

مطالعه اثربخشی ترکیب الیاف و نانو ژئوپلیمر بر پایه پسماندهای صنعتی در بهبود مشخصات مکانیکی و افزایش دوام خاک‌های به شدت تورمی

محمد علی پاشاباوندپوری^۱، امیررضا گودرزی^{۲*}، سید حمید لاجوردی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

(*نویسنده مسئول: Email: Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk)

چکیده

پتانسیل زیاد تغییر حجم رس‌های تورمی می‌تواند سبب مشکلات فراوانی برای سازه‌های مهندسی شده لذا مقابله با این خاک‌ها، جزء اولویت‌های مهم در پروژه‌های عمرانی بشمار می‌رود. از دیگر سو، با وجود گستردگی استفاده از تثبیت‌کننده‌های سنتی (مانند آهک) برای اصلاح رفتار خاک‌های منبسط‌شونده، ولی این رویکرد با چالش‌های متعدد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه است. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر ارائه یک راهبرد جدید به منظور رفع و یا کاهش محدودیت‌های فوق می‌باشد. در این راستا، عملکرد نوعی نانو ژئوپلیمر مرکب (SNZBG) مبتنی بر پسماندهای صنعتی (حاوی سرباره فولادسازی و نانو ذرات دارای سطوح فعال آلومینوسیلیکات) برای اصلاح مشخصات مهندسی یک رس با قابلیت تورم بسیار زیاد (حدود ۱۶۰٪) و بهبود دوام آن مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور آهک تنها، SNZBG و ترکیب آن با الیاف، در مقادیر صفر تا ۲۰٪ وزنی بطور مجزا به خاک اضافه و سپس مجموعه‌ای از آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان داد حضور صرفاً ۱۲٪ آهک تنها، پس از ۷ روز عمل‌آوری می‌تواند سبب کنترل تورم شده؛ اگرچه بهبود پارامترهای مکانیکی مصالح و رسیدن به آستانه مقاومت لازم بر اساس شاخص‌های بین‌المللی نیازمند مقادیر قابل ملاحظه (حدود ۲۰٪) افزودنی و زمان زیاد (حداقل ۲۸ روز) نگهداری می‌باشد. همچنین مشخص گردید شرایط محیطی مهاجم (شامل دوره‌های مکرر یخ و ذوب، F-T)، سبب تخریب جامدشدگی ساختار و در نهایت زوال شدید (بعضاً تا ۹۰٪) خصوصیات مهندسی مصالح تثبیت شده با آهک خواهد شد. در مقابل، بهسازی با ژئوپلیمر پیشنهادی، ضمن کاهش ۴ برابری زمان عمل‌آوری و آهک مورد نیاز برای اصلاح موفق خاک، سبب افزایش دوام نمونه‌ها تا ۲ برابر می‌شود. با استناد به نتایج آنالیزهای ریزساختاری، دلایل ارتقاء رفتار مصالح حاوی SNZBG را می‌توان به قدرت بیشتر اتصال پولک‌های رسی به یکدیگر و کاهش تمایل آنها به جذب آب، ناشی از تشکیل نانوساختارهای مستحکم ژئوپلیمری و انسداد فیزیکی حفرات نسبت داد. از طرفی در سیستم اخیر، پاسخ تنش-کرنش همانند عملکرد آهک، عمدتاً به صورت شکست ترد و با افت سریع مقاومت پسماند (خرابی کامل در کرنش حدود ۲٪) همراه است. مشاهده شد افزودن الیاف به مصالح تثبیت شده با SNZBG، نقش بسزایی در افزایش شکل‌پذیری ماتریکس خاک-ژئوپلیمر دارد. علت این بهبود عملکرد، هم‌افزایی تاثیر SNZBG و الیاف در ایجاد مسیرهای جدید انتقال تنش مابین ذرات (ساز و کار پل‌زدگی) و افزایش قفل و بست ساختار داخلی بواسطه تشکیل شبکه‌های سه بعدی درهم تنیده درون مصالح تعیین شد. بنحویکه در این سری از نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های حاوی آهک تنها، علاوه بر رشد بیش از ۲ برابری ظرفیت کششی، میزان خرابی در برابر چرخه مکرر F-T نیز تا ۶۰٪ کاهش نشان داد. در مجموع بر اساس نتایج این مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت اصلاح خاک‌های تورمی با نانو ژئوپلیمر SNZBG همراه الیاف، رویکردی نوین و بسیار اثربخش (پایا و دوست‌دار محیط‌زیست) نسبت به روش تثبیت سنتی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی

خاک تورمی، آهک، شرایط محیطی مهاجم، ناپایداری ماتریکس، ترکیب SNZBG-الیاف، بهبود خصوصیات ژئومکانیکی.

رس‌های تورمی عموماً در نواحی خشک و نیمه خشک جهان مانند ایران یافت می‌شوند. شرایط آب و هوایی این مناطق، مانع از هوازگی گسترده کانی‌های فعال رسی مانند مونت‌موریلونیت خواهد شد. پتانسیل زیاد تورم-انقباض این نوع از کانی‌ها، می‌تواند سبب مشکلات متعدد سازه‌ای (مانند تغییرشکل‌های نامتقارن) و اقتصادی^۱ شود [۴-۱]. از اینرو مقابله با خاک‌های منبسط‌شونده، جزء مسائل مهم در پروژه‌های عمرانی برای طراحی ایمن، کارآمد و پایدار است.

با وجود تنوع راه‌کارها برای کنترل تورم خاک مانند تراکم مکانیکی و اجرای شالوده‌های خاص، اما استفاده از مواد افزودنی پایه کلسیمی (مانند آهک) به دلیل دسترسی آسان و سادگی اجرا بسیار متداول می‌باشد [۱۰-۵]. بطور کلی عملکرد این مواد را می‌توان به دو بخش مجزا شامل فعل و انفعالات الف- کوتاه‌مدت و ب- بلند مدت (پوزولانی) نسبت داد که در نهایت از طریق ساز و کارهای مختلف از جمله کاهش ضخامت لایه دوگانه صفحات رسی، نزدیک شدن ذرات به یکدیگر (ایجاد ساختار مجتمع) و تولید ژل‌های سیمانی (بواسطه فراهم شدن شرایط برای انحلال واحدهای سازنده سیلیکا و آلومینا و ترکیب آنها با یون کلسیم آزاد در محیط) باعث کاهش تمایل خاک به جذب آب و جلوگیری از تغییر حجم آن خواهند شد. اگرچه نتایج حاصل از تحقیقات موجود [مانند: ۱۱ و ۱۲] نشان می‌دهد تکمیل این واکنش‌ها و به عبارتی موفقیت بهسازی خاک بر حسب وضعیت عمل‌آوری و مشخصات اولیه کانی‌ساخت مصالح، دستخوش تغییر می‌شوند. از دیگر سو، تولید آهک می‌تواند سبب انتشار انواع گازهای آلاینده شده، ضمن آنکه پایداری طولانی مدت خاک‌های حاوی آهک با چالش‌های فراوانی مواجه است [۱۴-۱۳]. به عنوان مثال بررسی اخیر صورت گرفته توسط سلیمی و همکاران [۱۵] مویدها کاهش شاخص‌های بهبود مقاومت و دوام خاک مارن تثبیت شده با آهک تحت شرایط محیطی مهاجم می‌باشد. لذا، امروزه پژوهش‌های متعددی با هدف معرفی مواد جدید برای جایگزینی با اصلاح‌کننده‌های سنتی به منظور رفع محدودیت‌های مورد اشاره و البته کاهش هزینه‌های طرح همزمان با ارتقاء رفتار مصالح صورت می‌پذیرد.

بر مبنای نگرش فوق، استفاده از انواع پسماندهای صنعتی برای بهسازی خاک روشی موثر با نقاط قوت زیاد به ویژه جلوگیری از رها-سازی آزادانه پسماندها در طبیعت و حفظ منابع اولیه بشمار می‌رود [۱۸-۱۶]. در این راستا، به دلیل حجم بسیار زیاد (سالانه حدود ۴۰۰ میلیون تن) تولید انواع روباره در صنعت فولاد و البته ترکیبات مناسب تشکیل‌دهنده آنها (حاوی مقادیر فراوان سیلیس و آلومینیوم)، استفاده از این مواد برای اصلاح خاک‌های مسئله‌دار به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۱۹]. زائادات صنایع دیگر از جمله پودر بسیار ریز زئولیت (NZ) نیز به دلیل ابعاد فوق‌العاده کوچک و سطوح فعال آلومینوسیلیکات، تمایل زیادی برای مشارکت در واکنش‌های ثانویه پوزولانی و در نتیجه بهسازی خاک دارند. پودر NZ همزمان با فرآیند آماده‌سازی زئولیت مورد نیاز در اندازه‌های متفاوت برای صنایع مختلف، به مقدار قابل ملاحظه‌ای تولید شده و یک پسماند صنعتی بلااستفاده به شمار می‌رود [۲۰]. لازم به ذکر است، زئولیت به دلیل ظرفیت مناسب تبادل کاتیونی، ساختار مجوف با تونل‌های بهم‌پیوسته، و قابلیت بسیار زیاد برای جذب و نگهداشت آب کاربردهای متعددی دارد. با استناد به نتایج حاصل از پژوهش‌های اخیر، حضور ترکیبات با اندازه نانو در فرآیند تثبیت می‌تواند از طریق تاثیر همزمان افزایش توان تولید ترکیبات سیمانی و اصلاح فیزیکی شبکه حفرات خاک (بواسطه انسداد فضای مابین ذرات) باعث بهبود قابل ملاحظه مشخصات مکانیکی به ویژه دوام خاک شود [۱۵]. بطوریکه با وجود جامعیت پژوهش‌های داخلی (مانند یوسفی و همکاران [۲۱] در زمینه کاربرد خاک‌اره، غفاری و همکاران [۲۲] در خصوص عملکرد سرباره برای اصلاح خاک آلوده، گودرزی و اکبری [۲۳] به منظور بررسی اثر کنورتور بر رفتار رس‌های نرم، و گودرزی و زمانیان [۲۴] برای ارزیابی نانو ذرات سیلیکافوم) و مطالعات متعدد بین‌المللی [مانند: ۶، ۸، ۱۷-۲۰، ۲۵-۳۰] در زمینه کاربرد مجزا انواع ترکیبات دورریز، اما مطالعه در زمینه استفاده از ژئوپلیمر^۲ مرکب مبتنی بر حضور توأم آهک-روباره و نانو مواد زائد پوزولانی مانند NZ برای اصلاح رفتار خاک‌های ریزدانه (خصوصاً کنترل تغییر حجم مصالح به شدت تورمی) محدود می‌باشد. از طرفی، بررسی مطالعات گذشته [مانند: ۲۶-۲۸] نشان می‌دهد صرف نظر از نوع ماده افزودنی، رویکرد تثبیت شیمیایی می‌تواند سبب ایجاد رفتار تُرد و شکننده شده که به هیچ وجه مطلوب

۱. خسارت مالی ناشی از خاک‌های تورمی در سرتاسر دنیا بیش از ۱۰ بیلیون دلار تخمین زده می‌شود.

۲. فناوری ژئوپلیمرزاسیون از طریق اختلاط مواد خام حاوی آلومینوسیلیکات و فعال‌کننده‌های قلیایی، می‌تواند نقش بسزایی در جامدشدگی و بهبود رفتار خاک ایفا نماید [۲۵]. با وجود توسعه گسترده این فناوری در صنعت بتن، اما آگاهی از عملکرد ژئوپلیمرها در ژئوتکنیک نیازمند مطالعات تکمیلی است.

