پایدارسازی لندفیل‌ها با مواد زائد بر پایه ژئوپلیمر برای کاهش نفوذپذیری تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب

صلاح‌الدین حمیدی*[1]، سید علی مرتضوی راوری[2]، سید مرتضی مرندی[3]

۱- استادیار عمران، دانشکده فنی و مهندسی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران
s.hamidi@basu.ac.ir
۲- دانشجوی دکترای عمران - ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ایران
seyedali.mortazavi@eng.uk.ac.ir
۳- استاد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ایران
marandi@uk.ac.ir

چکیده

مهم‌ترین مشکل زیست‌محیطی ناشی از محل‌های دفن پسماند (لندفیل‌ها)، آلوده شدن منابع آب زیرزمینی به مواد سمی و آلاینده است. در لندفیل‌ها، از رس طبیعی برای کاهش نفوذپذیری استفاده می‌شود؛ در مناطق سردسیر، سیکل‌های یخبندان-ذوب باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود. بهترین راه‌حل، پایدارسازی و تثبیت خاک موجود در کف لندفیل‌ها با مواد زائد دپو شده در خود لندفیل‌ها می‌باشد. در پژوهش حاضر، از پودر شیشه زائد (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) و پسماند کاربید کلسیم (۰٪، ۳٪، ۷٪، ۱۰٪ و ۱۳٪) به‌عنوان مواد ژئوپلیمری برای پایدارسازی خاک استفاده شد. به‌منظور بررسی دقیق تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب، آزمایش‌های مقاومت تک محوری، نفوذپذیری، تغییر حجم، برش مستقیم و آزمون‌های ریزساختاری انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه پایدارشده با ۱۵٪ پودر شیشه زائد و ۷٪ پسماند کلسیم کاربید (۱/۵۴ مگاپاسکال)، ۸/۵ برابر خاک طبیعی (۰/۱۸ مگاپاسکال) بوده و بعد از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب، نفوذپذیری آن ($1/6\times10^{-7}$ cm/s) کمتر از خاک رسی طبیعی ($2/5\times10^{-6}$ cm/s) بود. در نمونه بهینه در حالت بدون سیکل‌های یخبندان-ذوب و پس از اعمال ۱۲ سیکل به ترتیب ۹۷٪ و ۸۳٪ از سرب نگهداشت شد. کرنش حجمی پس از ۱۲ سیکل در نمونه بهینه تنها ۲,۳٪ بوده در حالی که این مقدار برای خاک طبیعی ۹,۴٪ اندازه‌گیری شد. در تمام نمونه‌ها، سیکل‌های یخبندان-ذوب منجر به افزایش حجم منافذ خاک شد، با این حال، قطر منافذ کاهش و تعداد آن‌ها افزایش پیدا کرد. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که سیستم ژئوپلیمری مبتنی بر مواد زائد، راه‌حلی پایدار برای افزایش دوام لایه‌های ضد نفوذ لندفیل‌ها در مناطق سردسیر است.

کلمات کلیدی

لندفیل، سیکل‌های یخبندان-ذوب، نفوذپذیری، مواد زائد، ژئوپلیمر.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

جمعیت جهانی در سال ۲۰۲۴ به ۸/۲ میلیارد نفر رسیده است. بر اساس پیش‌بینی‌ها، این رقم تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت که منجر به افزایش تقاضا و نیاز به محصولات و کالاها می‌شود. در پی این افزایش، حجم قابل‌توجهی از مواد زائد تولید می‌شود [۱]. از سوی دیگر، پس از انقلاب صنعتی، صنایع متعددی شکل گرفته‌اند که بخش عمده‌ای از پسماندهای جانبی را تولید می‌کنند. سالانه حدود ۲/۱ میلیارد تن مواد زائد تولید می‌شود که پیش‌بینی می‌شود این مقدار تا سال ۲۰۵۰ به ۳/۴ میلیارد تن برسد [۲]. متأسفانه، بسیاری از این مواد زائد بدون کنترل در محل‌های دفن زباله (لندفیل‌ها) تخلیه می‌شوند که باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی فراوانی می‌گردند [۳, ۴]. یکی از جدی‌ترین خطرات زیست‌محیطی لندفیل‌ها، نشت شیرابه حاوی فلزات سنگین سمی (مانند سرب، کادمیوم و کروم) به آب‌های زیرزمینی است که می‌تواند به سلامت انسان و اکوسیستم‌ها آسیب جدی وارد کند [۵, ۶]. یکی از راهکارهای مقابله با این مشکل، استفاده از خاک‌های رسی به‌عنوان لایه نسبتاً نفوذناپذیر در کف لندفیل‌ها است [۷, ۸]. خاک‌های رسی به‌طور کلی دارای مقاومت پایین بوده و به‌عنوان خاک‌های ضعیف شناخته می‌شوند. هنگامی که این خاک‌ها در معرض سیکل‌های یخبندان-ذوب (F-T[1]) قرار می‌گیرند، مشکلات بیشتری از جمله کاهش مقاومت، کاهش ظرفیت باربری پی‌ها، افزایش نشست و افزایش نفوذپذیری خاک ایجاد می‌شود [۹-۱۲]. سیکل‌های یخبندان-ذوب باعث تشکیل و ذوب یخ در منافذ خاک شده که منجر به انبساط و انقباض خاک می‌گردد. این فرآیند پیوندهای بین دانه‌های خاک را می‌شکند و نفوذپذیری آن را افزایش می‌دهد. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر خاک‌های ریزدانه (خاک‌های نرم) بسیار بیشتر و مهم‌تر از خاک‌های درشت‌دانه (مانند شن و ماسه) است [۱۳-۱۵].

عمق یخبندان، یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد لندفیل‌ها در مناطق سردسیر است. این عمق به معنای حداکثر عمقی است که در آن دمای خاک در طول فصل زمستان به زیر نقطه انجماد می‌رسد و تشکیل یخ در منافذ خاک رخ می‌دهد. عمق یخبندان تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دامنه دمایی فصلی، مدت زمان دوره یخبندان، رطوبت اولیه خاک، تراکم، ترکیب بافتی و پوشش سطحی قرار دارد. در لندفیل‌ها، افزایش عمق یخبندان می‌تواند منجر به تخریب لایه‌های رسی در کف و جداره‌ها، ایجاد ترک‌های عمودی و افقی، و در نهایت افزایش نفوذپذیری و خطر نشت شیرابه شود. همچنین، یخبندان و ذوب متناوب می‌تواند باعث ناپایداری ساختاری لایه‌های رویه و کاهش عمر مفید لندفیل شود. بنابراین، طراحی لایه‌های ضد نفوذ باید علاوه بر خواص هیدرولیکی و ژئوتکنیکی، به‌طور مستقیم به مقاومت در برابر سیکل‌های یخبندان-ذوب و عمق یخبندان محتمل در منطقه توجه کند.

برای حل این مشکلات زیست‌محیطی و جلوگیری از آلودگی خاک، راهکاری باید یافت شود که از یک سو منجر به کاهش مواد زائد در لندفیل شود و از سوی دیگر باعث کاهش نفوذپذیری خاک رسی در کف محل دفن زباله گردد. یک راه‌حل کارآمد و اقتصادی، استفاده از مواد زائد برای کاهش نفوذپذیری در محل دفن زباله است. به‌عبارت دیگر، مواد زائد تخلیه‌شده در لندفیل‌ها، برای پایدارسازی خاک رسی طبیعی (NC[2]) در کف این محل‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش، از پودر شیشه زائد (WGP[3]) و پسماند کلسیم کاربید (CCR[4]) به‌عنوان دو ماده زائد برای پایدارسازی خاک بر اساس تشکیل ژئوپلیمر استفاده شده است. امروزه پژوهشگران دریافته‌اند که ژئوپلیمرها دارای سه ویژگی کلیدی شامل دوستدار محیط‌زیست، قابلیت قبول از دید ژئوتکنیکی و هزینه اقتصادی پایین هستند [۱۶-۲۱]. ژئوپلیمرها به‌عنوان مواد امیدبخش و افزودنی‌های سبز در مهندسی عمران شناخته می‌شوند. این مواد افزودنی از دو بخش تشکیل شده‌اند [۲۲-۲۵]: الف) منبع آلومینوسیلیکات (پیش‌ماده) که غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3)است، مانند کائولین، متاکائولین، خاکستر پوست برنج، خاکستر آتشفشانی، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، سرباره مس و غیره [۲۶, ۲۷]. ب) فعال‌کننده قلیایی که عمدتاً حاوی کاتیون‌های قلیایی (مانند Na^+ ، K^+ و Ca^{2+}) است. محلول آن دارای غلظت بالای هیدروکسید (OH^-) بوده و موجب افزایش pH می‌شود که برای تشکیل ژئوپلیمر ضروری است [۲۸-۳۰]. شبکه‌های سه‌بعدی ژئوپلیمرها از طریق واکنش شیمیایی بین این دو مؤلفه اصلی در خاک تشکیل می‌شوند [۳۱, ۳۲].

