد تاثیر مثبت الیاف بر عملکرد سیستم

بیشتر مواد سیمانی در این نمونه‌ها و کاهش مقدار رطوبت اولیه در آنها عنوان کرد.

- عملکرد نمونه‌های حاوی ترکیب CZ همراه الیاف PP نشان می‌دهد که حضور فیبر (به ویژه در نمونه‌های با مقادیر کم افزودنی) بطور چشمگیری (گاهی بیش از دو برابر) سبب جلوگیری از افت مشخصات مکانیکی هنگام چرخه‌های F-T خواهد شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های درشت ساختاری و تصاویر SEM، علت تغییر مشاهده شده را می‌توان به تاثیر توأم جامدشدگی بهتر ذرات و افزایش قابلیت درهم تنیدگی آنها نسبت داد. این شرایط با ایجاد پیوستگی سه بعدی توده خاک، ضمن افزایش بیش از ۱/۵ برابری ظرفیت کششی و کاهش قابل ملاحظه پتانسیل تردشکنی مصالح، نقش بسزایی در ممانعت از تشکیل و انتشار ترک‌های مورد اشاره ناشی از فرآیند F-T ایفا می‌نماید.

- استفاده از ترکیب سیمان- زئولیت و الیاف علاوه بر بهبود فرآیند اصلاح خاک و امکان کاهش مصرف سیمان تا ۳۰٪، می‌تواند زمان مورد نیاز عمل‌آوری را به یک سوم برساند. بر پایه مجموع نتایج مطالعه حاضر، افزودن ۱۵ درصد CZ همراه ۰/۷۵ درصد فیبر، پس از ۷ روز نگهداری منجر به بهسازی پایدار رس‌های نرم خواهد شد.

## ۵- منابع

- [1] Xie, X., Tian, H., Zhou, B., Li, K.; "The life-cycle development and cause analysis of large diameter shield tunnel convergence in soft soil area"; *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 2021, 103680.
- [2] Chen, R., Zhu, Y., peng Lai, H., Bao, W.; "Stabilization of soft soil using low-carbon alkali-activated binder"; *Environmental Earth Sciences*, 79, 2020, 1-13.
- [3] Akbari, H.R., Sharafi, H., Goodarzi, A. R.; "Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C"; *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 1-15.

دلیل پیوندهای بسیار مستحکم سیمانی و ظرفیت زیاد باربری آنها در این سطح از افزودنی ارزیابی کرد.

## ۴- نتیجه گیری

- نتایج پژوهش حاضر موید آن است که با وجود توانایی مناسب مقادیر اندک سیمان در بهبود پارامترهای ژئومکانیکی خاک نرم، اما فرآیند یخ و ذوب (به ویژه چرخه‌های اولیه)، می‌تواند مقاومت مصالح را به شدت کاهش دهد. به نحوی که میزان افت UCS در نمونه‌های حاوی مقدار کم افزودنی و در زمان‌های محدود نگهداری، گاهی تا ۶۰ درصد بدست آمد. طبق آنالیزهای ریزساختاری، ساز و کار مخرب چرخه‌های F-T، ناشی از ایجاد و گسترش ریزترک‌ها بر اثر افزایش حجم رطوبت اولیه موجود در خاک شروع می‌شود. سپس افزایش ابعاد فضای خالی و امکان تشکیل عدسی‌های یخی، باعث ناپیوستگی ماکروسکوپی ذرات و رشد بیشتر نواحی ضعیف برشی می‌شود. مشخص شد مقابله با این شرایط و تأمین سطح مقاومت مطلوب، نیازمند مصرف زیاد سیمان و زمان طولانی عمل‌آوری بوده که علاوه بر افزایش هزینه طرح تثبیت، رفتار مصالح را تردشکن می‌کند (به نحوی که نتایج حاصل، بیانگر کاهش حدود ۳ برابری مقاومت خاک بعد از پیک گسیختگی است).