سازه‌های مهندسی نیست. امروزه تلفیق مسلح‌سازی (خصوصاً با الیاف) و مواد افزودنی به عنوان راهکاری موثر برای افزایش شکل‌پذیری مصالح مطرح می‌باشد [۱۷-۱۶ و ۲۹]. اما تاکنون تاثیر این راهبرد در بهبود مشخصات رس‌های تورمی حاوی ژئوپلیمر بر پایه ترکیب پسماندهای صنعتی و افزایش شاخص دوام در مقابل شرایط محیطی مهاجم به طور دقیق بررسی نشده است. لذا در مطالعه حاضر با انجام طیف متنوعی از آزمایش‌های مختلف (شامل تعیین پتانسیل تورم، تاب‌های کششی و فشاری، آنالیزهای ریزساختاری XRD، SEM و اندازه‌گیری سرعت امواج التروسونیک)، اهم اهداف پژوهش به شرح ذیل می‌باشند:

الف- مقایسه اثربخشی ژئوپلیمر مرکب در بهبود پارامترهای ژئومکانیکی رس‌های به شدت متورم‌شونده نسبت به عملکرد آهک تنها

ب- مطالعه تاثیر دوره‌های متناوب یخ و ذوب بر رفتار مصالح تورمی تثبیت شده با آهک یا ژئوپلیمر

پ- بررسی نقش هم‌افزایی حضور الیاف و ژئوپلیمر در ارتقاء قابلیت شکل‌پذیری و شاخص دوام خاک‌های منبسط‌شونده

بطور خلاصه مهمترین جنبه جدید مطالعه پیشرو، تلفیق نانو ذرات و مسلح‌سازی در ارتقاء نتیجه فرآیند ژئوپلیمریزاسیون یک نوع ژئوپلیمر تک فازه مرکب مبتنی بر روباره و آهک به منظور بهبود راندمان تثبیت سنتی (استفاده از آهک تنها) است. در واقع اگرچه در بسیاری از مطالعات گذشته، بطور مجزا تاثیر انواع ژئوپلیمرها، نانو مواد و الیاف مورد بررسی قرار گرفته ولی هم‌افزایی سیستمی مرکب از این راهکارها و تحلیل ساز و کار آنها (به ویژه از نگاه ریزساختاری) در شدت‌بخشی اصلاح مشخصات ژئومکانیکی رس‌های تورمی، بهبود دوام خاک، امکان کاهش زمان نگهداری و مصرف کمتر آهک ارائه نشده است. یکی دیگر از مزیت‌های پژوهش حاضر، ارزیابی قابلیت استفاده از نانو ذرات با منشاء پسماند صنعتی می‌باشد در حالیکه رویکرد اغلب مطالعات موجود بر پایه نانو مواد معمولی بوده که به دلیل قیمت زیاد آنها، می‌تواند جنبه اجرایی طرح را با چالش مواجه نماید. همچنین در بسیاری از پژوهش‌های موجود، اساساً به مسئله امکان کاهش شکل‌پذیری مصالح پس از تثبیت با ژئوپلیمر توجه نشده که این موضوع در مطالعه حاضر نیز به دقت بررسی و راهکار اصلاح آن ارائه شد. شایان ذکر است ترکیب نانو-ژئوپلیمر تک فازه پژوهش حاضر و ارزیابی تاثیر آن بر خصوصیات خاک‌های تورمی به ویژه مقابله با شرایط محیطی مهاجم کاملاً منحصر بفرد و نوآورانه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی خصوصیات مواد مصرفی

در تحقیق پیشرو از یک نمونه رس تقریباً خالص (عمدتاً حاوی سدیم-مونت‌موریلونیت) مربوط به معادن اطراف شهر سمنان استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های شناسایی متداول، مشخصات کانی‌ساخت و خصوصیات ژئوتکنیکی آن مطابق جدول ۱ بدست آمد. بر اساس نتایج ارائه شده و با استناد به شاخص تورم طبق استاندارد ASTM-D4829 و همچنین کنترل معیارهای مختلف تجربی، خاک مورد استفاده در گروه مصالح به شدت متورم‌شونده قرار می‌گیرد. بر اساس اغلب روش‌های موجود برای ارزیابی پتانسیل تورم، معمولاً با معرفی یک شاخص و لحاظ کردن بازه‌هایی برای آن شاخص، خاک به گروه‌های مختلفی شامل تورم کم تا زیاد تقسیم می‌شود. بطوریکه در گروه با تورم زیاد، هرچقدر هم وضعیت خاک از شاخص مورد نظر بیشتر باشد ولی همچنان در این گروه قرار خواهد گرفت. خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر نیز این وضعیت را داشته و لذا برای توصیف پتانسیل تورم بسیار زیاد آن، از واژه به شدت تورمی استفاده شد. دلیل انتخاب چنین خاکی، ارزیابی توانایی ترکیب الیاف و ژئوپلیمر پیشنهادی برای کنترل و مهار یک وضعیت حداکثری پتانسیل تغییر حجم تورمی بود. مصالح اولیه برای ساخت نانو ژئوپلیمر مرکب پژوهش حاضر، به صورت ترکیبی از آهک، روباره فولادسازی، پسماند پوزولانی NZ به همراه محلول قلیایی حاوی سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم مدنظر قرار گرفت. آهک مورد استفاده به صورت هیدراته $[Ca(OH)_2]$ و از نوع خالص (مرک، با خلوص ۹۶٪) انتخاب شد. در جدول ۲ وضعیت

ظاهری و نتایج آنالیز XRF^۱ این مواد به همراه خاک تورمی مورد استفاده، ارائه شده است. پس از تجزیه و تحلیل نتایج طیف وسیعی از مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد و فعال سازی روباره‌ها برای بهسازی خاک [مانند: ۱۸-۱۹ و ۳۴]، کارهای مرتبط با تهیه ژئوپلیمر بر پایه استفاده از پسماندهای صنعتی برای اصلاح مصالح رسی [مانند: ۳۵-۳۷] و همچنین ارزیابی عملکرد چندین ترکیب مختلف ساخته شده از مواد مورد نظر بر روی رفتار خاک مورد مطالعه، نهایتاً طرح اختلاط نانو ژئوپلیمر تک فازه پیشنهادی (SNZBG)^۲، به صورت نسبت یک به چهار آهک به روباره و جایگزینی ۳۰٪ وزن جامد روباره با پسماند NZ به همراه محلول قلیایی معادل رطوبت بهینه نمونه رسی مورد استفاده، انتخاب شد. ترکیب بهینه محلول قلیایی حاوی ترکیب سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم با نسبت ۲/۵ بدست آمد. از طرفی غلظت محلول قلیایی شامل ترکیب سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم به نحوی تنظیم شد که میزان یون آزاد Na⁺ در سیستم به مقدار ۱۵٪ وزنی ماده افزودنی باشد.





جدول ۱: مشخصات کانی ساخت و خصوصیات ژئومکانیکی نمونه خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر

Table 1. Mineralogical and geomechanical characteristics of soil sample used in this study

مشخصه	مقدار/نوع	مرجع
ترکیبات کانی ساخت	عمدتاً مونت موریلونیت، کوارتز، کلسیت	طیف پراش اشعه ایکس
قابلیت تبادل کاتیونی (Cmol/kg)	۸۰/۲	[۲۶]
کاتیون غالب تبدالی	سدیم	[۲۶]
نشانه خمیری (%)	۳۲۷	ASTM D4318
مقدار ذرات رسی (%)	۸۱/۹	ASTM D7928
نوع خاک (طبق روش طبقه بندی متحد)	CH	ASTM D2487
حداکثر دانسیته خشک (g/cm ³)	۱/۳۱	ASTM D698-12
رطوبت بهینه (%)	۴۵/۸	ASTM D698-12
پتانسیل تورم (%)	۱۶۳	ASTM-D4546

جدول ۲: مشخصات ظاهری و نتایج XRF خاک مصرفی (Mont.)، آهک (L)، روباره فولادسازی (S) و نانو ذرات زئولیت (NZ)

Table 2. Appearance and the XRF results of soil sample (Mont.), lime (L), slag (S), and zeolite nanoparticles (NZ)

وضعیت ظاهری	NZ		S			L		Mont.			
											
درصد اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	LOI*
Mont.	61.97	15.58	3.81	1.43	3.34	2.44	0.92	---	0.36	0.16	9.93
L	0.19	0.14	0.21	96.26	0.76	---	---	---	0.61	---	1.78
S	32.62	14.17	1.23	34.41	7.64	0.52	0.62	---	2.23	1.36	5.17
NZ	69.34	13.18	1.82	1.21	0.37	3.75	4.46	---	0.53	0.28	5.81

* Loss on ignition

¹. X-ray Fluorescence


². Slag nano-zeolite based geopolymer

شایان ذکر است به منظور تعیین طرح اختلاط بهینه ژئوپلیمر پیشنهادی، ابتدا ترکیب آهک-روباره به صورت سه نسبت مختلف شامل یک به دو، یک به چهار و یک به شش انتخاب و سپس مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰٪ وزنی روباره با پسماند NZ در هر ترکیب جایگزین شد. علاوه بر این، پنج نسبت از سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم به صورت ۱ به ۱، ۱/۵ به ۱، ۲ به ۱، ۳/۵ به ۱ و ۳ به ۱ انتخاب شد. در ادامه با ساخت نمونه تک محوره (مطابق توضیحات بخش ۲-۲) برای هر ترکیب (مجموعاً ۱۸۰ نمونه) و پس از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری، بر حسب تغییرات میزان مقاومت فشاری، نمونه با بیشترین قدرت جامدشدگی به عنوان طرح بهینه SNZBG انتخاب شد. بنحویکه در مطالعه حاضر به منظور پرهیز از طولانی شدن مقاله، صرفاً نتیجه مربوط به طرح بهینه نهایی برای ادامه کار مد نظر قرار گرفته و از پرداختن به جزئیات روند انتخاب طرح بهینه (شامل تحلیل مفصل صورت گرفته به منظور تشریح نتایج) و یا انجام سایر آزمایش‌ها در این قسمت اجتناب شده است. به منظور امکان ارزیابی عملکرد ژئوپلیمر SNZBG، آهک تنها نیز به صورت جداگانه برای اصلاح خاک مدنظر قرار گرفت. از طرفی، میزان کل ماده افزودنی شامل آهک تنها و یا SNZBG برای ترکیب با خاک در بازه صفر تا ۲۰٪ وزن خشک نمونه‌ها لحاظ گردید.

امروزه به دلیل سادگی کاربرد، ظرفیت کششی زیاد، پایایی مناسب و قابلیت توزیع نسبتاً یکنواخت درون مصالح، کاربرد الیاف شیمیایی (به ویژه پلی پروپیلن، PP) به عنوان المان‌های میکروتسلح‌کننده در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران رونق فراوانی یافته است [۷، ۱۵، ۱۷، ۲۶ و ۲۸]. بر این اساس در مطالعه حاضر نیز برای تقویت ترکیب خاک-افزودنی، از یک نوع الیاف PP با مشخصات اولیه مطابق جدول ۳ استفاده گردید. شایان ذکر است انتخاب نوع و جزئیات الیاف مصرفی، با استناد به نتایج حاصل از پژوهش‌های مشابه گذشته [۱۹ و ۲۹] و با توجه به ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی این مطالعه، صورت پذیرفت. از دیگر سو، با انجام یک سری آزمایش‌های مقدماتی (شامل تعیین مقاومت‌های کششی و فشاری مطابق جزئیات ارائه شده در بخش ۲-۲)، میزان بهینه الیاف برای مسلح‌سازی سیستم خاک-افزودنی تقریباً برابر ۱٪ وزن قسمت جامد بدست آمد؛ که البته با مقادیر گزارش شده در تحقیقات قبل [۲۰] تطابق مناسبی دارد.

جدول ۳: مشخصات الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در تحقیق حاضر

Table 3. Characteristics of polypropylene (PP) fibers used in this study

مقدار/وضعیت	مشخصه	وضعیت ظاهری
۱۲	طول (میلیمتر)	
۳۶۰	تاب کششی (MPa)	
عالی (Excellent)	مقاومت در برابر حملات اسیدی و بازی	
۳۲۷	قطر (μm)	
۲۸۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)	

۲-۲- نحوه نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها

با هدف ارزیابی و مقایسه تاثیر مواد افزودنی مورد مطالعه (شامل آهک تنها، نانو-ژئوپلیمر و ترکیب آن با الیاف) بر پارامترهای ژئومکانیکی خاک رسی به شدت منسبط‌شونده، انجام آزمایش‌های تعیین پتانسیل تورم، اندازه‌گیری مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و همچنین تعیین ظرفیت کششی غیر مستقیم (ITS)^۱ مصالح در شرایط قبل و بعد از افزودن درصد‌های مختلف از مواد اصلاح‌کننده، در دستور کار قرار گرفت. در این راستا، برای تعیین Sp، ابتدا نمونه‌های رسی با درصد‌های وزنی مختلف (صفر تا ۲۰٪ قسمت جامد) از مواد افزودنی به صورت جداگانه مخلوط و کاملاً یکنواخت شدند. در مرحله بعد، با اضافه کردن مایع (آب مقطر یا محلول قلیایی با غلظت مشخص فعال‌کننده طبق توضیحات بخش ۲-۲) به هر نمونه، مخلوط حاصل بطور کامل همگن و سپس درون رینگ دستگاه ادنومتر با قطر ۵۰ mm و ارتفاع ۲۰ mm تخلیه و فرآیند تراکم تا رسیدن به دانسیته خشک حداکثر (طبق جدول ۱) از طریق اعمال فشار استاتیکی، انجام شد. شایان ذکر است رطوبت مورد نظر برای

^۱. Indirect tensile strength

ساخت نمونه‌ها نیز معادل رطوبت بهینه (طبق جدول ۱) انتخاب شد. از دیگر سوء، با استناد به نتایج حاصل از مطالعات گذشته، قطعاً حضور مواد افزودنی سبب تغییر رطوبت بهینه و میزان حداکثر دانسیته خشک مصالح رسی شده، منتهی مراتب در پژوهش حاضر با هدف امکان مقایسه نتایج مواد افزودنی مختلف با یکدیگر، شرایط ساخت نمونه‌ها (تراکم و رطوبت) یکسان مدنظر قرار گرفت. در سیستم مسلح، پس از طی مراحل تهیه ترکیب یکنواخت خاک-افزودنی، درصد بهینه الیاف نیز به آن اضافه و با همزن مکانیکی مخلوط شد. در ادامه پس از اطمینان از توزیع یکنواخت فیبر، این نمونه‌ها نیز مشابه مرحله بدون الیاف، درون رینگ-های دستگاه ائومتر متراکم شدند. در ادامه، هر نمونه را بوسیله پارافیلیم پوشانده و سپس درون ژرمیناتور با رطوبت محیطی $90\% \pm 2$ و دمای 25 ± 2 °C طی زمان‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری شدند. پس از اتمام دوره عمل‌آوری، آزمایش تورم بر روی هر نمونه طبق دستورالعمل شماره ۴۵۴۶ آئین‌نامه ASTM انجام شد. مراحل ساخت نمونه‌ها برای آزمایش‌های UCS و ITS دقیقاً مشابه روند فوق بوده با این تفاوت که قالب مورد استفاده در این بخش، استوانه فلزی به ارتفاع ۷۰ mm و قطر ۳۵ mm بود. بنحویکه پس از ساخت، هر نمونه از قالب خارج، پوشش کامل آن با پارافیلیم انجام و سپس فرآیند عمل‌آوری صورت پذیرفت. در ادامه مقاومت فشاری محدود نشده هر نمونه طبق دستورالعمل شماره ۲۱۶۶ آئین‌نامه ASTM با اعمال بار محوری از طریق دستگاه مدل Arma-test و افزایش تدریجی بارگذاری با سرعت $1/2$ mm/min اندازه‌گیری گردید. مقاومت کششی نمونه‌ها نیز بر اساس روش پیشنهادی مطالعه صفا و همکاران [۱۶] تعیین شد.