[1] Freeze-Thaw (F-T) cycles
[2] Natural Clay (NC)
[3] Waste Glass Powder (WGP)
[4] Calcium Carbide Residue (CCR)

ACCEPTED MANUSCRIPT

فرآیند تشکیل ساختارهای ژئوپلیمری معمولاً شامل مراحل انحلال مواد آلومینوسیلیکاتی در محیط قلیایی، بازآرایی و برقراری پیوند میان گونه‌های سیلیکاتی و آلومیناتی و در نهایت تشکیل ساختارهای شبکه‌ای است. افزایش pH محیط می‌تواند انحلال پیش‌ماده‌های آلومینوسیلیکاتی را تسهیل کند و زمینه را برای تشکیل محصولات واکنشی فراهم سازد. در سامانه‌های حاوی کلسیم، تشکیل محصولات کلسیم‌دار نیز محتمل است. این فرآیندها، بسته به ترکیب مواد اولیه و شرایط عمل‌آوری، می‌توانند به بهبود پیوستگی ساختاری و خواص مکانیکی خاک منجر شوند [۲۰, ۲۸, ۳۲, ۳۳].

علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های ژئوپلیمرها، توانایی بالای آنها در جامدسازی[1] فلزات سنگین است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ژئوپلیمرها قادرند فلزات سنگین مضر را از طریق دو مکانیسم اصلی: (۱) جایگزینی یونی در ساختار بلوری[2] و (۲) قفل‌سازی فیزیکی در ماتریس متراکم[3]، به‌طور مؤثر در خود نگه دارند. این خاصیت، ژئوپلیمرها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در لندفیل‌ها تبدیل می‌کند، چرا که نه‌تنها لایه زهکشی را تقویت می‌کنند، بلکه خود به عنوان یک باریه فعال در برابر نشت آلاینده‌ها عمل می‌کنند [۴-۷]. درصد فلزات سمی که در شبکه‌های ژئوپلیمری گیرافتاده یا نگهداشت شده‌اند در شکل ۱ نشان داده شده است [۳۱, ۳۲].

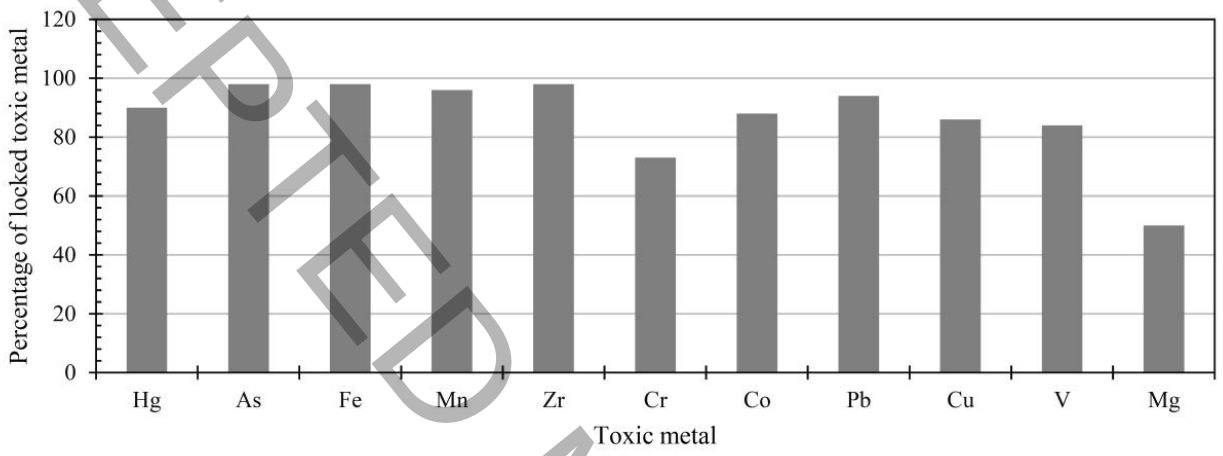
در این پژوهش، از پودر شیشه زائد به‌عنوان پیش‌ماده و از پسماند کلسیم کاربید به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی به دلیل مزایای زیست‌محیطی استفاده شده است. شیشه زائد حاوی مقدار قابل‌توجهی سیلیکا است و می‌تواند به‌عنوان پیش‌ماده در فرآیند پایدارسازی خاک مبتنی بر ژئوپلیمر به‌کار رود [۳۴-۳۷]. حدود ۷ درصد از کل مواد زائد جامد جهان مربوط به شیشه زائد است [۳۸]. پسماند کلسیم کاربید یک محصول جانبی تولید گاز استیلن است. به‌دلیل وجود $Ca(OH)_2$ در ترکیب آن، دارای pH حدود ۱۲ است و می‌تواند به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی در ژئوپلیمرها استفاده شود [۳۹]. تقاضای بالا برای تولید گاز استیلن، حجم قابل‌توجهی از این پسماند را تولید می‌کند (در سال ۲۰۱۶، ۲۸ میلیون تن پسماند کلسیم کاربید در چین تولید شد). البته بخش کمی از آن بازیافت و در صنعت مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد (کمتر از ۱۰ درصد در چین) [۴۰]. امروزه، یکی از دغدغه‌های مهم جهانی و ملی، دستیابی به توسعه پایدار از طریق مدیریت و استفاده مجدد از مواد زائد است [۳۴, ۳۶]. با توجه به اهمیت این موضوع، وظیفه سنگینی بر دوش مهندسان ژئوتکنیک قرار دارد تا از مواد زائد در پروژه‌های خاکی استفاده مجدد کنند که طبق تحقیقات، می‌تواند از جنبه‌های ژئوتکنیکی، زیست‌محیطی و اقتصادی مزایای متعددی داشته باشد [۳۲, ۴۱]. استفاده از این دو ماده زائد در پایدارسازی خاک می‌تواند به‌عنوان هدفی امیدبخش در مدیریت پسماند و توسعه پایدار مطرح شود.

اخیراً پژوهشگران متعددی در مورد آلودگی خاک در محل‌های دفن زباله تحقیق کرده‌اند، از جمله: ارزیابی آلودگی خاک در محل‌های تخلیه پسماند شهری از دیدگاه ژئوتکنیکی [۴۲]، تحلیل تطبیقی آلودگی خاک از منظر مدیریت پسماند [۴۳] و مدیریت پایدار شیرابه‌های محل‌های دفن شهری با جهت‌گیری‌های آینده [۴۴]. تحقیقات پیشین به ندرت به بررسی تأثیر عوامل محیطی مانند سیکل‌های یخبندان-ذوب بر لندفیل‌ها پرداخته‌اند. با این حال، این مطالعات بیشتر بر تأثیر شرایط محیطی بر خود مواد زائد تمرکز کرده‌اند تا بر خاک کف لندفیل، مانند تحقیقی در مورد تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر خواص فیزیکی و شیمیایی لجن محل دفن زباله [۴۵]. با این حال، شکاف مهمی در ادبیات علمی وجود دارد: اغلب مطالعات روی تثبیت فلزات سنگین با ژئوپلیمرها در شرایط ثابت و بدون در نظر گرفتن عوامل محیطی متغیر انجام شده‌اند. به‌طور خاص، تأثیر سیکل‌های مداوم یخبندان-ذوب (که یکی از شدیدترین عوامل تخریب‌کننده لایه‌های رسی در مناطق سردسیر است) بر عملکرد بلندمدت ژئوپلیمرها در جامدسازی فلزات سنگین و کنترل نفوذپذیری به‌طور سیستماتیک بررسی نشده است. علاوه بر این، استفاده از ترکیب WGP و CCR به عنوان یک سیستم ژئوپلیمری داخلی در لندفیل‌ها (یعنی استفاده از خود پسماندهای موجود در محل برای تثبیت لایه کف) تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است.

[1] Stabilization/Solidification
[2] Chemical Incorporation
[3] Physical Encapsulation

ACCEPTED MANUSCRIPT

بنابراین، نوآوری اصلی این پژوهش در ارزیابی جامع عملکرد دوگانه سیستم ژئوپلیمری مبتنی بر WGP و CCR در شرایط دوگانه است: (۱) بهبود خواص ژئوتکنیکی لایه رسی تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب و (۲) کنترل نفوذپذیری و جامدسازی فلزات سنگین (مانند سرب) در طول این سیکل‌های مخرب می‌باشد. هدف نهایی، ارائه یک راهکار پایدار، اقتصادی و بومی برای افزایش پایداری بلندمدت لندفیل‌ها در مناطق سردسیر است. برای دستیابی به این هدف، آزمون‌های اولیه برای شناسایی خاک و افزودنی‌ها انجام شد. برای تعیین مقدار بهینه افزودنی‌ها، آزمون مقاومت فشاری محصور نشده (UCS[1]) انجام شد و سپس تغییرات نفوذپذیری در شرایط مختلف اندازه‌گیری گردید. تأثیر تغییرات حجمی بر نفوذپذیری خاک و پارامترهای مقاومت برشی بررسی شد. در نهایت، آزمون‌های ریزساختاری SEM[2]، EDX[3] و BET[4] برای مشاهده دقیق تشکیل ژئوپلیمر و تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر توزیع منافذ خاک و در نتیجه نفوذپذیری انجام شد.