- افزودن بهینه زئولیت طبیعی به سیستم می‌تواند علاوه بر امکان کاهش مصرف سیمان، سبب افزایش حدود ۱/۳ برابری مقاومت خاک نیز شود. دلیل این رفتار با استناد به طیف‌های XRD، رشد بیشتر نانوساختارهای سیمانی و افزایش تراکم ساختار ارزیابی شد. موضوع قابل توجه در عملکرد این سری از نمونه‌ها آن است که افزایش سهم جایگزینی زئولیت (تقریباً بیش از یک چهارم مقدار سیمان)، سبب اختلال فرآیند جامدشدگی ذرات و در نتیجه افت ویژگی‌های مهندسی خاک خواهد شد. علاوه بر این، مصالح تثبیت شده با CZ نیز در برابر چرخه‌های F-T آسیب‌پذیرند. شایان ذکر است طبق محاسبه شاخص خرابی، آثار مخرب توالی یخ و ذوب در حضور سیمان زئولیت به مراتب کمتر از سیمان تنها بدست آمد. دلیل این رفتار را می‌توان حضور

- materials: soil composites"; *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 2020, 1019-1040.
- [14] Kommu, S., Asadi, S.S.; "Effect of pH on compressibility behaviour of cement-treated soil"; *In Advances in Civil Engineering*, 2021, 789-807.
- [15] Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., Salimi, M.; "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume"; *Applied Clay Science*, 132, 2016, 675-684.
- [16] Wang, D., Wang, H., Larsson, S., Benzerzour, M., Maherzi, W., Amar, M.; "Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite"; *Construction and Building Materials*, 241, 2020, 118085.
- [17] Wang, W., Zhang, C., Li, N., Tao, F., Yao, K.; "Characterisation of nano magnesia–cement-reinforced seashore soft soil by direct-shear test"; *Marine Georesources & Geotechnology*, 37, 2019, 989-998.
- [18] Ge, L., Wang, C. C., Hung, C. W., Liao, W. C., Zhao, H.; "Assessment of strength development of slag cement stabilized kaolinite"; *Construction and Building Materials*, 184, 2018, 492-501.
- [19] Chen, J. J., Ng, P. L., Kwan, A. K. H., Li, L. G.; "Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions"; *Journal of Cleaner Production*, 210, 2019, 66-76.
- [20] Chenarboni, H. A., Lajevardi, S. H., MolaAbasi, H., Zeighami, E.; "The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils"; *Construction and Building Materials*, 272, 2021, 121630.
- [21] Jafarpour, P., Moayed, R. Z., Kordnaeij, A.; "Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test"; *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), (2020). 149-159.
- [22] Mariri, M., Ziaie Moayed, R., Kordnaeij, A.; "Stress-Strain Behavior of Loess Soil Stabilized with Cement, Zeolite, and Recycled Polyester Fiber"; *Journal of Materials in Civil*
- [4] Coudert, E., Paris, M., Deneele, D., Russo, G., Tarantino, A. "Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution"; *Construction and Building Materials*, 201, 2019, 539-552.
- [5] Yong, L.L., Emmanuel, E.; "Effects of corn starch and corn silk binary blends on the strength properties of a soft clay: A preliminary study"; *Journal of Natural Fibers*, 2021, 1-15.
- [6] Dhani, N., Gasruddin, A., Hartini, H., Baride, L.; "Unconfined compressive strength characteristics of overboulder asbuton and zeolite stabilized soft soil"; *Civil Engineering Journal*, 7, 2021, 40-48.
- [7] Salimi, M., Ghorbani, A.; "Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers"; *Applied Clay Science*, 184, 2020, 105390.
- [8] Aldaood, A., Khalil, A., Bouasker, M., Muzahim, A. M.; "Experimental study on the mechanical behavior of cemented soil reinforced with straw fiber"; *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 1-17.
- [9] Saygili, A., & Dayan, M.; "Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers"; *Cold Regions Science and Technology*, 161, 2019, 107-114.
- [10] Wang, D., Korkiala-Tanttu, L.; "1-D compressibility behaviour of cement-lime stabilized soft clays"; *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24, 2020, 1013-1031.
- [11] Wu, J., Deng, Y., Zheng, X., Cui, Y., Zhao, Z., Chen, Y., Zha, F.; "Hydraulic conductivity and strength of foamed cement-stabilized marine clay"; *Construction and Building Materials*, 222, 2019, 688-698.
- [12] Liu, L., Zhou, A., Deng, Y., Cui, Y., Yu, Z., Yu, C.; "Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays"; *Construction and Building Materials*, 211, 2019, 909-918.
- [13] Khajeh, A., Chenari, R. J., Payan, M.; "A simple review of cemented non-conventional