با استناد به طیف وسیعی از مطالعات گذشته [۱۵-۱۳، ۲۹]. یکی از روش‌های پیشنهادی به منظور بررسی پایداری طولانی مدت مشخصات رفتاری نمونه‌های اصلاح شده، ارزیابی تغییر پاسخ تنش-کرنش آنها تحت شرایط مهاجم محیطی از جمله چرخه‌های متناوب یخ و ذوب (F-T)^۱ است. بنابراین در تحقیق حاضر نیز با هدف اطمینان از پایایی عملکرد ژئوپلیمر SNZBG، آزمایش F-T بر روی سه گروه از مصالح شامل (I) تثبیت شده با آهک تنها، (II) تثبیت شده با SNZBG و (III) تثبیت شده با ترکیب SNZBG و الیاف طبق دستورالعمل شماره ۵۶۰ آئین‌نامه ASTM، صورت پذیرفت. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها را مشابه مراحل آماده‌سازی برای انجام آزمایش UCS تهیه و بعد از تکمیل زمان عمل‌آوری، از ژرمیناتور بیرون آورده و کاملاً درون پلاستیک محصور شدند. در ادامه تحت دو فاز مجزا شامل مرحله انجماد (نگهداری به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر با دمای منفی ۲۰ درجه سانتیگراد) و مرحله ذوب (۲۴ ساعت نگهداری در هوای آزاد با دمای ۲۵ °C به منظور ذوب یخ درون ماتریکس خاک) قرار گرفتند. تکمیل این دو فاز، بمنزله یک دوره یخ-ذوب محسوب شده و بر اساس استاندارد D560 و تحقیقات مشابه [۱۹، ۳۸]، دوره‌های F-T تا ۱۲ مرتبه تکرار و در هر بار مقاومت مصالح اندازه‌گیری شد.

در کنار آزمایش‌های مکانیکی و با هدف شناخت ساز و کار تاثیر مواد افزودنی در فرآیند اصلاح خاک و آگاهی از نحوه تاثیر آنها برای مقابله با شرایط محیطی مهاجم، مشخصات ریزساختاری مصالح نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، آنالیزهای انجام شده شامل تعیین سرعت عبور پالس التراسونیک (UPV)^۲، عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی (SEM)^۳ و تهیه طیف‌های پراش اشعه ایکس (XRD)^۴ می‌باشند. بنحویکه نمونه‌های UCS قبل از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری مقدار UPV با اساس استاندارد ASTM-C597 و طبق جزئیات پیشنهادی در مطالعات مشابه [مانند: ۳۹-۴۰] استفاده شد. برای تهیه تصاویر SEM، قطعات خاک با ابعاد مناسب بعد از آزمایش UCS اخذ و پس از مراحل اولیه آماده‌سازی و ایجاد پوشش طلا، با استفاده از دستگاه مدل VEGA\\TESCAN در بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر عکس‌برداری شدند. بخش دیگری از نمونه‌های باقی‌مانده از آزمایش UCS را کاملاً پودر کرده (عبوری از الک نمره ۲۰۰) و سپس با استفاده از دستگاه XRD مدل بروکر D8، طیف‌های اشعه ایکس آنها به تفکیک تهیه گردید. شایان ذکر است در پژوهش حاضر به منظور اطمینان از نتایج، کلیه آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری به صورت سه بار تکرار بوده و از نتیجه میانگین آنها برای ترسیم نمودارها استفاده شد. اگرچه، با توجه به دقت کافی در مراحل مختلف کار، تفاوت معنی‌داری بین نتایج تکرار آزمایش‌ها مشاهده نشد.

1. Freezing-thawing

2. Ultrasonic pulse velocity

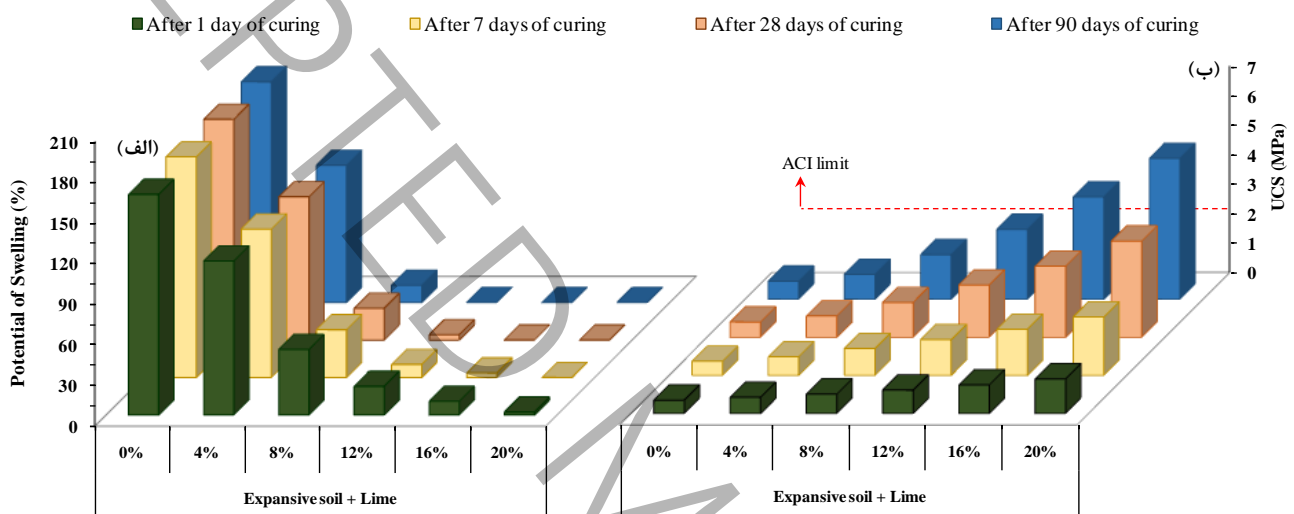
3. Scanning electron microscope

4. X-Ray diffraction

۳- ارائه نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی عملکرد آهک تنها در اصلاح مشخصات ژئومکانیکی خاک

همانطور که پیشتر مطرح شد در پژوهش حاضر به منظور امکان سنجش قابلیت نانو ژئوپلیمر SNZBG در فرآیند بهسازی، ابتدا عملکرد آهک تنها (رویکرد تثبیت سنتی) در اصلاح مشخصات ژئومکانیکی خاک تورمی و تامین پایایی مصالح تحت شرایط محیطی مهاجم مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱ نتایج مربوط به تغییرات پتانسیل تورم و UCS نمونه‌ها در حضور مقادیر مختلف آهک و در زمان‌های متفاوت نگهداری ارائه شد. ملاحظه می‌شود حضور آهک نقش موثری در کاهش پتانسیل تورم (امکان تورم صفر) و بهبود مقاومت مصالح (افزایش مقدار UCS تا حدود ۸ برابر نمونه اولیه فاقد تثبیت‌کننده) دارد. بطوریکه روند تغییرات، تابعی از مقدار افزودنی و زمان عمل‌آوری است.



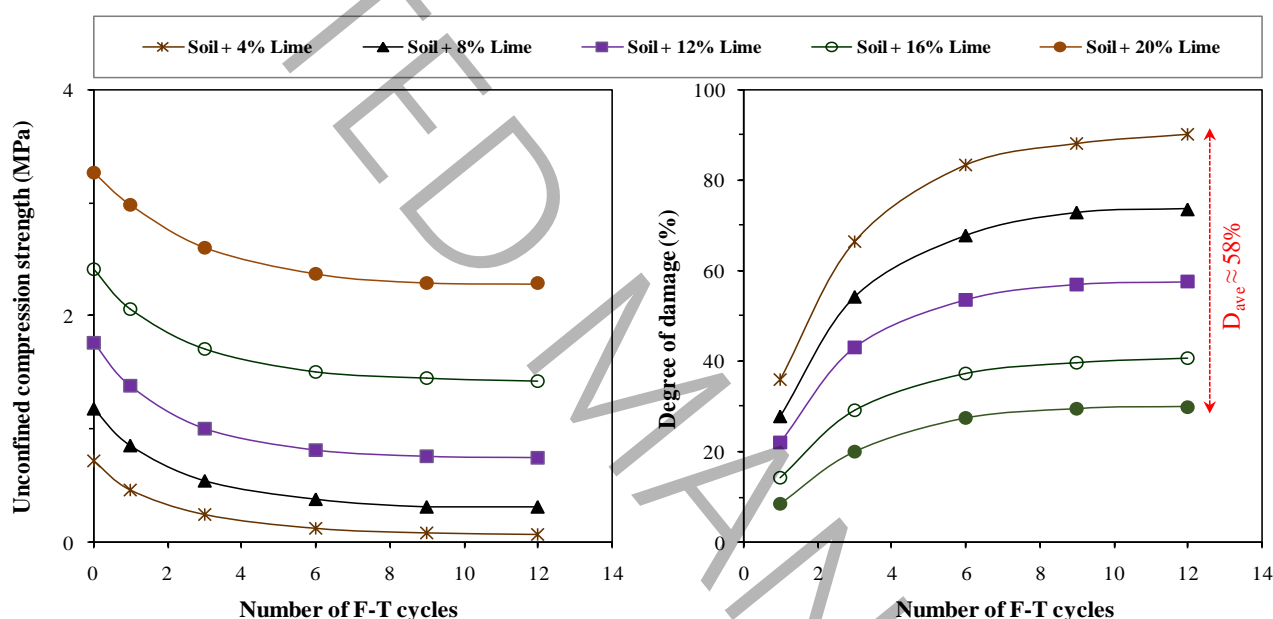
شکل ۱. تاثیر آهک تنها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری بر قابلیت تورم و مقاومت فشاری خاک

Fig. 1. Effect of lime alone on the swelling potential and UCS of soil sample at different times of curing

با استناد به استاندارد ASTM-D4829، نتایج ارائه شده در شکل ۱-الف موید آنست که افزودن حدود ۱۰٪ آهک و بعد از ۷ روز نگهداری، سبب قرارگیری خاک در گروه با درجه تورم کم (تورم زیر ۲۰٪) خواهد شد. اگرچه، در این حالت، طبق شکل ۱-ب، سهم افزایش مقاومت خاک نسبتاً محدود (تقریباً نزدیک به دو برابر نمونه فاقد افزودنی) و مقدار آن حدود ۱ MPa است. بنحویکه با مد نظر قرار دادن شاخص مقاومت پیشنهادی توسط ACI^۱ [۴۱]، بر اساس نتایج بدست آمده، حداقل ۱۶٪ آهک و تقریباً یک ماه عمل‌آوری برای موفقیت فرآیند تثبیت لازم می‌باشد. علت این اختلاف عملکرد در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب را می‌توان به ساز و کارهای متفاوت آهک برای کنترل تورم و اصلاح مقاومت نسبت داد. در واقع، افزودن آهک به خاک تورمی مورد مطالعه با کاتیون غالب سدیم (به جدول یک نگاه کنید)، می‌تواند از طریق واکنش‌های کوتاه‌مدت (شامل جایگزینی یون‌های کلسیم با سدیم واقع بر روی سطوح رسی و همچنین افزایش غلظت املاح در مایع منفذی) سبب فشردگی لایه دوگانه پراکنشی و در نتیجه نزدیک شدن ذرات به یکدیگر شود. در این حالت، به دلیل محدود شدن امکان حضور یون‌های هیدراته در فضای مابین ذرات [۲، ۶ و ۸]، امکان مهار تورم تا بیش از ۸۰٪ فراهم شده است. از دیگر سو، با افزودن آهک کافی (حدود ۲۰٪) و گذشت زمان (حداقل ۲۸ روز)، طبق نتایج آزمایش‌های ریزساختاری (شکل‌های ۶ و ۷) زمینه برای شروع واکنش‌های پوزولانی (شامل انحلال واحدهای سازنده آلومیناسیلیکات و ترکیب آنها با یون‌های کلسیم آزاد در محیط) و ایجاد فازهای سیمانی (مشاهده تشکیل ترکیبات جدید هیدراته) در سیستم فراهم خواهد شد. در این شرایط، ذرات فولکوله شده ناشی از واکنش‌های کوتاه‌مدت، با قدرت بیشتری به یکدیگر متصل و علاوه بر تشدید کاهش پتانسیل تغییر حجم (تورم برابر صفر)، مشخصات مقاومتی خاک نیز بهبود یافته و بیش از ۸۰٪ نمونه فاقد تثبیت‌کننده می‌باشد. بر این اساس،