شکل ۱: درصد فلزات سمی که در شبکه‌های ژئوپلیمری گیرافتاده یا نگهداشت شده‌اند [۳۱, ۳۲].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

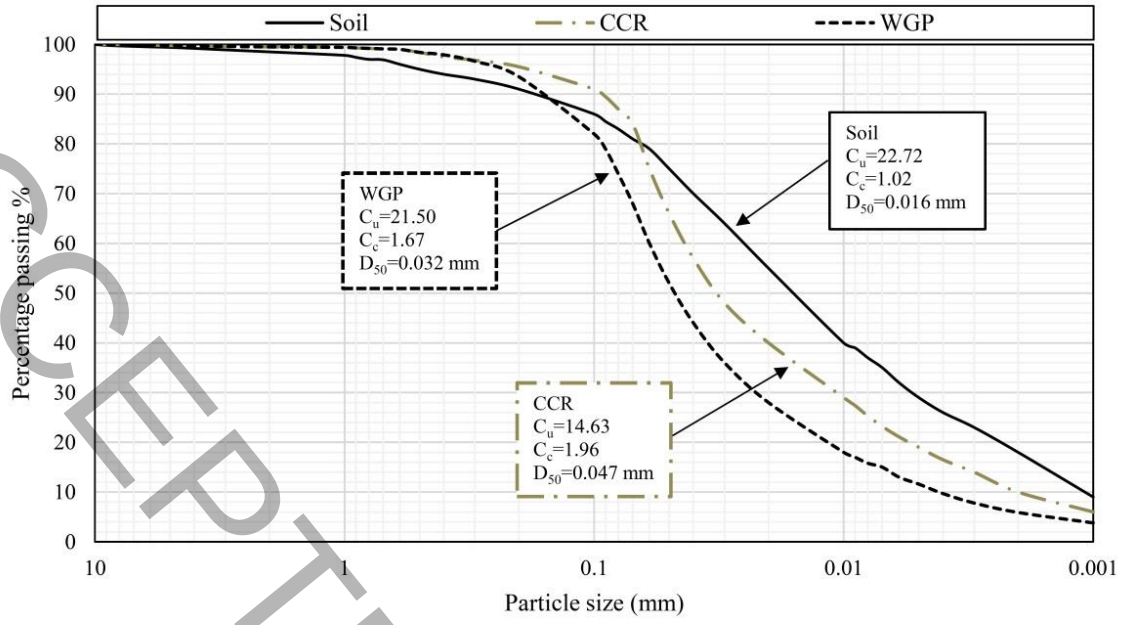
در این پژوهش از سه ماده استفاده شد: خاک رس طبیعی (NC)، پودر شیشه‌ی زائد (WGP) و پسماند کاربید کلسیم (CCR).

۲-۱-۱ خاک رس طبیعی

خاک رس طبیعی از منطقه لاله زار، سردترین منطقه استان کرمان، ایران (ارتفاع ۲۸۰۰ متری) جمع‌آوری شد. پس از آماده‌سازی نمونه، آزمایش‌های حدود آتربرگ، دانه‌بندی و تراکم انجام شد. بر اساس منحنی دانه‌بندی (شکل ۲) و پارامترهای فیزیکی (جدول ۱)، خاک به‌عنوان رس کم‌پلاستیسیته (CL) طبقه‌بندی شد. رطوبت بهینه ۱۷/۳٪ و چگالی خشک حداکثر ۱/۷۲ g/cm^3 تعیین گردید. این خاک از نوع نرم و ضعیف است و در ساخت‌وسازهای عمرانی مشکلاتی ایجاد می‌کند. ترکیب شیمیایی آن با آنالیز XRF[5] مشخص شد که غنی از سیلیس (۴۲٪) و آلومینا (۱۲٪) است (جدول ۲).

[1] Unconfined Compression Strength (UCS)
[2] Scanning Electron Microscopy (SEM)
[3] energy-dispersive X-ray (EDX)
[4] Brunauer-Emmett-Teller (BET)
[5] X-ray fluorescence (XRF)

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۲: منحنی توزیع اندازه ذرات خاک، پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید

جدول ۱: خواص ژئوتکنیکی خاک رس طبیعی

نمونه	رطوبت بهینه(٪)	حد خمیری(٪)	حد روانی(٪)	شاخص خمیری(٪)	چگالی خشک حداکثر(g/cm^3)	طبقه بندی خاک
خاک اولیه	۱۷/۳	۱۹/۷	۳۴/۴	۱۴/۷	۱/۷۸	CL

جدول ۲: ترکیب شیمیایی خاک، پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید

ترکیب شیمیایی (٪)	پسماند کلسیم کاربید	پودر شیشه زائد	خاک
SiO_2	۴/۱۵	۷۰/۹۵	۴۲/۷۵
Al_2O_3	۱/۵۷	۱/۷۶	۱۲/۶۵
CaO	۶۶/۴۹	۱۰/۶۱	۸/۱۲
Fe_2O_3	۰/۴۳	۰/۲۹	۸/۳۳
MgO	۰/۵۹	۲/۵۴	۱۲/۸۱
SO_3	۰/۵۱	۰/۳۸	۱/۴۸
K_2O	۰/۰۳	۰/۴۰	۱/۸۳
Na_2O	۰/۲۳	۱۲/۴۶	۱/۲۲
TiO_2	۰/۰۳	۰/۱۷	۲/۶۵
LOI	۲۵/۵۷	۰/۲۴	۱۱/۵۸

۲-۲-۲ پودر شیشه‌ی زائد (WGP)

پودر شیشه از کارگاه‌های برش شیشه تهیه شد که در آن‌ها شیشه با آب برش داده می‌شود و خمیری از پودر شیشه و آب تولید می‌گردد. این خمیر معمولاً به‌عنوان پسماند وارد سیستم فاضلاب شهری می‌شود. در این پژوهش، این پسماند بدون نیاز به خردکردن مجدد جمع‌آوری و برای همگن‌سازی کاملاً مخلوط شد. آنالیز XRF نشان داد که این پودر حاوی مقدار بالایی سیلیس (SiO_2) است که به‌عنوان پیش‌ماده در تشکیل ژئوپلیمر ضروری است.

۲-۱-۳ پسماند کلسیم کاربید (CCR)

ACCEPTED MANUSCRIPT

پسماند کلسیم کاربید محصول جانبی فرآیند تولید گاز استیلن است. آنالیز XRF نشان داد که اکسید کلسیم (CaO) با ٪۶۶/۵ فراوانی، اصلی‌ترین ترکیب آن است؛ این ماده به عنوان فعال‌کننده‌ی قلیایی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون عمل می‌کند.

۲-۲ روش‌ها و آزمایش‌ها

۲-۲-۱ تهیه‌ی نمونه‌ها

با توجه به پیچیدگی سیستم‌های ژئوپلیمری و تأثیر عوامل متعددی همچون نوع پیش‌ماده، غلظت محلول فعال‌کننده، دما و زمان عمل‌آوری بر خصوصیات نهایی آن‌ها، هنوز روش استاندارد جامعی برای تهیه خاک پایدارشده با ژئوپلیمر ارائه نشده است. دو روش اختلاط برای تهیه نمونه‌های خاک پایدارشده با ژئوپلیمر مورد بررسی قرار گرفت:

روش اول: ابتدا خاک طبیعی، پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید به‌صورت خشک مخلوط شدند و سپس آب به‌عنوان بخشی از فرآیند فعال‌سازی به مخلوط افزوده گردید.

روش دوم: خاک و پودر شیشه به‌عنوان پیش‌ماده‌های ژئوپلیمری ابتدا با هم مخلوط شدند و سپس محلول فعال‌کننده قلیایی (شامل پسماند کلسیم کاربید حل‌شده در آب) به آن اضافه گردید.

نتایج آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که روش اول از کارایی بالاتری برخوردار است. این امر عمدتاً به دو دلیل بود: اولاً، مخلوط‌کردن مواد در حالت خشک منجر به همگن‌سازی سریع‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود، زیرا چسبندگی بین ذرات در این حالت کمینه است. ثانیاً، واکنش گرمازا بین کلسیم کاربید و آب در لحظه اختلاط، گرما تولید می‌کند که به فرآیند ژئوپلیمری‌شدن در مراحل اولیه کمک کرده و تشکیل ژل سیلیکاتی را تسهیل می‌نماید. در مقابل، در روش دوم این گرما به‌صورت جداگانه آزاد شده و در فرآیند ژئوپلیمری‌شدن مشارکت مؤثری ندارد. در شکل شماره ۳ مراحل جمع‌آوری و آماده‌سازی مواد اولیه و استفاده از آن‌ها برای تثبیت خاک، نشان داده شده است.