- properties of polypropylene fiber and cement stabilized clay"; *Cold Regions Science and Technology*, 154, 2018, 155-165.
- [32] Liu, J., Zha, F., Xu, L., Kang, B., Yang, C., Zhang, W., ... Liu, Z.; "Zinc leachability in contaminated soil stabilized/solidified by cement-soda residue under freeze-thaw cycles"; *Applied Clay Science*, 186, 2020, 105474
- [33] Ayeldeen, M., Kitazume, M.; "Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay"; *Geotextiles and Geomembranes*, 45, 2017, 592-602.
- [34] ASTM; "Annual book of ASTM standards. vol. 04.08"; *American Society for Testing and Materials*, 2006, Philadelphia.
- [35] EPA; "Process design manual: land application of municipal sludge"; Res. Lab. EPA-625/1-83-016, 1983.
- [36] Yang, B. H., Weng, X. Z., Liu, J. Z., Kou, Y. N., Jiang, L., Li, H. L., Yan, X. C.; "Strength characteristics of modified polypropylene fiber and cement-reinforced loess"; *Journal of Central South University*, 24, 2017, 560-568.
- [37] Vakili, A.H., Ghasemi, J., bin Selamat, M.R., Salimi, M., Farhadi, M.S.; "Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber"; *Construction and Building Materials*, 193, 2018, 405-415.
- [38] Correia, A. A., Oliveira, P. J. V., Custódio, D. G.; "Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders"; *Geotextiles and Geomembranes*, 43, 2015, 97-106.
- [39] Abdeldjouad, L., Asadi, A., Ball, R.J., Nahazanan, H., Huat, B.B.; "Application of alkali-activated palm oil fuel ash reinforced with glass fibers in soil stabilization"; *Soils and Foundations*, 59, 2019, 1552-1561.
- [40] Baldovino, J.D.J.A., dos Santos Izzo, R.L., Rose, J.L.; "Effects of freeze-thaw cycles and porosity/cement index on durability, strength and capillary rise of a stabilized silty soil under optimal compaction conditions"; *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, *Engineering*, 31, 2019, 04019291.
- [23] Mola-Abasi, H., Semsani, S. N., Saberian, M., Khajeh, A., Li, J., Harandi, M.; "Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro-and macro-level approach"; *Journal of Cleaner Production*, 267, 2020, 122209.
- [24] Mola-Abasi, H., Khajeh, A., Naderi Semsani, S.; "Effect of the ratio between porosity and SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on tensile strength of zeolite-cemented sands"; *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 2018, 04018028.
- [25] Rajabi, A. M., Ardakani, S. B.; "Effects of natural-zeolite additive on mechanical and physicochemical properties of clayey soils"; *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32, 2020, 04020306.
- [26] Roshan, K., Choobbasti, A. J., Kutanaei, S. S.; "Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition"; *Transportation Geotechnics*, 2020, 100359.
- [27] Aryal, S., Kolay, P. K.; "Long-Term durability of ordinary Portland cement and polypropylene fibre stabilized kaolin soil using wetting-drying and freezing-thawing test"; *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6, 2020, 1-15.
- [28] Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A. Kutanaei, S.S.; "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers"; *Construction and Building Materials*, 211, 2019, 1094-1104.
- [29] Wei, L., Chai, S. X., Zhang, H. Y., Shi, Q.; "Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber"; *Construction and Building Materials*, 172, 2018, 300-308.
- [30] Arabani, M., Haghsheno, H.; "The effect of polymeric fibers on the mechanical properties of cement-stabilized clay soils in Northern Iran"; *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14, 2020, 557-568.
- [31] Ding, M., Zhang, F., Ling, X., Lin, B.; "Effects of freeze-thaw cycles on mechanical

"Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test"; *Journal of Building Engineering*, 24, 2019, 1-10.

2021, 481-498.