^۱. American Concrete Institute

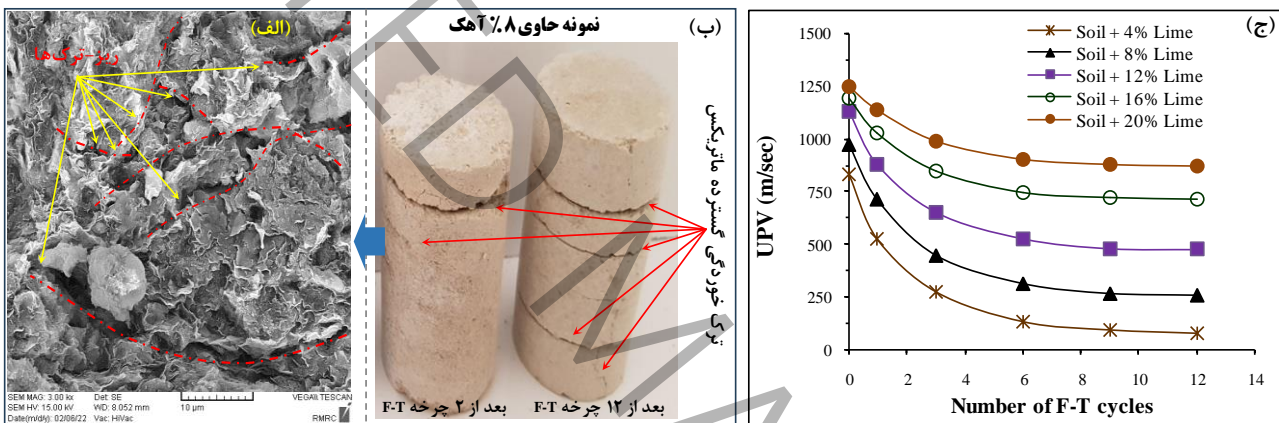
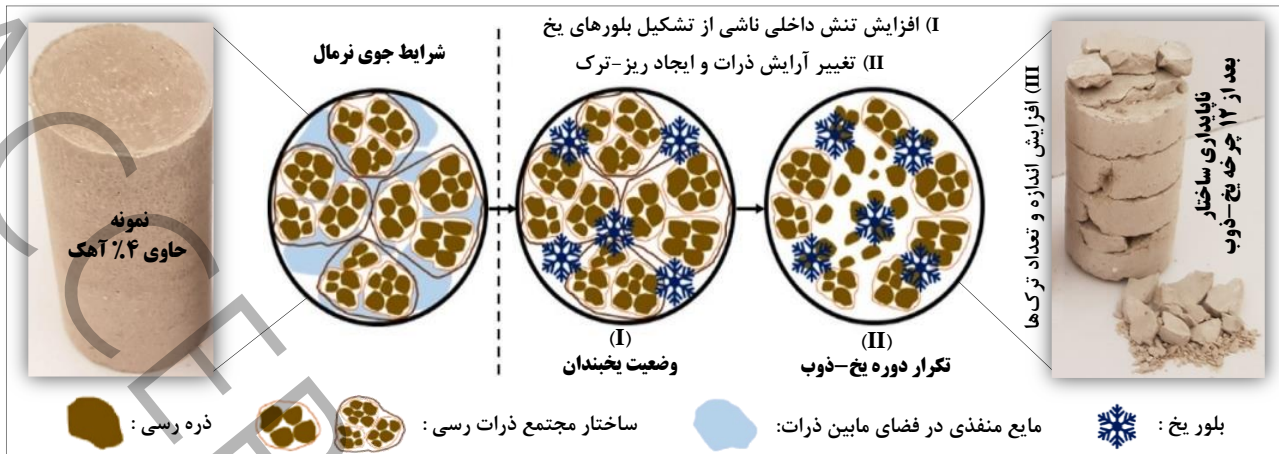
در حضور مقادیر اندک آهک (کمتر از ۱۰٪) و زمان کم عمل‌آوری (کمتر از ۷ روز)، عملاً ظرفیت برای انجام واکنش‌های پوزولانی کم و به دلیل تاثیر ناچیز ایجاد ساختار مجتمع بر خصوصیات مقاومتی خاک [۱۶، ۴۲]، لذا افزایش UCS در این حالت کمتر از ۵۰٪ است. به عبارت دیگر، نتایج شکل ۱ نشان‌دهنده آنست که کنترل همزمان تورم و افزایش مقاومت در مصالح تورمی، نیازمند مصرف قابل ملاحظه آهک (حدود ۲۰٪) و زمان‌های طولانی نگهداری (حداقل ۲۸ روز) بوده که از دیدگاه اجرایی و اقتصادی، به هیچ وجه وضعیت مطلوبی بشمار نمی‌رود. بر اساس نتایج شکل ۲، نکته حائز اهمیت دیگر در خصوص ضعف عملکرد نمونه‌های اصلاح شده با آهک، امکان از دست رفتن بخش زیادی از ظرفیت باربری بر اثر مجاورت با عامل محیطی مهاجم (دوره‌های متناوب ذوب و یخ) می‌باشد. بطور میانگین شاخص خرابی نمونه‌ها حدود ۵۸٪ بوده اگرچه در نمونه‌های با مقادیر کمتر از ۱۰٪ آهک، مقدار خرابی بعضاً حدود ۹۰٪ است. بنحویکه مطابق شکل ۱ علی‌رغم عملکرد موفق حضور ۱۶٪ آهک و تقریباً یک ماه عمل‌آوری برای کنترل کامل تورم خاک و تامین سطح مناسب از مقاومت (بیش از شاخص ACI) در شرایط معمول، ولی افت مقاومت در این سری از نمونه‌ها نیز پس از تجربه چرخه F-T بیش از ۳۰ درصد بوده و به کمتر از مقدار آستانه مجاز ACI ($UCS \geq 2.1 \text{ MPa}$) رسیده است.



شکل ۲. تاثیر چرخه یخ و ذوب بر خصوصیات مکانیکی خاک حاوی آهک بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

Fig. 2. Effect of F-T cycles on the mechanical properties of lime stabilized soil cured for 28 days

در واقع بر اساس ایده پیشنهادی توسط جیانگ و همکاران [۴۳] و تطبیق آن با تغییر رفتار مصالح این مطالعه، طبق شکل ۳ افزایش حجم ناشی از تشکیل بلورهای یخ می‌تواند سبب ایجاد تنش‌های اضافی درون خاک شده که در صورت ضعیف بودن قدرت اتصال بین ذرات، باعث تشکیل ریز ترک‌ها در سیستم خواهد شد. تکرار چرخه F-T، زمینه را برای رشد این ترک‌ها و زوال تدریجی فرآیند جامدشدگی فراهم و با ایجاد نواحی ضعیف برشی، در نهایت مقاومت خاک را کاهش (بعضاً تا ۹۰٪) می‌دهد. نتایج بررسی تغییر ساختار درونی ماتریکس خاک و ارزیابی ظاهر آن بعد از تجربه دوره‌های متناوب ذوب و یخ در شکل ۴، به وضوح وقوع ساز و کار فوق در ناپایداری مصالح را تایید می‌نمایند. در شکل ۴-ج مشاهده می‌شود با افزایش چرخه یخ و ذوب، سرعت پالس التراسونیک خصوصاً در نمونه‌های با مقادیر اندک آهک، شدیداً کاهش یافته است (به عنوان مثال برای نمونه حاوی ۴٪ آهک، مقدار اولیه UPV از ۸۳۰ m/sec به ۷۸ m/sec پس از ۱۲ چرخه F-T رسیده که بیانگر کاهش بیش از ۱۰ برابری این پارامتر می‌باشد). با توجه به عوامل موثر در عبور امواج از درون خاک، علت افت UPV را می‌توان به وقوع ناپیوستگی در مصالح بر اثر تشکیل ریز ترک‌های ناشی از اقدام F-T (شکل ۴-الف) و گسترش تدریجی آنها مطابق شکل ۴-ب نسبت داد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش صورت گرفته توسط بز و سزر [۳۹] مبنی بر کاهش مقدار UPV در نمونه رس نرم کائولینیتی بر اثر مجاورت با یخبندان، انطباق مناسبی نشان می‌دهد.



شکل ۴. (الف) تشکیل ریز-ترک‌ها، (ب) ناپایداری ظاهر، و (ج) تغییرات سرعت پالس التراسونیک بر اثر مجاورت خاک با چرخه یخ-ذوب

Fig. 4. (a) Formation of microcracks, (b) structural instability, and (c) variation of UPV versus F-T cycles

در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، فرآیند ترک‌خوردگی نمونه حاوی ۸٪ آهک بعد از تجربه دوره‌های متناوب یخ-ذوب مشاهده می‌شود. بنحویکه متاثر از این شرایط و بر اساس نتایج شکل ۲، مقاومت خاک از ۱/۲ MPa (در وضعیت نرمال) به حدود ۰/۳ MPa (پس از ۱۲ چرخه F-T) رسیده که بیانگر امکان ناپایداری مصالح با گذشت زمان می‌باشد. شایان ذکر است با وجود نتایج مشابه حاصل از مطالعات قبلی [مانند: ۱۴ و ۴۴]، مبنی بر کاهش مقاومت ترکیب خاک-آهک بر اثر مجاورت با عوامل محیطی مهاجم، اما درجه خرابی (DD) و زوال مصالح در تحقیق حاضر به مراتب بیشتر از مقادیر ارائه شده توسط سایر پژوهشگران می‌باشد. به عنوان مثال در نمونه حاوی ۸٪ آهک و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، بر اساس شکل ۲-ب، مقدار DD تقریباً ۷۵٪ است. در حالیکه اسمیک و شکور [۴۵] در شرایط کاملاً مشابه برای خاک رسی با دامنه خمیری کم، مقدار خرابی را نزدیک به ۱۰٪ و سلیمی و همکاران [۱۵] نیز برای خاک مارن اصلاح شده با ۶٪ آهک، خرابی را حدود ۱۷٪ گزارش کرده‌اند. علت این تفاوت رفتار، را می‌توان ناشی از قابلیت زیاد تبادل کاتیونی خاک به شدت متورم‌شونده (جدول یک) و در نتیجه مصرف بخش زیادی از آهک برای واکنش‌های کوتاه‌مدت در این مصالح نسبت داد. همچنین در این نمونه‌ها، قسمتی از آهک می‌تواند با CO₂ هوا ترکیب شده (واکنش کربناتاسیون) که اثر آن بر جامدشدگی ساختار بسیار محدود است [۴۲]. بر این اساس، سهم آهک باقی‌مانده برای مشارکت در فعالیت پوزولانی و تشکیل ترکیبات سیمانی کاهش

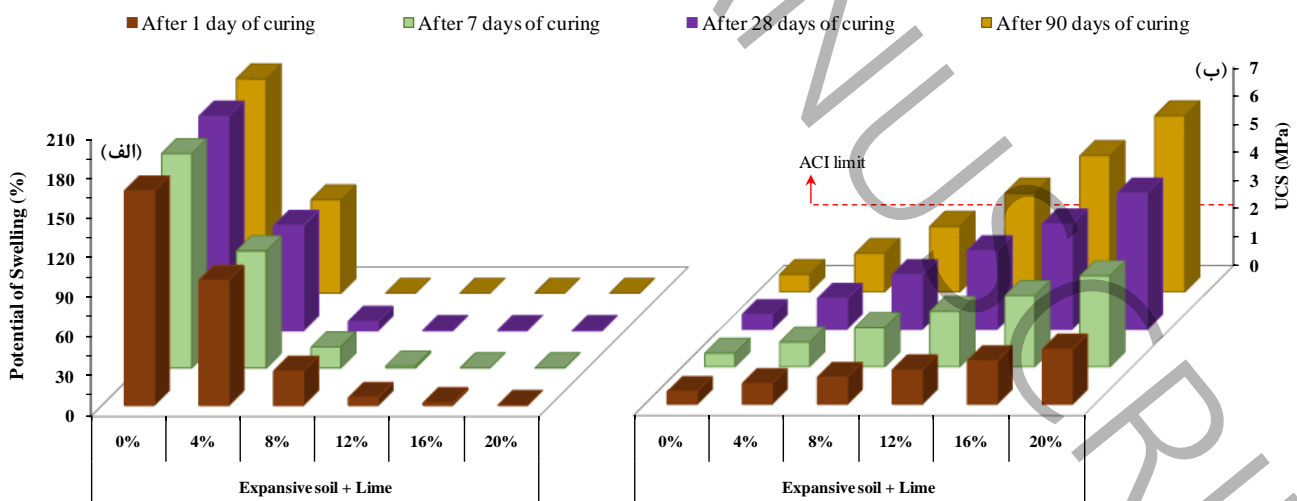
¹. Degree of damage (DD) = (1-q_n/q₀)

q_n: مقاومت فشاری مصالح بعد از n دوره یخ و ذوب، q₀: مقاومت فشاری اولیه خاک.

یافته و در نتیجه میزان بهم‌پیوستگی مستحکم ذرات (به عنوان عامل اصلی مقابله با جلوگیری از تخریب ساختار در برابر چرخه F-T) محدود خواهد بود. بنحویکه غلبه بر این وضعیت، طبق شکل ۲-الف و با استناد به شاخص مقاومتی ACI، نیازمند کاربرد مقدار زیاد آهک (۲۰٪) بوده که از حداقل لازم (یعنی ۱۶٪ آهک) برای تثبیت موفق خاک در شرایط معمول (طبق شکل ۱-ب) بیشتر می‌باشد. این نتیجه، تاکید مضاعفی بر ضعف عملکرد روش تثبیت سنتی برای بهسازی خاک‌های به شدت تورمی بوده؛ اگرچه در تعدادی زیادی از مطالعات قبل [مانند: ۱۱، ۱۲ و ۴۲] به آن توجه دقیق نشده است. بر این اساس، در ادامه کار و با هدف بهینه‌سازی فرآیند تثبیت (کاهش مصرف آهک و نیاز به زمان کمتر نگهداری)، کاربرد نانو ژئوپلیمر مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است در وضعیت واقعی، تامین شرایط مناسب عمل‌آوری در زمان‌های طولانی فرآیندی دشوار بوده و لذا امکان موفقیت رویکرد تثبیت سنتی (به دلیل نیاز به زمان زیاد نگهداری) و حصول به نتایج مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی محدود خواهد کرد.