با توجه به اهمیت بالای درصد رطوبت در رفتار خاک تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب و تأثیر مستقیم آن بر پارامترهای مکانیکی و تغییرات حجمی، لازم بود تمام نمونه‌ها در شرایط رطوبتی یکسان و قابل مقایسه آزمایش شوند. بنابراین، درصد رطوبت تمام نمونه‌های تهیه‌شده برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و تغییرات حجمی، ثابت و برابر با رطوبت بهینه خاک رسی طبیعی (۱۷/۳ ٪) تنظیم شد. با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه (لاله‌زار، استان کرمان) که دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است، نمونه‌ها در طول سال بیشتر به‌صورت غیراشباع باقی می‌مانند. بنابراین، برای شبیه‌سازی واقعی‌تر شرایط میدانی این شرایط در نظر گرفته شد. برای حفظ ثبات رطوبت و جلوگیری از تبخیر، همه نمونه‌ها فوراً پس از تراکم و قالب‌گیری، درون یک لایه طلق پلاستیکی قرار گرفتند و سپس در داخل یک نایلون زیپ‌دار محکم بسته‌بندی شدند. این رویکرد منجر به کنترل دقیق محتوای رطوبت در طول تمام سیکل‌ها شد. همچنین، جهت تضمین همگنی و مقایسه منصفانه، تمام نمونه‌ها تحت انرژی تراکم استاندارد پراکتور متراکم شدند تا شرایط تنش مؤثر مشابهی در تمام آزمایش‌ها ایجاد شود. این رویکرد ضمن کاهش عوامل متغیر، امکان تحلیل دقیق‌تر تأثیر افزودنی‌های مختلف و سیکل‌های یخبندان- ذوب بر رفتار خاک را فراهم نمود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳: مراحل جمع‌آوری و آماده‌سازی مواد اولیه و استفاده از آن‌ها برای تثبیت خاک

۲-۲-۲ شرایط سیکل‌های یخبندان-ذوب F-T

سیکل‌های یخبندان-ذوب در سیستم بسته (بدون تأمین آب اضافی) و با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت (یخبندان) و ۲۰+ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت (ذوب) اعمال شد. نمونه‌ها در معرض ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب قرار گرفتند.

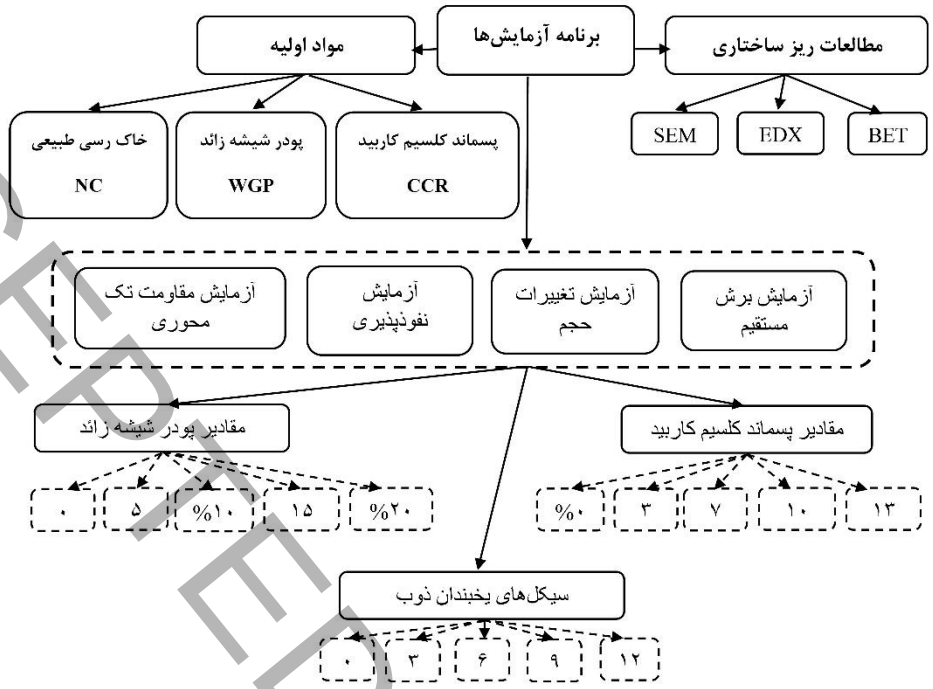
۲-۲-۳ تعیین مقادیر افزودنی‌ها

در تعیین مقادیر مختلف افزودنی‌ها، بازه‌های ۰ تا ۲۰ درصد برای پودر شیشه زائد (WGP) و ۰ تا ۱۳ درصد برای پسماند کاربید کلسیم (CCR) به‌صورت سیستماتیک انتخاب شدند. این محدوده‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌های مقدماتی و همچنین مرور جامع ادبیات موضوع تعیین گردیدند. آزمایش‌های اولیه نشان دادند که افزایش مقادیر WGP فراتر از ۲۰٪ و CCR فراتر از ۱۳٪ نه‌تنها منجر به کاهش مقاومت مکانیکی نمونه‌ها می‌شود (احتمالاً به دلیل وجود ذرات غیرواکنش‌یافته و تشکیل عیوب ریزساختاری) بلکه از نظر عملیاتی نیز غیراقتصادی است. همچنین، مقدار بالای CCR (بالاتر از ۱۳٪) می‌تواند pH خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد و محیطی بسیار قلیایی ایجاد کند که ممکن است به ساختار رس آسیب رسانده و دوام بلندمدت لایه بهسازی‌شده را کاهش دهد. از سوی دیگر، این بازه‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که پوشش کاملی از رفتار خاک تحت تأثیر مقادیر مختلف افزودنی فراهم شود، تا امکان شناسایی ترکیب بهینه (مانند ۱۵٪ WGP و ۷٪ CCR)، مقایسه مستقیم بین نمونه‌های حاوی فقط WGP، فقط CCR و ترکیب آنها و تحلیل دقیق واکنش‌های ژئوپلیمری فراهم آید. این دامنه‌ها همچنین با یافته‌های پژوهش‌های قبلی که بهینه‌ترین عملکرد سیستم‌های ژئوپلیمری خاکی را در محدوده ۵٪–۱۵٪ برای پیش‌مواد آلومینوسیلیکاته و ۵٪–۱۰٪ برای فعال‌کننده‌های قلیایی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد [۱۶, ۱۸, ۲۱].

۲-۲-۴ برنامه آزمایش‌ها

آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت تک محوری، برش مستقیم و اندازه‌گیری تغییرات حجمی انجام شد. برای هر شرایط، سه نمونه تهیه و میانگین نتایج گزارش گردید. مطالعات ریزساختاری نمونه‌های تثبیت‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آزمایش BET مورد بررسی قرار گرفت. برنامه آزمایش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۴: برنامه آزمایش‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱ آزمایش مقاومت تک محوری

آزمایش مقاومت تک محوری (UCS[1]) به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و کاربرد گسترده به عنوان معیاری برای بررسی رفتار خاک توسط پژوهشگران متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایش قبل از اندازه‌گیری تغییرات حجم و نفوذپذیری نمونه‌ها انجام شد تا مقادیر بهینه افزودنی‌ها (WGP و CCR) تعیین گردد و خاک طبیعی (NC) با خاک بهسازی‌شده (با افزودنی‌های بهینه) تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب (F-T) مقایسه شود.

۳-۱-۱ تأثیر سیکل‌های‌های یخبندان-ذوب بر مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی

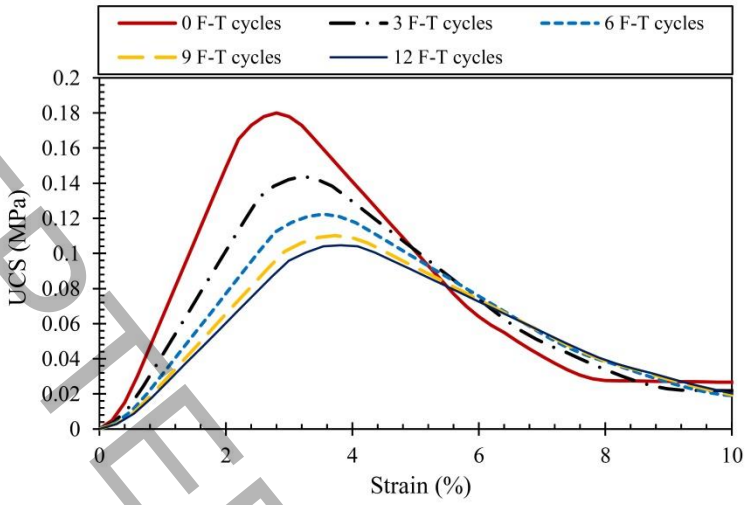
منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک طبیعی تحت سیکل‌های F-T در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این منحنی‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه‌ها پس از اعمال سیکل‌های F-T کاهش یافت؛ به‌طوری‌که پس از ۱۲ سیکل، مقاومت به میزان ۴۲٪ (از ۰/۱۸ به ۰/۱۰۴ مگاپاسکال) کاهش یافت. در مقابل، کرنش شکست (ε_f) نمونه‌ها افزایش یافت و پس از ۱۲ سیکل، ۳۶٪ (از ۲/۸٪ به ۳/۸٪) افزایش داشت. به‌طور کلی، تحت اثر سیکل‌های F-T، مقاومت UCS کاهش و کرنش شکست افزایش یافت و رفتار منحنی تنش-کرنش از نوع سخت‌شونده به نرم‌شونده تغییر کرد. لازم به ذکر است که تغییرات مشاهده‌شده در سیکل‌های اولیه بارزتر بوده و با افزایش تعداد سیکل‌ها، تغییرات کم‌رنگ‌تر شده است؛ به‌گونه‌ای که پس از حدود ۹ سیکل، خاک به وضعیت پایداری دست یافته است.