- [41] He, L., Wang, Z., Gu, W.B.; "Evolution of freeze-thaw properties of cement-lime solidified contaminated soil"; *Environmental Technology & Innovation*, 21, 2021, 101189.
- [42] Wang, H. X., Wu, Z. Z., Tan, Y. Z., Cui, X. Z., Zuo, Q.J., Wang, L.H., Lu, L.Q.; "Characteristics of pore structure of stabilized/solidified sediments during freeze-thaw cycles"; *Construction and Building Materials*, 259, 2020, 119804.
- [43] Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N., Chinkulkijniwat, A.; "Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay"; *Journal of Materials in Civil Eng.*, 26, 2014, 633-643.
- [44] Li, N., Zhu, Y., Zhang, F., Lim, S. M., Wu, W., Wang, W.; Unconfined compressive properties of fiber-stabilized coastal cement clay subjected to freeze-thaw cycles"; *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 2021, 1-14.
- [45] Liu, J., Zha, F., Long, X., Kang, B., Yang, C., Feng, Q., ... Zhang, J.; "Strength and microstructure characteristics of cement-soda residue solidified/stabilized zinc contaminated soil subjected to freezing-thawing cycles"; *Cold Regions Science and Technology*, 172, 2020, 102992.
- [46] Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Li, Z., Xu, L.; "Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil"; *Cold Regions Science and Technology*, 170, 2020, 102926.
- [47] Boz, A., Sezer, A.; "Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay"; *Cold Regions Science and Technology*, 151, 2018, 359-366
- [48] Kordnaeij, A., Moayed, R. Z., Soleimani, M.; "Shear wave velocity of zeolite-cement grouted sands"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 2019, 196-210.
- [49] Jafarpour, P., Moayed, R. Z., Kordnaeij, A.; "Yield stress for zeolite-cement grouted sand"; *Construction and Building Materials*, 247, 2020, 118639.
- [50] Tran, K.Q., Satomi, T., Takahashi, H.;

## Effect of zeolite and fibers on the geo-mechanical properties of cemented soil under the freeze-thaw cycles

Mehdi Safa<sup>1</sup>, Amir Reza Goodarzi<sup>2</sup> (Corresponding author\*), Bahareh Lorestan<sup>3</sup>

1. PhD student, Faculty of Basic Science, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

2. Associate Prof., Faculty of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

3. Associate Prof., Faculty of Basic Science, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

\*a.goodarzi@iauh.ac.ir

### Abstract:

Although cement stabilization is used extensively to modify the soft clays, it may show limited success in some applications. Hence, this paper presents a multiscale investigation on the viability of employing zeolite and fiber to enhance the durability of cement treated soil against the freezing-thawing (F-T) cycles. In so doing, a wide range (0 to 30%) of additives including sole cement and cement-zeolite mixture (CZ) with different cement replacement were separately added to a soft soil sample and then mixed with the optimal fiber content of 0.75% (by weight), which was determined by the indirect tensile strength test. A set of experiments at various curing days (up to 90 days) were performed to study the mechanical and microstructural changes of the stabilized soils. The results indicated that while a low level of cement can modify the geo-mechanical parameters of soil sample, the compressive strength of cemented soil could decay up to 60% when the specimens exposure to the successive F-T cycles. Such changes may be ascribe to the F-T-induced particles rearrangement and degradation of the cementation structure-bonding, forming many new voids and cracks subsequently decreasing the interlocking of matrix. As a result, to get the strength guidelines threshold and make the composite water proofing a high dosage of sole cement and a long time of curing (at least 28-day) are needed, which may be uneconomical and lade to the brittle behavior. Adding zeolite ( $\leq 25\%$  proportion) to supplant part of cement could effectively enhance the engineering properties of cement-mixed soil, due to an increase in the cementitious products [e.g. Calcium-aluminate-hydrate (CAH) and Calcium-silicate-hydrate (CSH)] induced by the pozzolanic activity, subsequent reduction of the inter pore-spaces and eventually a more compacted microstructure, as confirmed by the X-ray diffraction (XRD) patterns and scanning electron microscope (SEM) images. It should be emphasized that the zeolite/cement ratio is a very influential factor on the behavior of cement-zeolite mixture. Therefore, the cemented soil mixes with  $Z_{opt}$  showed a further (up to 1.3 folds) resistance relative to the mere cemented soil as well as a greater tensile strength; however, the binary system was still vulnerable under the F-T action. In this case, the insertion of fiber could significantly enhance the soil durability (decrease the degree of damage by an average value of 50%), which was more evident at the small binder dosage and early stage of curing time. Incorporating fiber into the system also led to a higher tensile strength (nearly 1.5 times) than those deduced from the stabilization alone. Moreover, this strategy was effective to overcome the brittle nature of stabilized mixes, resulting an increase the post-strength up to 270%. These observations can be justified by the extended cementing gels formation and the enhanced interlocking of matrix through the CZ-fiber application. Overall, the combination of CZ blend and fiber can be considered as an effective technique for the soft soil modification with the fact that triggered a prominent reduction ( $\sim 30\%$ ) in the needed amount of cement an time of curing (up to 3 folds) for the successful treatment against the F-T cycles.

**Keywords:** Soft soil, freeze and thaw cycles, zeolite, fiber, modified geo-mechanical properties.