۳-۲- ارزیابی عملکرد SNZBG در اصلاح رفتار ژئومکانیکی خاک

در شکل ۵ نتایج مربوط به تغییرات پتانسیل تورم و UCS نمونه‌ها در حضور مقادیر مختلف نانو ژئوپلیمر SNZBG در زمان‌های متفاوت نگهداری، ارائه شده است. مشاهده می‌شود همانند آهک، متناسب با افزایش مقدار SNZBG و زمان بیشتر عمل‌آوری، پتانسیل تورم و مقاومت مصالح بطور قابل توجهی بهبود یافته‌اند. از طرفی، نتایج نشان‌دهنده عملکرد به مراتب بهتر سیستم اخیر می‌باشد. بنحویکه افزودن ۱۶٪ SNZBG به خاک و صرفاً ۷ روز نگهداری، علاوه بر کنترل کامل تورم (تورم برابر صفر)، مقاومت فشاری مصالح را از ۰/۴۸ MPa به حدود ۲/۵۱ MPa رسانده و به عبارتی سبب تامین حداقل مقاومت مورد نیاز بر اساس شاخص ACI نیز شده است. مقایسه روند رفتار این سری از نمونه‌ها نسبت به نتایج ارائه شده در شکل ۱ و با در نظر گرفتن سهم صرفاً ۲۵٪ حضور آهک در ترکیب SNZBG، بیانگر کاهش حدود ۴ برابری مصرف آهک و کم کردن زمان مناسب نگهداری از ۲۸ روز به ۷ روز برای تثبیت موفق خاک است. در واقع، همانطور که قبلاً مطرح شد در تثبیت سنتی، مقداری از آهک در واکنش‌های کوتاه‌مدت و کربناتاسیون مصرف و لذا در یک میزان مشخص افزودنی، سهم آهک برای مشارکت در فعالیت‌های پوزولانی کاهش می‌یابد. بنابراین در این حالت، عملاً تشکیل کافی ترکیبات سیمانی (به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی بهبود خصوصیات ژئومکانیکی مصالح) نیازمند استفاده از مقادیر زیاد آهک (حداقل ۲۰٪) و زمان طولانی نگهداری (۲۸ روز) می‌باشد.

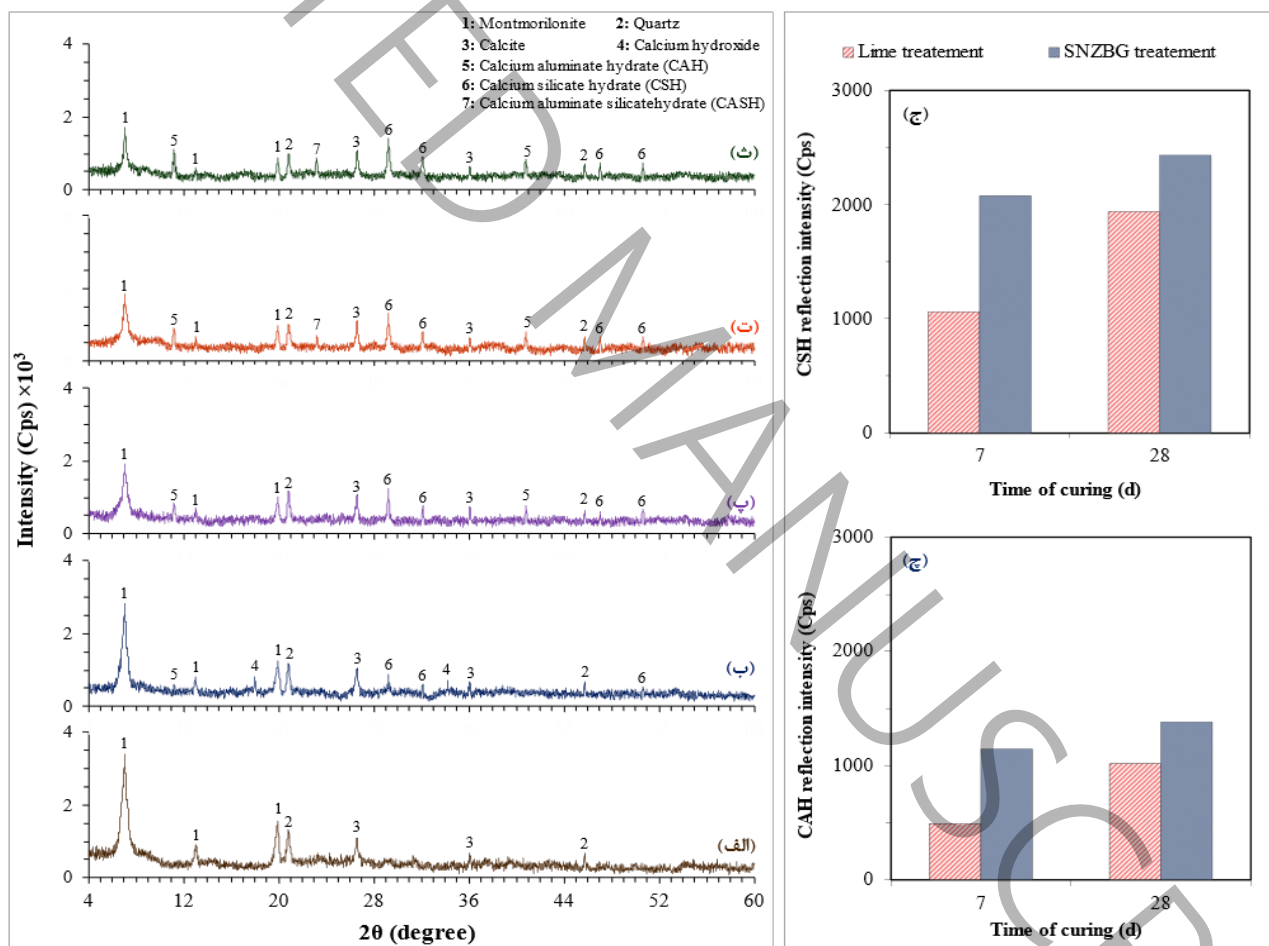


شکل ۵. تاثیر نانو ژئوپلیمر در زمان‌های مختلف عمل‌آوری بر قابلیت تورم و مقاومت فشاری خاک

Fig. 5. Effect of SNZBG on the swelling potential and UCS of soil sample at different times of curing

در مقابل برای سیستم حاوی SNZBG، شرایط کلیایی و مجاورت مستقیم آهک با واحدهای فعال آلومیناسیلیکات موجود در سرباره و ژئولیت، سبب مصرف بهینه آن در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تولید گسترده ژل‌های هیدراته در زمان‌های کمتر خواهد شد.

علاوه بر این، با استناد به نتایج حاصل از مطالعات گذشته [۱۵، ۲۰، ۴۷] حضور نانو ذرات در بهسازی خاک، می‌تواند به عنوان یک کتالیست در بخش‌های مختلف شامل: الف) افزایش جامدشدگی ساختار از طریق انسداد فیزیکی فضای مابین ذرات، ب) رشد و توسعه واکنش‌های پوزولانی بواسطه افزایش سطوح فعال حاوی آلومیناسیلیکات و ج) امکان توزیع یکنواخت مواد سیمانی درون ماتریکس خاک، عمل نماید. مجموع این فعل و انفعالات، در نهایت باعث عملکرد بهتر نمونه‌های اصلاح شده با SNZBG خواهند شد (به عنوان مثال در حضور ۲۰٪ افزودنی و پس از ۷ روز عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری مصالح حاوی ژئوپلیمر و آهک به ترتیب برابر ۳/۲۱ و ۱/۹۸ MPa است. به عبارتی در شرایط یکسان و علی‌رغم کاهش بیش از ۴ برابری مقدار آهک در سیستم مبتنی بر ژئوپلیمر، رفتار خاک بیش از ۱/۵ برابر بهبود یافته است). در ادامه به منظور اطمینان از صحت ساز و کارهای فوق، مشخصات ریزساختاری نمونه‌های حاوی نانو-ژئوپلیمر و آهک تنها، به تفکیک تعیین و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل‌های ۶-الف: طیف پراش اشعه ایکس نمونه تومی طبیعی، ۶-ب: طیف پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۱۶٪ آهک پس از ۷ روز عمل‌آوری، ۶-پ: طیف پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۱۶٪ آهک پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، ۶-ت: طیف پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۱۶٪ SNZBG پس از ۷ روز عمل‌آوری، و ۶-ث: طیف پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۱۶٪ SNZBG پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مشاهده می‌شود.

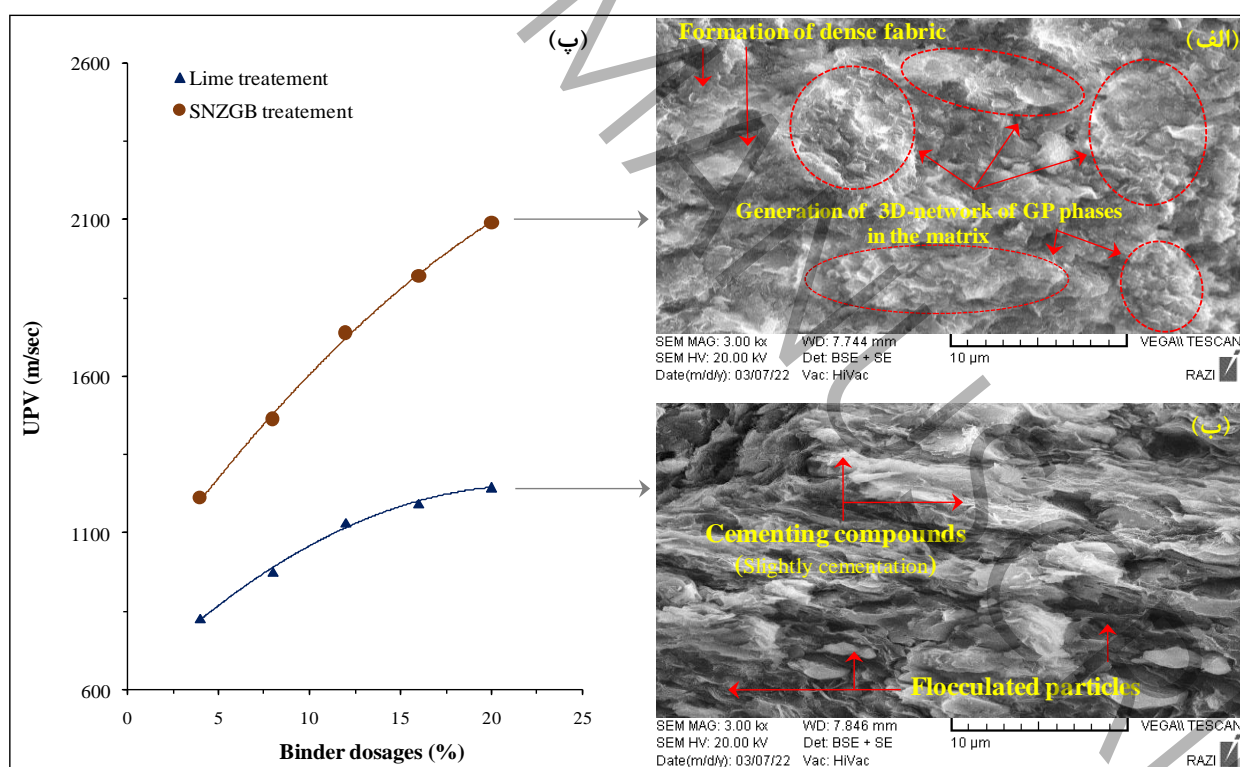


شکل ۶. طیف‌های XRD، الف: نمونه طبیعی، ب و پ: نمونه حاوی ۱۶٪ آهک پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری، ت و ث: نمونه حاوی ۱۶٪ نانو-ژئوپلیمر پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری، ج و چ: مقایسه شدت پیک‌های CSH و CAH در نمونه‌های حاوی آهک و نانو-ژئوپلیمر

Fig. 6. XRD patterns: (a) natural soil, (b, c) soil with 16% lime after 7 and 28-d of curing, (d, e) soil with 16% SNZBG after 7 and 28-d of curing, (f, g) CSH and CAH peak intensities in lime and SNZBG stabilized soils

بطور کلی نتایج ارائه شده در شکل ۶ بیانگر آنست که حضور تثبیت‌کننده‌ها و افزایش زمان عمل‌آوری، سبب کاهش تدریجی شدت پیک‌های اصلی مونت‌موریلونیت و همچنین پیدایش و رشد ترکیبات جدید هیدراته (مانند CSH، CAH و CASH) در سیستم می‌شود.