این رفتار کاهشی مقاومت را می‌توان با مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی زیر تفسیر کرد: در طول فرآیند یخبندان، انبساط حجمی یخ (حدود ۹٪) در منافذ خاک باعث ایجاد فشارهای داخلی می‌شود که پیوندهای بین دانه‌های رس را تضعیف کرده و منجر به ایجاد

[1] Unconfined Compressive Strength (UCS)

ACCEPTED MANUSCRIPT

ترک‌های ریز می‌گردد. در مرحله ذوب، خاک قادر به بازگشت کامل به حالت اولیه نبوده و این ترک‌ها به‌صورت دائمی باقی می‌مانند که باعث افزایش تخلخل و کاهش چسبندگی خاک می‌شود. این تغییرات ساختاری تدریجاً منجر به کاهش تدریجی مقاومت خاک شده و پس از حدود ۹ سیکل، سیستم به یک تعادل جدید می‌رسد که در آن ساختار خاک به‌گونه‌ای تغییر کرده است که تأثیرات اضافی سیکل‌های بعدی کمتر می‌باشد

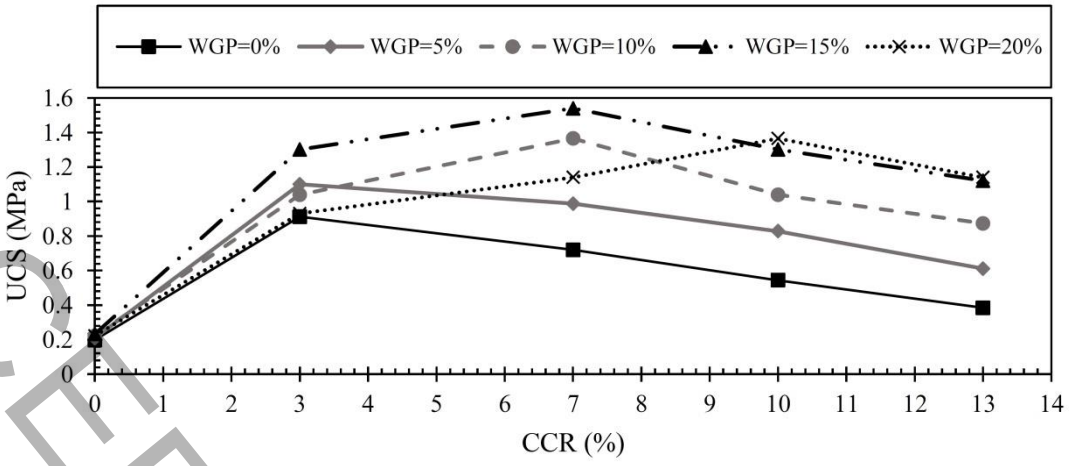


شکل ۵: منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک طبیعی تحت سیکل‌های F-T

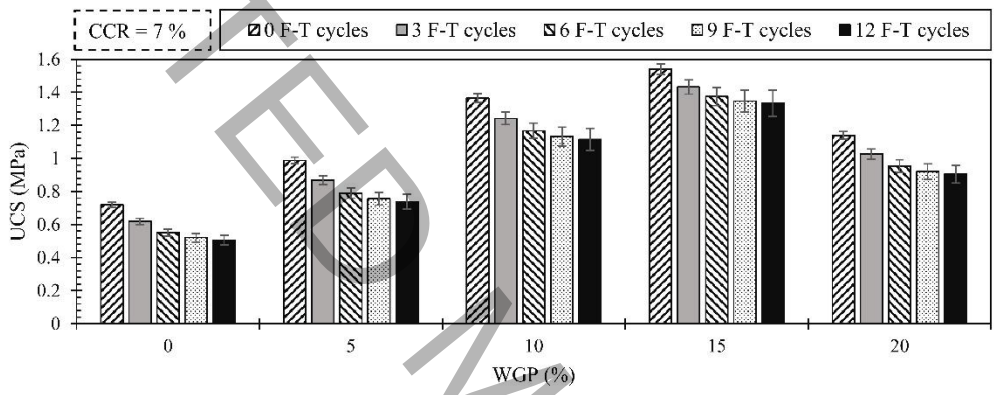
۳-۱-۲ تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر نمونه‌های خاک بهسازی‌شده

نمونه بهینه‌سازی‌شده با ۱۵٪ WGP و ۷٪ CCR بیشترین مقاومت را داشت (۱/۵۴ مگاپاسکال، یعنی ۸/۵ برابر نمونه NC) و کمترین آسیب‌پذیری نسبت به سیکل‌های F-T را نشان داد. این عملکرد مطلوب ناشی از تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی ژئوپلیمری در اطراف دانه‌های خاک بوده که ضمن افزایش مقاومت، اثرات منفی سیکل‌های F-T را کاهش داده و حتی پس از ایجاد ترک‌های ریز نیز مقاومت نمونه حفظ شده است [۱۸, ۲۰]. چناچه مقادیر افزودنی بیش از مقادیر بهینه باشد منجر به کاهش عملکرد می‌شود. افزودنی‌های اضافی واکنش نداده، در ساختار خاک باقی مانده و مشکلاتی ایجاد می‌کنند؛ به‌طوری‌که WGP اضافی باعث کاهش وزن واحد و چسبندگی بین دانه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت می‌شود. همچنین، CCR اضافی pH خاک را افزایش داده و محیطی بسیار قلیایی ایجاد می‌کند که به کاهش دوام و مقاومت خاک منجر می‌شود. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری برای نمونه‌های مختلف تثبیت شده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. در شکل ۷ و ۸ تغییرات مقادیر پیک مقاومت نسبت به پودر شیشه و کلسیم کاربید تحت چرخه‌های مختلف یخبندان-ذوب نشان داده شده است. مقایسه نمونه تثبیت شده بهینه با خاک رسی طبیعی تحت سیکلهای مختلف یخبندان-ذوب در شکل ۹ نشان داده شده است. تحلیل عمیق‌تر نشان می‌دهد که ترکیب بهینه ۱۵٪ WGP و ۷٪ CCR به‌طور همزمان از سه مکانیزم کلیدی بهره می‌برد: اولاً، مقدار کافی SiO_2 از طریق WGP برای تشکیل فاز ژئوپلیمری فراهم می‌شود؛ ثانیاً، CCR به‌عنوان منبع کلسیم و قلیایی لازم برای فعال‌سازی واکنش ژئوپلیمری عمل می‌کند؛ و ثالثاً، نسبت بهینه این دو ماده باعث تشکیل ساختاری متراکم و پایدار می‌شود که در برابر انبساط یخ مقاومت بیشتری دارد. یافته‌های این پژوهش مبنی بر بهینه بودن ۱۵٪ پودر شیشه زائد و ۷٪ پسماند کاربید کلسیم کاملاً با مطالعات قبلی همخوانی دارد. مطالعه اخیر در ژورنال نیز نشان داده است که نسبت‌های ۱۰-۱۵٪ برای مواد پوزولانیک و ۵-۱۰٪ برای فعال‌کننده‌های قلیایی بهترین عملکرد را در تثبیت خاک ارائه می‌دهند [۲۹-۳۲]. از طرف دیگر روند کاهش مقاومت در سیکل‌های اولیه و رسیدن به حالت پایدار پس از ۶-۹ سیکل که در این پژوهش مشاهده شد، با یافته‌های مطالعات گذشته همخوانی کامل دارد که نشان می‌دهد تغییرات ساختاری خاک عمدتاً در سیکل‌های اولیه رخ می‌دهد و پس از ۶-۹ سیکل، سیستم به تعادل جدیدی می‌رسد [۹, ۱۴, ۱۵].

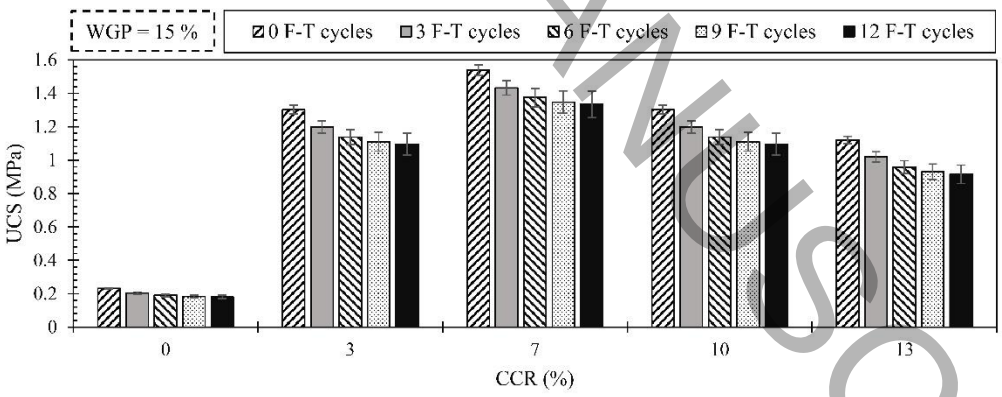
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶: نتایج آزمایش مقاومت تک محوری برای نمونه‌های مختلف تثبیت شده

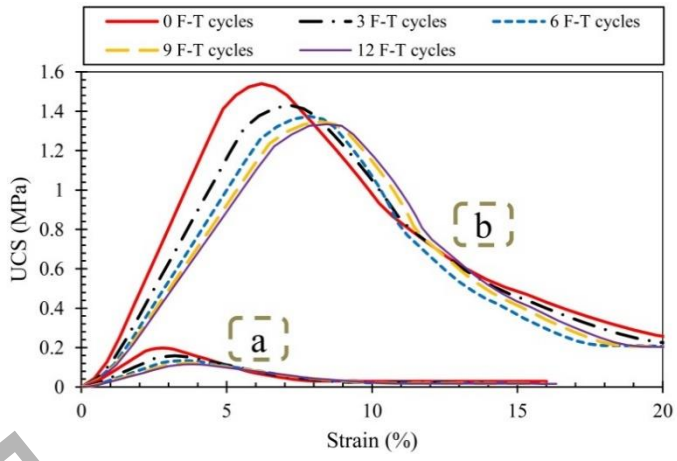


شکل۷: تغییرات مقادیر پیک مقاومت نسبت به پودر شیشه تحت چرخه‌های مختلف یخبندان-ذوب



شکل۸: تغییرات مقادیر پیک مقاومت نسبت به کلسیم کاربید تحت چرخه‌های مختلف یخبندان-ذوب

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۹: منحنی‌های تنش-کرنش تحت تأثیر سیکل‌های مختلف یخبندان-ذوب (۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ سیکل) برای: (a) خاک رسی طبیعی و (b) خاک بهسازی‌شده با ۱۵٪ پودر شیشه زائد و ۷٪ پسماند کلسیم کاربید

۳-۲ آزمایش برش مستقیم

در طول فرآیند یخبندان، افزایش حجم یخ منجر به ایجاد فشار در منافذ خاک و افزایش فاصله بین دانه‌های خاکی و تشکیل ترک‌های ریز می‌شود. پس از ذوب یخ، خاک به‌طور کامل به حالت اولیه خود باز نمی‌گردد و این تغییرات ساختاری باعث ایجاد منافذ دائمی در خاک می‌شود. این پدیده در خاک‌ها منجر به کاهش پارامترهای مقاومت برشی، به‌ویژه چسبندگی (C[1]) و زاویه اصطکاک داخلی(ϕ[2]) ، می‌گردد. در این پژوهش، تغییرات پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب (۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ سیکل) مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تحلیل دقیق داده‌های شکل ۹ نشان می‌دهد که روند کاهش پارامترهای مقاومت برشی در خاک طبیعی (نمونه شماره ۱) در سیکل‌های اولیه یخبندان-ذوب (۰ تا ۶ سیکل) بسیار شدیدتر است، به‌طوری‌که چسبندگی (C) تقریباً ۳۰٪ و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) حدود ۷٪ کاهش یافته است. این روند شیب‌مند در سیکل‌های بعدی (۶ تا ۱۲ سیکل) کاهش یافته و به حالت پایداری نزدیک می‌شود، که نشان‌دهنده تشکیل یک تعادل جدید در ساختار خاک پس از تغییرات اولیه است. این رفتار با یافته‌های قبلی مبنی بر اینکه اثرات تخریبی سیکل‌های یخبندان-ذوب عمدتاً در مراحل اولیه رخ می‌دهد و پس از ۶-۹ سیکل به حالت پایدار می‌رسد، همخوانی دارد.

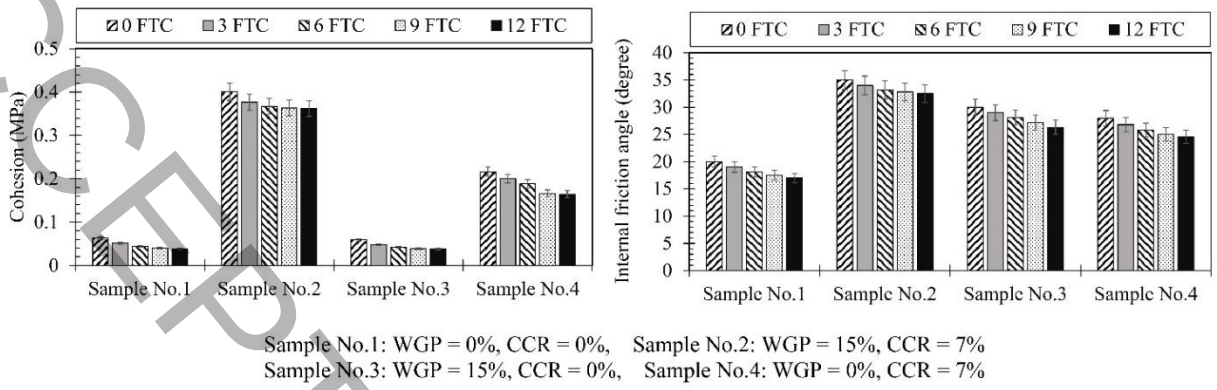
مقایسه نمونه خاک طبیعی(نمونه شماره ۱) با نمونه بهسازی‌شده با ۱۵٪ پودر شیشه زائد و ۷٪ پسماند کلسیم کاربید (نمونه شماره ۲) نشان داد که چسبندگی از ۶۳ کیلوپاسکال به ۴۰۱ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) از ۲۰ درجه به ۳۵ درجه افزایش یافته است. این بهبود چشمگیر، به‌ویژه در چسبندگی (افزایش ۶/۳ برابری)، می‌تواند ناشی از ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای و تشکیل محصولات واکنشی حاصل از برهم‌کنش مواد افزودنی با خاک باشد. همچنین، نزدیک‌تر شدن ذرات و تغییر در آرایش و تماس بین آن‌ها می‌تواند به افزایش اصطکاک داخلی و در نتیجه بهبود مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی‌شده کمک کرده باشد. همچنین، نزدیک‌تر شدن ذرات خاک و افزایش اصطکاک بین آن‌ها، منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی شده است. در ضمن نمونه حاوی تنها کلسیم کاربید (نمونه شماره ۴) عملکرد بهتری نسبت به نمونه حاوی تنها پودر شیشه (نمونه شماره ۳) داشته است. این نتیجه نشان می‌دهد که وجود کلسیم کاربید به تنهایی منجر به تشکیل ژئوپلیمر در خاک شده است ولی وجود پودر شیشه به تنهایی (به علت عدم وجود فعال کننده قلیایی) نمی‌تواند منجر به تشکیل ژئوپلیمر شود.

نتایج نشان می‌دهد که کاهش چسبندگی در خاک طبیعی پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب ۳۸٪ بوده در حالی که این کاهش در نمونه بهینه تثبیت‌شده تنها ۱۵٪ است. همچنین، کاهش زاویه اصطکاک داخلی در خاک طبیعی ۹/۶٪ و در نمونه تثبیت‌شده بهینه ۷٪ مشاهده شده است. این داده‌ها نشان می‌دهد که سیستم ژئوپلیمری مبتنی بر WGP و CCR نه‌تنها مقاومت اولیه خاک را افزایش

[1] Cohesion (C)
[2] internal friction angle (ϕ)

ACCEPTED MANUSCRIPT

می‌دهد، بلکه دوام خاک را در برابر سیکل‌های یخبندان-ذوب نیز به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. این رفتار به‌دلیل توانایی شبکه‌های ژئوپلیمری در جبران آسیب‌های ناشی از تشکیل و ذوب یخ و حفظ پیوندهای بین ذرات خاک است که در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است.



Sample No.1: WGP = 0%, CCR = 0%, Sample No.2: WGP = 15%, CCR = 7%
Sample No.3: WGP = 15%, CCR = 0%, Sample No.4: WGP = 0%, CCR = 7%

شکل۱۰: پارامترهای مقاومت برشی (C و ϕ) برای نمونه‌های مختلف خاک تحت سیکل‌های مختلف یخبندان-ذوب

۳-۳ آزمایش نفوذپذیری

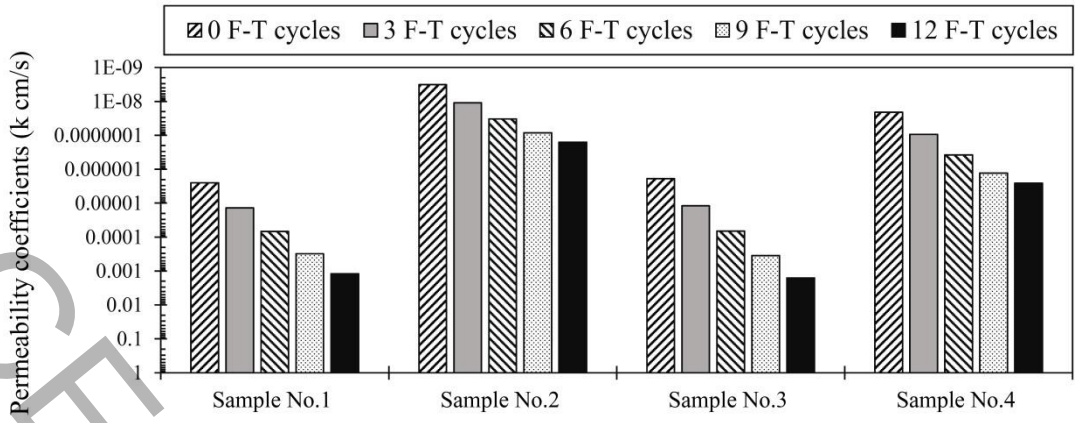
نفوذپذیری یکی از خصوصیات مهم ژئوتکنیکی خاک است که به توانایی جریان سیالات (عمدتاً آب) از طریق فضاهای خالی شامل منافذ و ترک‌های موجود در ساختار خاک مربوط می‌شود. ضریب نفوذپذیری[1] معیاری کمّی برای ارزیابی و مقایسه این خاصیت در خاک‌های مختلف است. نفوذ آب به کف لندفیل منجر به افزایش تاثیر منفی سیکل‌های یخبندان-ذوب در خاک می‌شود. در این پژوهش، برای نخستین بار، تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی بهسازی‌شده با پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایش نفوذپذیری روی نمونه‌های مختلف، تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب (۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ سیکل) در شکل ۱۱ ارائه شده است. آزمایش نفوذپذیری با روش هد افتان و مطابق با استاندارد ASTM D5084 انجام شد.