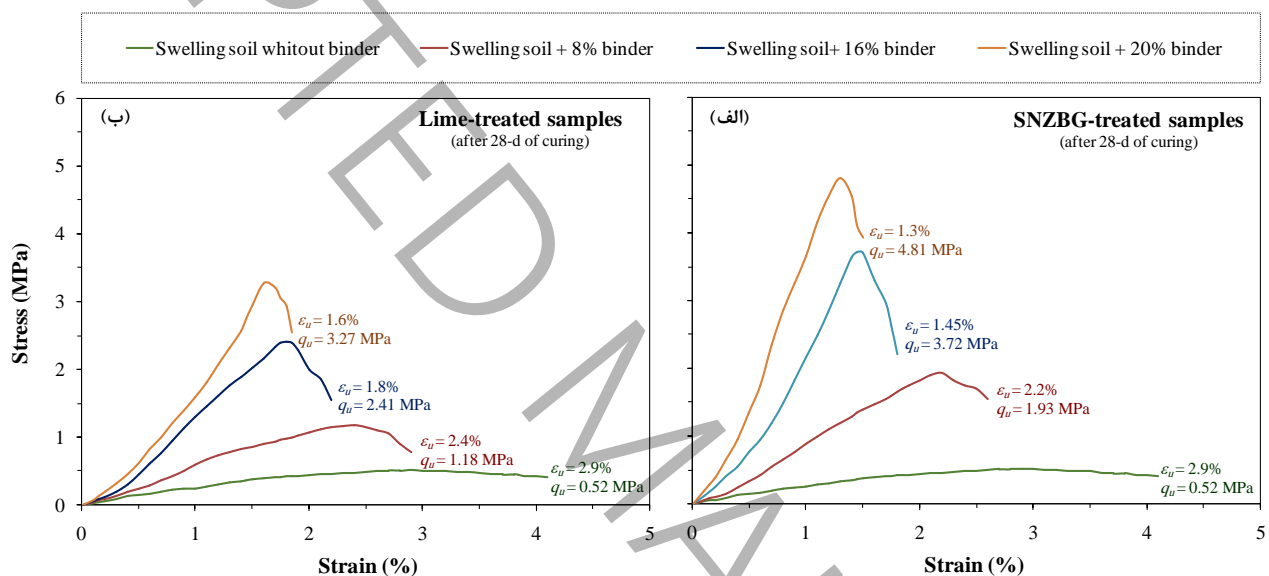
در واقع با استناد به تئوری گوی-چپمن، انحلال تمام یا بخشی از مواد افزودنی پایه کلسیمی در مایع منفذی خاک، ابتدا از طریق واکنش‌های کوتاه‌مدت (مانند تبادل کاتیونی و یا افزایش فشار اسمز) سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه پراکنشی ذرات رسی و تشکیل ساختار مجتمع در آنها خواهد شد. در این شرایط و بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته [۱۷، ۱۹]، میزان بازتاش پرتوهای اشعه ایکس توسط این ذرات و متعاقباً شدت پیک آنها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تشکیل ژل‌های سیمانی با پوشاندن سطح ذرات و محدودیت در میزان تماس آنها با پرتوهای اشعه ایکس، نیز سبب کاهش مضاعف شدت پیک‌های اصلی مونت‌موریلونیت خواهند شد. این تغییرات به نوعی بیانگر کاهش تمایل ذرات رس برای جذب و نگهداشت آب بوده که با نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱ و ۵، مبنی بر کاهش قابلیت تورم مصالح در حضور مواد افزودنی مورد مطالعه، کاملاً انطباق دارد. از طرفی، نکته حائز اهمیت دیگر در شکل ۶ آنست که در شرایط یکسان، تنوع و شدت ترکیبات سیمانی در حضور SNZBG نسبت به مصالح حاوی آهک به مراتب بیشتر (تقریباً بیش از ۲ برابر پس از ۷ روز نگهداری) می‌باشد. این نتیجه تأکیدی بر مصرف بهینه آهک در سیستم اصلاح شده با ژئوپلیمر برای تولید بیشتر ترکیبات سیمانی و افزایش جامدشدگی ساختار (رشد بیش از ۱/۵ برابر مقاومت فشاری) است. بطوریکه بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶-ب، حضور پیک‌های آهک هیدراته در شرایط محدود نگهداری برای نمونه‌های اصلاح شده با آهک تنها، نشان دهنده باقی ماندن بخشی از افزودنی بدون واکنش در محیط می‌باشد. شایان ذکر است با توجه به تأثیر رشد ترکیبات سیمانی در افزایش پیوستگی ساختار (کاهش سهم فضای خالی بین ذرات)، علاوه بر طیف‌های پراش اشعه ایکس، مقایسه سرعت پالس التراسونیک و تصاویر SEM در شکل ۷ نیز به وضوح ارتقاء ریزساختار در حضور SNZBG نسبت به آهک را تأیید می‌نماید. به عنوان مثال بر اساس شکل ۷-پ مقدار UPV خاک پس از افزودن ۲۰٪ SNZBG، تقریباً ۱/۷ برابر نمونه اصلاح شده با همان مقدار آهک می‌باشد. در واقع، با استناد به تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب و توضیحات مطرح شده در خصوص نحوه عملکرد SNZBG، توانایی تشکیل گسترده نانو ساختارهای ژئوپلیمری و انسداد حفرات در این سیستم سبب افزایش تراکم و در نتیجه رشد UPV شده است.



شکل ۷. مقایسه (الف و ب) ریزساختار و (ت) تغییرات سرعت پالس التراسونیک مصالح در حضور SNZBG نسبت به آهک

Fig. 7. Comparison of (a and b) microstructure and (d) variation of UPV versus binder dosages in the presence of SNZBG compared to lime alone

از دیگر سو، با وجود عملکرد بسیار مطلوب نانو ژئوپلیمر پیشنهادی در کاهش ۴ برابری مصرف آهک و زمان عمل‌آوری برای کنترل کامل پتانسیل تورم و افزایش حدود ۱/۵ برابری مشخصات مکانیکی رس به شدت منبسط‌شونده، اما بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۸-الف، پاسخ تنش-کرنش این سری از نمونه‌ها موید کاهش شدید مقاومت پسماند پس از نقطه پیک و به عبارتی ارائه رفتار شکننده (تمایل اندک به جذب انرژی) پس از مجاورت با تنش‌های فشاری قابل ملاحظه و امکان خرابی کامل مصالح در کرنش بیش از ۲٪ است. این شرایط تقریباً مشابه تاثیر استفاده از آهک (شکل ۸-ب) است. بطور کلی رفتار شکننده یک ضعف جدی برای عملکرد مطمئن سازه‌های ژئوتکنیکی پس از بهسازی خاک بشمار می‌رود [۲۰]؛ اگرچه در بسیاری از مطالعات قبل [مانند: ۵، ۲۵، ۳۲ و ۳۷] به این نقطه ضعف در خصوص استفاده از ژئوپلیمرها برای اصلاح خاک توجه دقیق و کافی صورت نگرفته است. لذا، در ادامه پژوهش حاضر و با هدف کنترل رفتار تردشکن مصالح، تاثیر استفاده توأم الیاف و SNZBG در بهبود مشخصات مهندسی مصالح مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.



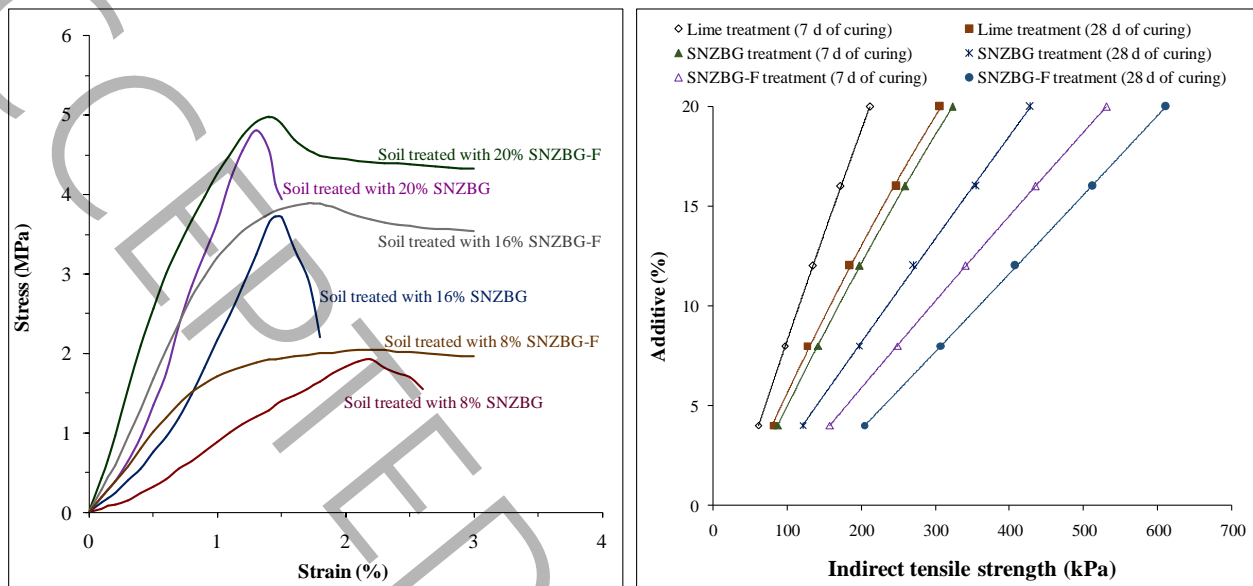
شکل ۸. پاسخ تنش-کرنش مصالح بعد از ۲۸ روز نگهداری در حضور مقادیر مختلف SNZBG (الف) و آهک (ب)

Fig. 8. The stress-strain response of stabilized soil samples after 28 days of curing in the presence of different amounts of (a) SNZBG and (b) lime

۳-۳- ارزیابی عملکرد SNZBG-F (ترکیب نانو ژئوپلیمر و الیاف) در بهبود مشخصات مهندسی خاک

در شکل ۹-الف منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها در حضور SNZBG و SNZBG-F با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود افزودن الیاف به ترکیب خاک-افزودنی، نقش بسزایی در کنترل رفتار تردشکن مصالح داشته و مانع از کاهش شدید مقاومت پسماند خاک پس از نقطه پیک (به عبارتی ایجاد رفتار شکل‌پذیر) خواهد شد. بطوریکه با افزایش کرنش، علی‌رغم امکان خرابی کامل نمونه‌های حاوی SNZBG، ولی میزان کاهش مقاومت در نمونه‌ها تثبیت شده با SNZBG-F کمتر از ۱۰٪ مشاهده می‌شود. علت بهبود عملکرد در نمونه‌های حاوی SNZBG-F را می‌توان به سه ساز و کار مجزا نسبت داد. (I) نخست آنکه حضور الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل ماهیت ساختاری (به جدول ۳ نگاه کنید)، سبب تقویت تحمل تنش‌های کششی درون خاک شده و لذا با جذب بهتر انرژی [۷، ۱۷ و ۴۸-۴۹]، شکل‌پذیری (انعطاف‌پذیری) نمونه را بهبود و در نتیجه آستانه کرنش خرابی را به تاخیر می‌اندازد. (II) از دیگر سو، توزیع الیاف در خاک با عملکرد پیل‌زدگی و مهیا کردن مسیرهای جدید انتقال تنش در فضای مابین ذرات [۱۵، ۱۹ و ۲۴]، مانع از توسعه و گسترش سریع ترک‌ها بعد از مقاومت پیک شده و لذا سهم مقاومت پسماند در مصالح بیشتر خواهد شد. (III) علاوه بر این، حضور مقادیر زیاد ترکیبات سیمانی در نمونه اصلاح شده با ژئوپلیمر (شکل ۶) و قرار گرفتن آنها بر روی سطوح الیاف، اصطکاک مابین ذرات رس و الیاف را افزایش داده و در نهایت باعث تشکیل یک ساختار درهم تنیده شده که ظرفیت تحمل کشش در سیستم را به شدت بهبود خواهد

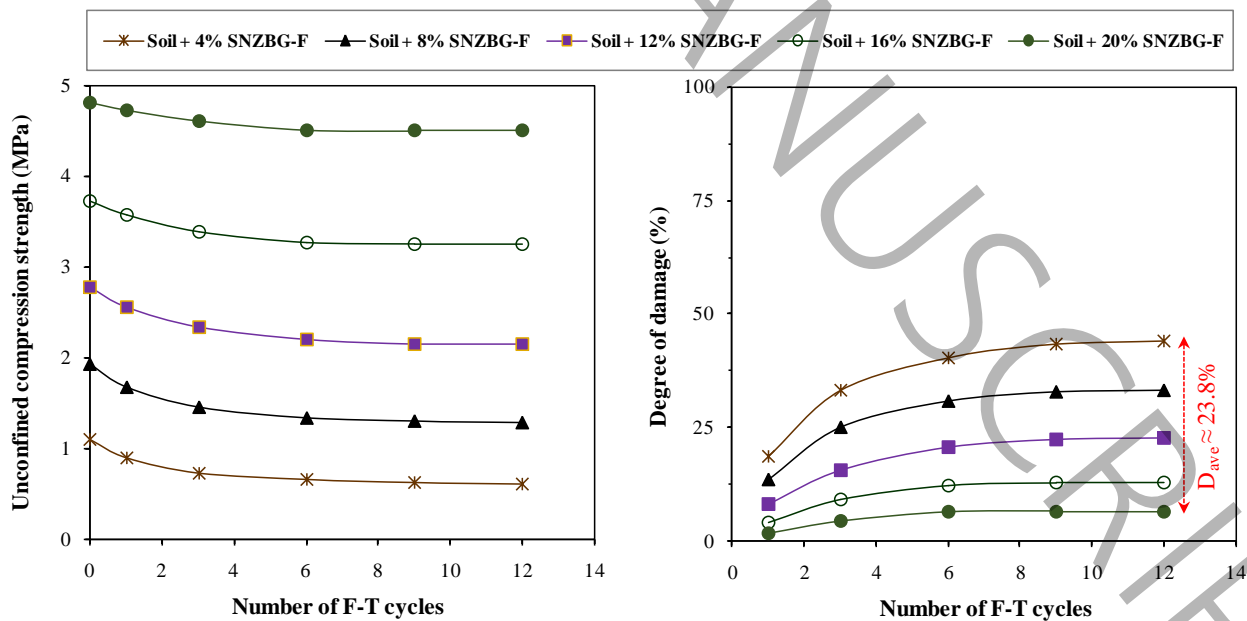
بخشید. نتایج ارائه شده در شکل ۹-ب صحت فرضیات فوق را کاملاً تایید کرده بطوریکه در شرایط یکسان، تاب کششی نمونه‌های حاوی SNZBG-F بعضاً تا دو برابر بیشتر از مصالح اصلاح شده با ژئوپلیمر تنها است.