تحلیل دقیق داده‌ها نشان می‌دهد که روند افزایش نفوذپذیری در خاک طبیعی (NC) تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب کاملاً غیرخطی است. در سیکل‌های اولیه (۰ تا ۶ سیکل)، نفوذپذیری به سرعت افزایش یافته در حالی که در سیکل‌های بعدی (۶ تا ۱۲ سیکل) این روند کاهش یافته و به حالت پایداری نزدیک می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده آن است که سیکل‌های اولیه یخبندان-ذوب بیشترین تأثیر تخریبی را بر ساختار خاک ایجاد می‌کنند و پس از حدود ۶-۹ سیکل، سیستم به تعادل جدیدی می‌رسد که در آن ساختار خاک به‌گونه‌ای تغییر کرده است که تأثیرات اضافی سیکل‌های بعدی کمتر می‌باشد.

از طرف دیگر کمترین مقدار ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه شماره ۲ (حاوی ۱۵٪ پودر شیشه و ۷٪ کلسیم کاربید) است که این نتیجه با یافته‌های آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش برش مستقیم همخوانی دارد و نشان‌دهنده عملکرد مؤثر تثبیت ژئوپلیمری در کاهش تخلخل است. بررسی مقایسه‌ای نمونه‌های حاوی تنها پودر شیشه (CG15) و تنها کلسیم کاربید (CC7) نشان می‌دهد که نمونه CC7 عملکرد بهتری نسبت به نمونه CG15 داشته است.

[1] Permeability Coefficient (k cm/s)

ACCEPTED MANUSCRIPT



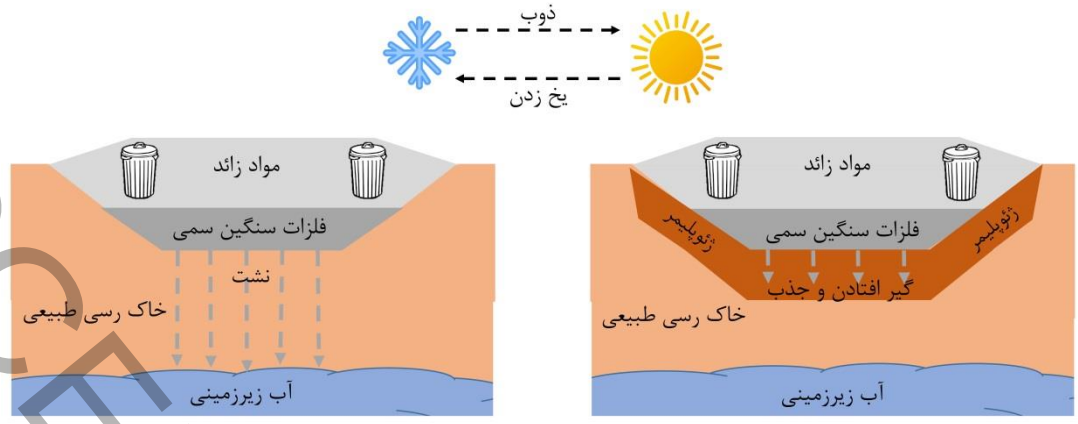
شکل ۱۱: ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های مختلف خاک تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب

۳-۳-۱ نگهداشت فلزات سنگین

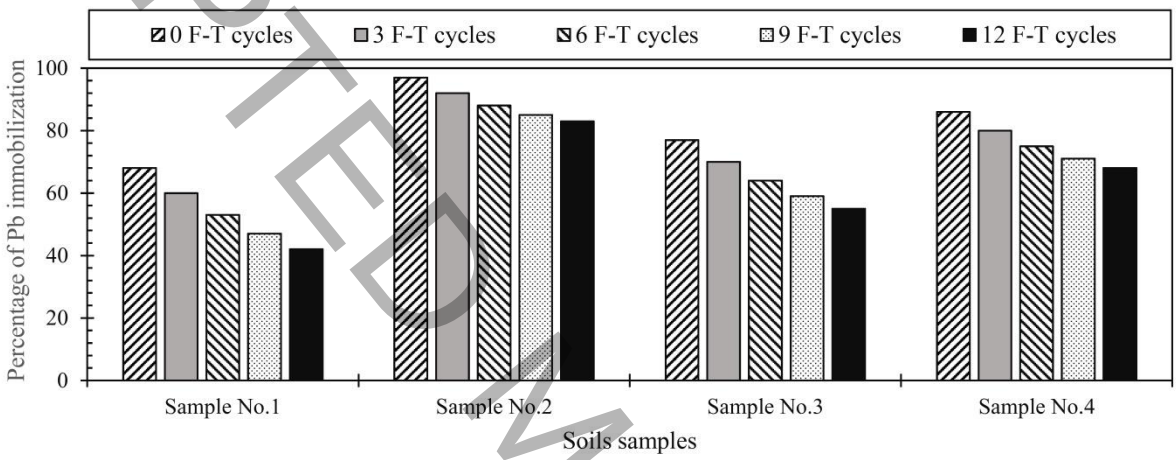
یکی از اهداف این پژوهش، بررسی نفوذپذیری خاک رسی در کف محل‌های دفن پسماند تحت تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بوده است. لازم به ذکر است که آب موجود در کف محل‌های دفن حاوی فلزات سنگین مضر است که در صورت نفوذ به آب‌های زیرزمینی، خطرات جدی برای محیط‌زیست ایجاد کرده و می‌تواند منجر به ابتلا به بیماری‌های مختلف در انسان شود [۴۶, ۴۷]. خوشبختانه، بهسازی خاک با ژئوپلیمر عملکرد مناسبی در کنترل این فرآیند دارد. تقریباً ۹۰٪ از عناصر سنگین توسط شبکه‌های سه‌بعدی ژئوپلیمری نگهداشت و در آن‌ها قفل می‌شوند که در شکل ۱ نشان داده شده است. این یافته‌ها بر اساس آزمایش‌های جذب با محلول نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) با غلظت اولیه ۵۰ mg/L و pH تنظیم‌شده به ۷/۰ ± ۰/۲ به‌دست آمده است. محلول به مدت ۲۴ ساعت با نمونه‌ها در تماس بود و غلظت باقیمانده سرب با دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) با دقت ±۰/۰۱ mg/L اندازه‌گیری شد. تحلیل داده‌های جذب نشان داد که مدل ایزوترم لانگمویر ($R^2 > 0.98$) و مدل سینتیک مرتبه دوم ($R^2 > 0.99$) بهترین برازش را دارند، که نشان‌دهنده جذب تک‌لایه و واکنش‌های شیمیایی غالب در سطح فعال ژئوپلیمر هستند. این فرآیند از طریق دو مکانیسم جایگزینی شیمیایی عناصر و احاطه فیزیکی انجام می‌گیرد. مانند جایگزینی یونی Pb^{+2} با Ca^{+2} در ساختار C-A-S-H و احاطه فیزیکی و محصورسازی در ساختار متراکم ژئوپلیمری [۱۷, ۴۸]. بااین‌حال، سهم هر یک از این سازوکارها در پژوهش حاضر به‌طور مستقل اندازه‌گیری نشده است؛ بنابراین، این موارد به‌عنوان تفسیرهای احتمالی نتایج در نظر گرفته می‌شوند. لازم به توضیح است که با توجه به پیچیدگی فرآیندهای همزمان جذب، رسوب و محصورسازی، اصطلاح "جذب" در اینجا به معنای کلی «نگهداری» و شامل تمام مکانیسم‌های موثر بر بازداری سرب در ماتریس خاک است.