شکل ۹. تاثیر راهبردهای متفاوت بهسازی در (الف) پاسخ تنش-کرنش و (ب) تاب کششی مصالح

Fig. 9. Effect of different improvement strategies on (a) the stress-strain response and (b) ITS values of soil

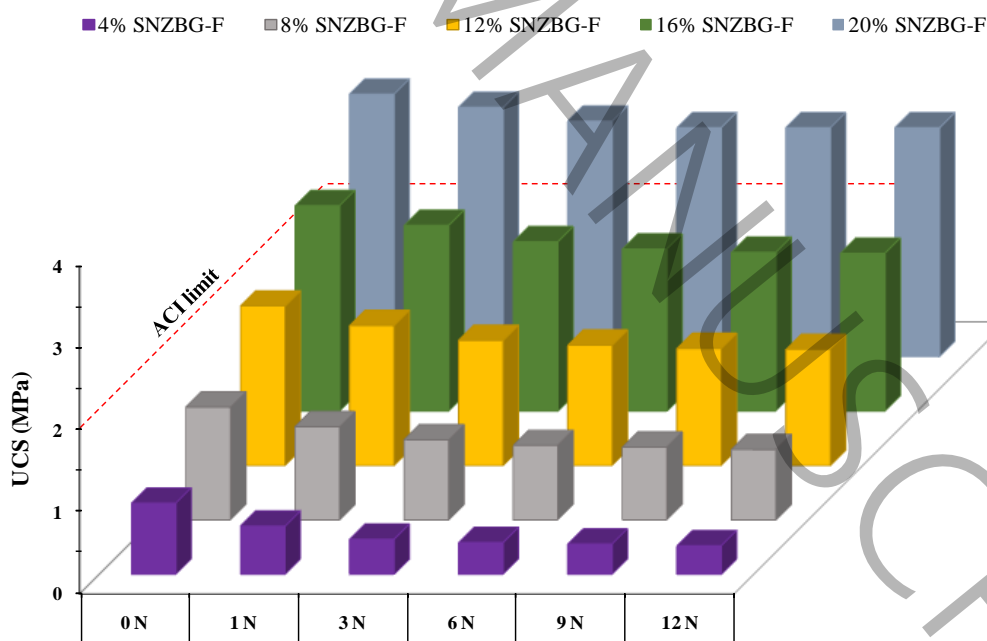
با توجه به نتایج شکل ۹ و تاثیر قابل ملاحظه الیاف در افزایش پیوستگی ذرات، انتظار می‌رود پایایی این سری نمونه‌ها در مقابل عوامل محیطی مهاجم نیز بطور چشمگیری افزایش یابد. در این راستا، پس از انجام آزمایش‌های چرخه یخ و ذوب، تغییرات مشخصات مقاومتی و درجه خرابی مصالح (مطابق توضیحات بخش ۳-۱) تعیین و نتایج آن در شکل ۱۰ ترسیم شد.



شکل ۱۰. تاثیر چرخه یخ و ذوب بر زوال خصوصیات مکانیکی خاک حاوی SNZBG-F عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز

Fig. 10. Effect of F-T cycles on the strength deterioration of soil samples treated with SNZBG-F

نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ موید آنست سطح تغییر رفتار ایجاد شده در نمونه‌های اصلاح شده با SNZBG-F پس از مجاورت با دوره‌های متناوب F-T اندک می‌باشد. به عنوان مثال مقاومت نمونه حاوی ۲۰٪ SNZBG-F بعد از ۲۸ روز نگهداری برابر ۴/۸۱ MPa بوده که در اثر ۱۲ چرخه F-T به حدود ۴/۵ MPa رسیده که بیانگر تغییر محدود رفتار مصالح است. در واقع بر اساس شکل ۲، در حضور آهک متوسط شاخص خرابی در اقدام یخ و ذوب برابر ۵۸٪ بوده در حالیکه برای نمونه‌های حاوی ترکیب ژئوپلیمر و الیاف، مقدار آن حدود ۲۴٪ است. علت این ارتقاء عملکرد را می‌توان به مجموعه‌ای از عوامل متعدد نسبت داد. همانطور که قبلاً مطرح شد استفاده از ژئوپلیمر حاوی نانو ذرات، از طریق ساز و کارهای فیزیکی و شیمیایی سبب افزایش تراکم ساختار (شکل ۷) شده و در نتیجه با کاهش سهم و ابعاد حفرات درون ماتریکس خاک، میزان رطوبت اولیه لازم برای تشکیل بلورهای یخ و متعاقباً افزایش حجم و ایجاد ترک در مصالح را به شدت محدود خواهد کرد. علاوه بر این، با استناد به نتایج طیف‌های پراش اشعه ایکس (شکل ۶)، امکان رشد قابل ملاحظه (حدود ۲ برابر بیشتر بر اساس طیف‌های پراش اشعه ایکس) ژل‌های سیمانی ناشی از فعالیت ژئوپلیمریزاسیون در نمونه‌های حاوی SNZBG، سبب افزایش قدرت جامدشدگی ذرات (حدود ۵۰ درصد بیشتر بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری) شده و لذا ظرفیت تغییر آرایش آنها ناشی از یخبندان، بسیار کم خواهد بود. در کنار این قابلیت‌ها، تشکیل سیستم درهم‌تنیده حاوی ترکیب افزودنی-الیاف، نقش بسزایی در مهار اضافه تنش‌های داخلی ناشی از چرخه یخ و ذوب ایفا خواهد کرد. همچنین بر اساس نتایج مطالعات اخیر [مانند: ۴۴-۴۸]، توزیع الیاف در نمونه سبب بر هم خوردن پیوستگی حفرات و کاهش اندازه موثر آنها شده که در نتیجه این شرایط فضای اولیه برای تشکیل بلورهای یخ و در نهایت تمایل تغییر حجم و ترک‌خوردگی به شدت کمتر خواهد شد. بر اساس مجموع موارد فوق و طبق نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، افزودن ۲۰٪ SNZBG-F به خاک و صرفاً ۷ روز عمل‌آوری، سبب تامین مقاومت مورد نیاز بر اساس شاخص ACI حتی پس از مجاورت با دوره‌های متناوب F-T و به عبارتی تامین پایایی مناسب مصالح در مقابل شرایط مهاجم می‌شود.



شکل ۱۱. پایایی در برابر اقدام F-T برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف ترکیب ژئوپلیمر و الیاف بعد از ۷ روز نگهداری

Fig. 11. Durability of soils containing different amounts of geopolymer and fibers experiencing F-T scenario

مقایسه نتایج شکل ۱۱ (مبنی بر نیاز ۲۰٪ SNZBG-F و ۷ روز نگهداری) نسبت به نتایج شکل ۲ (مبنی بر نیاز حداقل ۲۰٪ آهک و ۲۸ روز نگهداری) و با در نظر گرفتن سهم یک چهارم برابری حضور آهک در ترکیب SNZBG-F، بیانگر کاهش حدود ۷۵٪ در

استفاده از آهک برای تثبیت موفق و پایدار خاک است. به عبارت دیگر هم‌افزایی عملکرد نانو-ژئوپلیمر مورد استفاده در شدت‌بخشی اصلاح فیزیکی-شیمیایی شبکه منافذ ذرات رس در کنار تثبیت مکانیکی ساختار بوسیله الیاف، ضمن توانایی به مراتب بهتر در ارتقاء خصوصیات مهندسی مصالح نسبت به رویکرد تثبیت سنتی، نقش بسزایی در کاهش مصرف آهک هم‌زمان با مدیریت پسماندهای صنعتی ایفا می‌نماید. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت روش نوین مطالعه حاضر به لحاظ کاربردی در پروژه‌های بهسازی، ضمن بهبود شاخص‌های فنی مصالح، راهبردی موثر به منظور کمک به حفظ محیط‌زیست و مدیریت هزینه‌ها است. علاوه بر این، همانطور که قبلاً مطرح شد یکی از مشکلات اجرایی روش تثبیت سنتی، نیاز به زمان‌های طولانی عمل‌آوری برای تکمیل واکنش‌های پوزولانی است. مشاهده شد استفاده از SNZBG-F با تسریع اندرکنش خاک-افزودنی و در نتیجه کاهش چهار برابری زمان عمل‌آوری، نقش بسزایی در تسهیل فرآیند تثبیت دارد. از طرفی، ترکیب نانو-ژئوپلیمر همراه الیاف بر خلاف عملکرد تثبیت سنتی، مانع از شکست ترد خاک و تاثیر مخرب آن بر سازه‌های مهندسی خواهد شد. همچنین یکی از مشکلات گزارش شده در پروژه‌های واقعی بهسازی، امکان پس گسیختگی مصالح با گذشت زمان ناشی از تغییرات (حملات) محیطی است. طبق نتایج پژوهش حاضر، استفاده از SNZBG-F رویکردی مطمئن برای افزایش پایایی طولانی مدت خاک در شرایط متغیر ساختگاه بشمار می‌رود.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر قابلیت نوعی ژئوپلیمر مبتنی بر ترکیب آهک و ضایعات صنعتی همراه الیاف برای بهسازی رس‌های به شدت تورمی (تورم اولیه بیش از ۱۶۰٪)، با هدف بهینه‌سازی تثبیت سنتی، افزایش دوام مصالح و ارائه راهکاری برای مدیریت پسماندها، مورد ارزیابی قرار گرفت. با استناد به نتایج حاصل از آزمایش‌های تورم، مقاومت‌های فشاری و کششی، تعیین سرعت پالس التراسونیک، تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیف‌های پراش اشعه ایکس، اهم یافته‌های حاصل به شرح ذیل می‌باشد:

الف- افزودن آهک تنها (به عنوان رویکرد سنتی) تا ۱۲٪ و صرفاً ۷ روز عمل‌آوری عمدتاً از طریق واکنش‌های کوتاه مدت، سبب کاهش حدود ۱۷ برابری پتانسیل تورم خواهد شد؛ اگرچه بهبود پارامترهای مکانیکی به منظور نیل به شاخص $ACI \geq 2.1 \text{ MPa}$ (نیازمند مقادیر قابل ملاحظه (حدود ۲۰٪) افزودنی و زمان زیاد نگهداری (حداقل ۲۸ روز) است. علت این رفتار سهم قابل ملاحظه کانی مونت‌موریلونیت در مصالح رسی به شدت متورم‌شونده و در نتیجه تمایل زیاد آن برای مصرف آهک در واکنش‌های کوتاه مدت بوده که سبب نیاز به حداقل ۲۰٪ افزودنی برای مشارکت کافی در واکنش‌های پوزولانی و ایجاد جامدشدگی مناسب ذرات می‌گردد. از طرفی، مشخص شد شرایط محیطی مهاجم می‌تواند سبب اضمحلال تدریجی و از دست رفتن بخش قابل ملاحظه‌ای (بعضاً تا ۹۰٪) از خصوصیات مکانیکی این نمونه‌ها شود. علت رفتار فوق بر اساس آنالیزهای ریزساختاری، ناشی از ضعف این روش برای ایجاد یک ماتریکس منسجم به منظور مقابله با افزایش تنش‌های ناشی از اقدام F-T، ارزیابی شد.

ب- راهبرد بهسازی با ژئوپلیمر، ضمن کاهش ۴ برابری زمان عمل‌آوری و کم کردن مصرف آهک تا ۷۵٪، سبب رشد بیش از ۱/۵ برابری مقدار UCS مصالح و افزایش تاب کششی تا دو برابر نسبت به نمونه حاوی آهک تنها می‌شود. در واقع، طی فرآیند تثبیت سنتی، سهم افزودنی برای حضور در فعالیت‌های پوزولانی محدود و لذا تشکیل کافی ژل‌های هیدراته (به عنوان پارامتری کلیدی در بهبود مشخصات ژئومکانیکی مصالح) نیازمند مقادیر زیاد (حدود ۲۰٪) آهک می‌باشد. در مقابل سیستم حاوی SNZBG، سبب مصرف بهینه آهک برای شرکت در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تولید تقریباً تا ۲ برابر بیشتر ترکیبات سیمانی در محیط می‌شود. از طرفی، حضور نانو ذرات در این ترکیب، باعث تشدید بهم‌پیوستگی پولک‌های رس از طریق انسداد فیزیکی و توسعه واکنش‌های پوزولانی بواسطه افزایش سطوح فعال حاوی آلومیناسیلیکات خواهد شد. مجموع عوامل فوق علاوه بر مهار کامل قابلیت تورم، نقش بسزایی در اصلاح موثرتر خصوصیات ژئو-مکانیکی خاک ایفا می‌نمایند.

پ- با وجود اثربخشی مطلوب SNZBG در ارتقاء رفتار مصالح در مقایسه با عملکرد تثبیت سنتی، اما رفتار منحنی تنش-کرنش این نمونه‌ها مشابه تاثیر آهک تنها به صورت کاهش شدید مقاومت پسماند (از دست رفتن کامل ظرفیت باربری خاک و خرابی در کرنش

حدود ۲٪) پس از نقطه پیک و به عبارتی رفتار ترد است. این شرایط یک ضعف جدی برای عملکرد مطمئن سازه‌های ژئوتکنیکی پس از بهسازی خاک بشمار رفته و بایستی اصلاح شود.

ت- افزودن الیاف به ترکیب خاک-ژئوپلیمر، با ایجاد مسیرهای جدید انتقال تنش در فضای مابین ذرات، مانع از توسعه و گسترش سریع ترک‌ها بعد از مقاومت پیک خواهد شد. همچنین، اصلاح شبکه منافذ خاک در نمونه حاوی SNZBG از طریق فعل و انفعالات فیزیکی-شیمیایی، اصطکاک مابین ذرات و الیاف را افزایش و با تقویت درهم‌تنیدگی ساختار، تاب کششی سیستم را بیش از ۲ برابر بهبود می‌بخشد. متعاقب این تغییرات، علاوه بر مشاهده رفتار با شکل‌پذیری بهتر (حفظ مقاومت پسماند تا ۹۰٪ مقاومت پیک)، درجه خرابی در برابر دوره‌های متناوب F-T نیز حدود ۶۰٪ کمتر از نمونه‌های اصلاح شده با آهک تنها بدست آمد.

ث- در مجموع می‌توان نتیجه گرفت اصلاح خاک‌های تورمی با ژئوپلیمر مبتنی بر پسماندهای صنعتی همراه الیاف، راهبردی بسیار اثربخش (پایا و دوست‌دار محیط‌زیست) نسبت به رویکرد تثبیت سنتی با آهک محسوب می‌شود. بنحویکه افزودن ۲۰٪ SNZBG-F به خاک و صرفاً ۷ روز نگهداری، ضمن کنترل کامل تغییر حجم (پتانسیل تورم برابر صفر)، سبب تامین مقاومت مناسب (۵۰٪ بیش از شاخص ACI) حتی در مجاورت شرایط مهاجم خواهد شد.

۵- مراجع

- [1] J. Du, L. Zhang, Q. Hu, Q. Luo, D.P. Connolly, K. Liu, ... T. Wang, Characterization of controlled low-strength materials from waste expansive soils, *Construction and Building Materials*, 411 (2024) 134690.
- [2] M. SankaraNarayanan, S.A. Rajesh, A state-of-the-art review on sustainable chemical stabilizers for expansive soils, *Indian Geotechnical Journal*, (2024) 1-19.
- [3] M.A. Sakr, W.R. Azzam, M.A. Meguid, H.A. Ghoneim, Experimental study on the effect of micro-metakaolin on the strength and swelling characteristics of expansive soils, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (2024) 5835-5852.
- [4] X. Jian, X. Zha, H. Zhang, J. Yang, Research on the damaging mechanisms of expansive soil in subgrade, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31 (2024) 2362-2369.
- [5] S. Saride, V.N Mypati, Effect of area improvement ratio of geopolymer-based deep mixing columns on swell-shrink behavior of expansive soils, *Construction and Building Materials*, 417 (2024) 135163.
- [6] M. Mehmood, Y. Guo, Y. Liu, B.U. Uge, Modification of expansive soil characteristics by employing agro-waste eggshell powder: an experimental study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48 (2024) 2511-2526.
- [7] F.A. Gidebo, N. Kinoshita, H. Yasuhara, Optimization of physical and strength performance of cellulose-based fiber additives stabilized expansive soil, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e02851.
- [8] C. Liu, K. Lu, Z. Wu, X. Liu, A. Garg, Y. Qin, ... C. Lv, Expansive soil improvement using industrial bagasse and low-alkali ecological cement, *Construction and Building Materials*, 423 (2024) 135806.
- [9] S.P. Shrirao, S.S. Bhosale, K.A. Patil, Performance evaluation of flexible pavement on HDPE fibre-reinforced expansive soil subgrade: A full-scale laboratory accelerated pavement study, *International Journal of Pavement Research and Technology*, (2024) 1-13.
- [10] Y. Abdolvand, M. Sadeghiamirshahidi, Soil stabilization with gypsum: A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2024) In Press.
- [11] I.T Bahmed, J. Khatti, K.S Grover, Hybrid soft computing models for predicting unconfined compressive strength of lime stabilized soil using strength property of virgin cohesive soil, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83 (2024) 46.
- [12] T. Ahmadullah, M. Chrysochoou, Relationship between strength development and pozzolanic reactions in lime stabilized kaolinite, *International Journal of Geo-Engineering*, 15 (2024) 11.
- [13] J. Nan, D. Chang, J. Liu, H. Chen, J.S Lee, S.Y. Kim, Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze-thaw cycles, *Transportation Geotechnics*, 44 (2024) 101175.
- [14] M.R. Abdi, M. Hajalilue Bonab, Z. Jalilzadeh, Impact of various binders on loess durability subjected to different freeze-thaw regimes, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28 (2024) 1924-1942.
- [15] M. Salimi, M. Payan, I. Hosseinpour, M. Arabani, P.Z. Ranjbar, Effect of glass fiber (GF) on the mechanical properties and freeze-thaw (FT) durability of lime-nanoclay (NC)-stabilized marl clayey soil, *Construction and Building Materials*, 416 (2024) 135227.
- [16] M. Safa, A.R. Goodarzi, B. Lorestani, Effect of zeolite and fibers on the geo-mechanical properties of cemented

- soil under the freeze-thaw cycles, *Modares Civil Engineering journal*, 22 (2022) 89-105 (In Persian)
- [17] M. Rozbahani, A.R. Goodarzi, S.H. Lajevardi, Performance of fiber and industrial wastes in enhancing soil stabilization process compared to cement, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56 (2024) 163-180.
- [18] M. Movahedrad, A.R. Goodarzi, M. Salimi, Effect of basic oxygen furnace slag incorporation into calcium-based materials on solidification/stabilization of a zinc-contaminated kaolin clay, *Environmental Earth Sciences*, 81 (2022) 461.
- [19] M. Safa, A.R. Goodarzi, B. Lorestani, Enhanced post freeze-thaw stability of Zn/Pb co-contaminated soil through MgO-activated steel slag and fiber treatment, *Cold Regions Science and Technology*, 210 (2023) 103826.
- [20] M. Rozbahani, A.R. Goodarzi, S.H. Lajevardi, Coupling effect of superfine zeolite and fiber on enhancing the long-term performance of stabilized/solidified Pb-contaminated clayey soils, *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (2023) 4203-4218.
- [21] R. Yousefi, A.A. Amoei, A.R. Karimi, M. Amel Sakhi, Laboratory study on the effect of sawdust ash and zeolite replacement on sandy soil stabilized by cement, *Sharif journal civil engineering*, 37 (2022) 15-25. (In Persian) .
- [22] S. Ghaffary A.R. Goodarzi, S. Sobhan Ardakani, M. Cheraghi, R. Marandi, Effectiveness of industrial wastes-based geopolymers in improving the durability of stabilized/solidified heavy metal polluted soil, *Modares Civil Engineering journal*, 24 (2024) 161-178. (In Persian)
- [23] A.R. Goodarzi, H. Akbari, Impact of lime-slugs combination on the hydro-mechanical behavior of clayey soils, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49 (2019) 97-108. (In Persian)
- [24] A.R., Goodarzi, M. Zamanian, M. (2018). Effect of SiO₂ Nanoparticles and cement on the performance of stabilized Ni-Contaminated clayey soils, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49 (2018) 821-830. (In Persian)
- [25] J. Li, Y. Shan, P. Ni, J. Cui, Y. Li, J. Zhou, Mechanics, durability, and microstructure analysis of marine soil stabilized by an eco-friendly calcium carbide residue-activated coal gangue geopolymer, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e02687.
- [26] A. Saygili, M. Dayan, Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers, *Cold Regions Science and Technology*, 161 (2019) 107-114.
- [27] M.R. Yabaluie Khamesluei, M. Bayat, M. Mousivand, M.A. Nozari, Effect of zeolite replacement and tyre fibre inclusions on geotechnical properties of cement-or lime-stabilised sand, *Geomechanics and Geoengineering*, (2024) 1-16.
- [28] S. Dhakal, P. Kolay, V. Puri, Durability of clayey soil stabilized with calcium sulfoaluminate cement and polypropylene fiber under extreme environment, *Transportation Geotechnics*, 44 (2024) 101164.
- [29] A.H. Vakili, M. Salimi, Y. Lu, M. Shamsi, Z. Nazari, Strength and post-freeze-thaw behavior of a marl soil modified by lignosulfonate and polypropylene fiber: an environmentally friendly approach, *Construction and Building Materials*, 332 (2022) 127364.
- [30] A.R. Goodarzi, M. Salimi, Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag, *Applied Clay Science*, 108 (2015) 61-69.
- [31] A. Anburuvel, The role of activators in geopolymer-based stabilization for road construction: a state-of-the-art review. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6 (2023) 41-59.
- [32] Y. Bai, W. Guo, Q. Zhao, N. Zhang, C. Xue, S. Wang, Y. Song, Performance deterioration of municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer under sulfuric acid attack, *Construction and Building Materials*, 391 (2023) 131847.
- [33] K. Sharma, A. Kumar, Utilization of Industrial Waste Based Geopolymers as A Soil Stabilizer-A review, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5 (2023) 97.
- [34] P. Zheng, W. Li, Q. Ma, L. Xi, Mechanical properties of phosphogypsum-soil stabilized by lime activated ground granulated blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, 402 (2023) 132994.
- [35] M.T., de Araújo, S.T. Ferrazzo, H.M. Chaves, C.G. da Rocha, N.C. Consoli, Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 362 (2023) 129757.
- [36] S.R. Abdila, M.M.A.B. Abdullah, R. Ahmad, D.D Burduhos Nergis, S.Z.A. Rahim, M.F. Omar, & a. Syafwandi. Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A review, *Materials*, 15 (2022) 375.
- [37] K. Chen, D. Wu, Z. Zhang, C. Pan, X. Shen, L. Xia, J. Zang, Modeling and optimization of fly ash-slag-based geopolymer using response surface method and its application in soft soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 315 (2022) 125723.
- [38] B. Li, F. Luo, X. Li, J. Liu, Mechanical properties evolution of clays treated with rice husk ash subjected to freezing-thawing cycles, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e02712.
- [39] A. Boz, A. Sezer, 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.
- [40] A. Janalizadeh Choobbasti, F. Farrokhzad, A. Nadimi, S. Soleimani Kutanaei, Effects of copper sludge on cemented clay using ultrasonic pulse velocity. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33 (2019) 433-444.

- [41] A. Kampala, S. Horpibulsuk, N. Prongmanee, A. Chinkulkijniwat, Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2014) 633-643.
- [42] D. Barman, S.K. Dash, Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14 (2022) 1319-1342.
- [43] Q. Jiang, Y. He, Y. Wu, B. Dian, J. Zhang, T. Li, M. Jiang, Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review, *Environmental Pollution*, 312 (2022) 120094.
- [44] G. Tebaldi, M. Orazi, U.S. Orazi, Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of lime-stabilized soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (2016) 06016002.
- [45] M. Ismeik, F. Shaqour, Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze-thaw cycles, *Road Materials and Pavement Design*, 21 (2020) 42-60.
- [46] F. Najafian Jazi, S.M. Mir Mohammad Hosseini, O. Ghasemi-Fare, T.D. Rockaway, Experimental evaluation of stress history effect on compressibility characteristics of lime-stabilized expansive soils, *Geomechanics and Geoengineering*, (2024) 1-14.
- [47] A.R. Goodarzi, A.H. Moradloo, A. Effect of curing temperature and SiO₂-nanoparticles on the engineering properties of lime treated expansive soil. *Modares civil engineering journal*, 17 (2017) 8-18. (In Persian)
- [48] B. Karki, P.K. Kolay, Modification of Bentonite Clay Using Recycled Glass Powder and Polypropylene Fiber, *Geotechnical and Geological Engineering*, (2024) 1-14.
- [49] M.V. Gaikwad, S.K. Singh, N.T. Suryavanshi, K.P. Survase, S.R. Yadav, M.C. Pujari, O.S. Basate, Reviewing the enhancement of expansive soil through different waste material blending. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 11 (2024), 158-166.
- [50] M.F. Yazici, S.N. Keskin, Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: Effects of Fiber Length and Fiber Content, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024) 1-19.
- [51] S. Sert, E. Arslan, P. Ocakbaşı, E. Ekinçi, Z. Garip, A. Özocak, ... C.P. Ndepete, Stabilization of Expansive Clays with Basalt Fibers and Prediction of Strength by Machine Learning, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024) 1-20.
- [52] H. Shu, Q. Yu, C. Niu, D. Sun, Q. Wang, The coupling effects of wet-dry and freeze-thaw cycles on the mechanical properties of saline soil synergistically solidified with sulfur-free lignin, basalt fiber and hydrophobic polymer, *Catena*, 238 (2024) 107832.