تأثیر ژئوپلیمر در نگهداشت و قفل‌شدگی فلزات سنگین سمی از کف محل‌های دفن به‌صورت شماتیک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این تحقیق، تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر نفوذ سرب (به عنوان یکی از فلزات سمی) از خاک رسی طبیعی و بهسازی‌شده ارزیابی شده است. این بخش مشابه آزمایش نفوذپذیری است، با این تفاوت که به جای آب خالص، از محلولی با غلظت معین از آب و سرب استفاده شد. میزان نگهداشت سرب در نمونه‌های خاکی تحت سیکل‌های مختلف یخبندان-ذوب در شکل ۱۳ ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، کمترین میزان عبور و نفوذ سرب مربوط به نمونه شماره ۲ (نمونه تثبیت شده بهینه) بوده و فرآیند نگهداشت سرب حتی پس از ۱۲ سیکل نیز حفظ شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۲: تأثیر ژئوپلیمر بر کاهش نشت فلزات سنگین مضر از محل‌های دفن زباله به آب‌های زیرزمینی



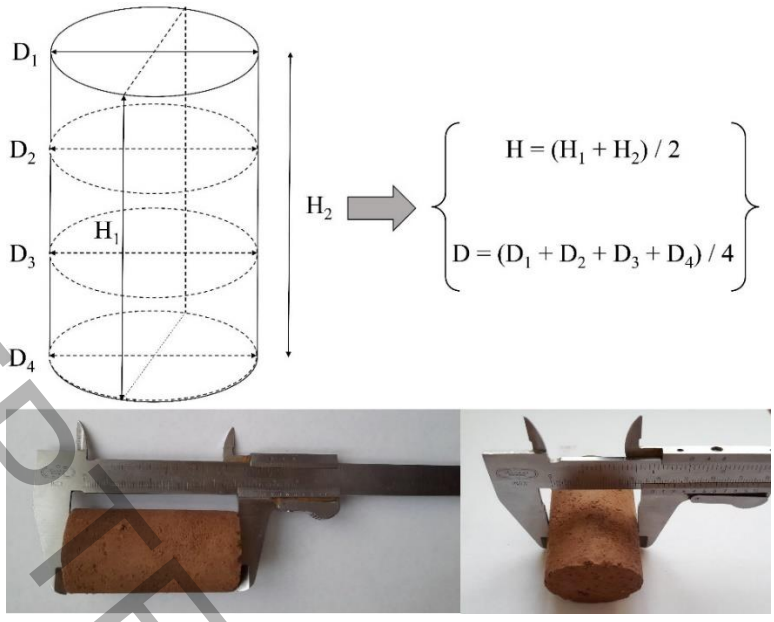
شکل ۱۳: درصد گیرافتادگی یا نگهداشت سرب (Pb) در نمونه‌های مختلف خاک تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب

۳-۴ تغییرات حجم

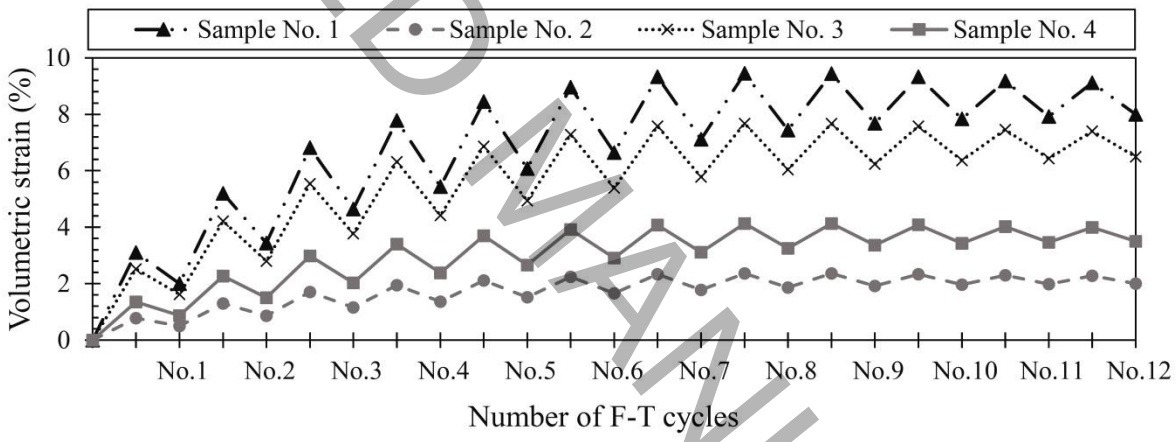
برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر کف لندفیل‌ها، بررسی تغییرات حجمی خاک ضروری است. نحوه محاسبه این تغییرات در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است، قطر و ارتفاع به ترتیب با استفاده از میانگین چهار و دو مقدار محاسبه شدند. کرنش حجمی[1] نمونه‌های مختلف خاک رسی در پایان هر سیکل یخبندان-ذوب در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در این نمودار، عدد صفر روی محور افقی بیانگر وضعیت اولیه نمونه است، مقادیر ۰/۵ و ۱ به ترتیب نشان‌دهنده پایان مرحله اول یخبندان و ذوب هستند و این توالی برای سیکل‌های بعدی ادامه می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، فرآیند یخبندان به دلیل تشکیل بلورهای یخ و انبساط حجمی، منجر به کرنش حجمی مثبت و فرآیند ذوب به دلیل آب‌شدن یخ و فروریختن ساختار، منجر به کرنش حجمی منفی می‌شود. بیشترین مقدار کرنش حجمی مربوط به نمونه خاک رسی طبیعی (نمونه شماره۱) با مقدار ۹/۴ درصد پس از دوره نهم یخبندان بوده است. مقادیر متناظر برای نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب۲/۳، ۷/۷و ۴/۱ درصد اندازه‌گیری شد. بنابراین، کمترین کرنش حجمی مربوط به نمونه تثبیت شده بهینه (نمونه شماره ۲) بوده لست. این نتیجه نشان می‌دهد که تشکیل ژئوپلیمر با ترکیب بهینه افزودنی‌ها تأثیر منفی سیکل‌های یخبندان-ذوب بر تغییرات حجمی خاک را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. هر چه قدر که تغییرات حجمی خاک کمتر باشد، آسیب کمتری به لندفیل وارد می‌شود.

[1] volumetric strain

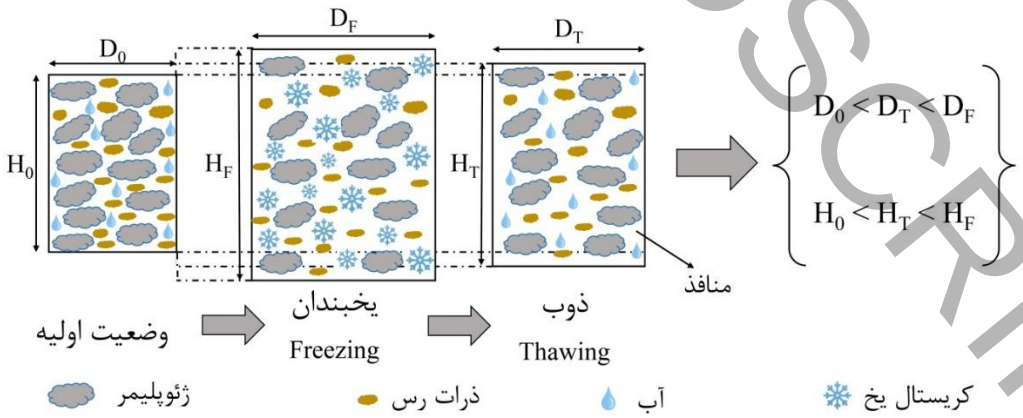
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۴: محاسبه تغییرات حجم نمونه



شکل ۱۵: تاثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر کرنش حجمی



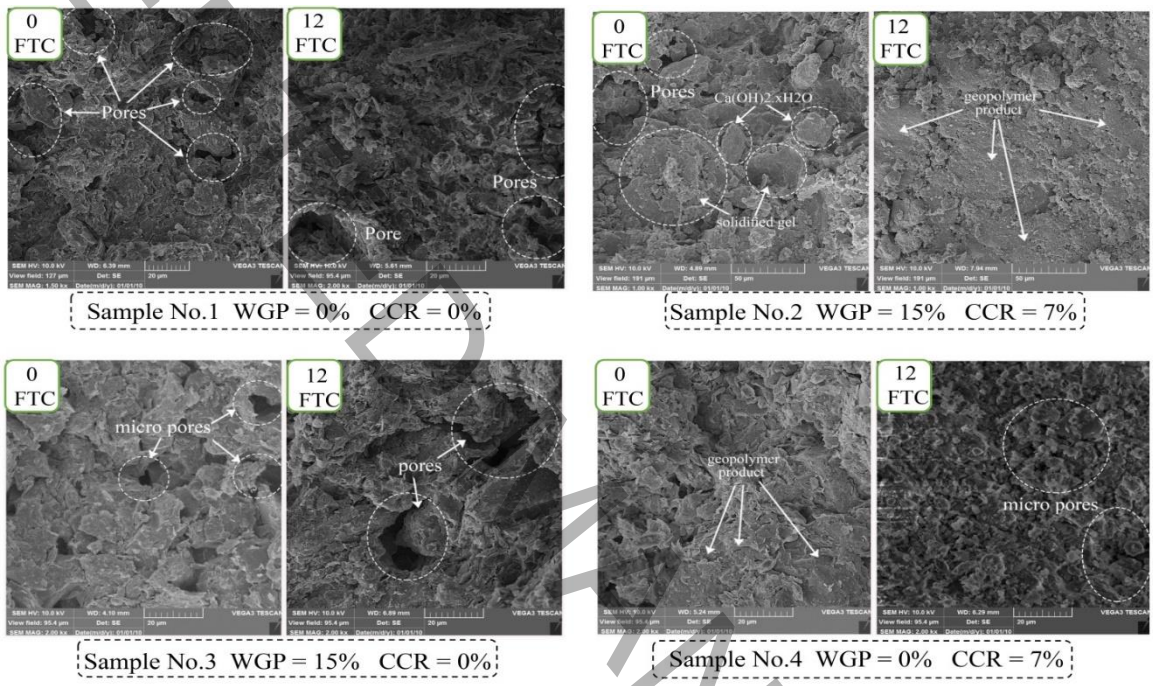
شکل ۱۶: شکل شماتیک تغییرات حجم نمونه خاک رسی تثبیت‌شده تحت یک سیکل یخبندان-ذوب

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۵ مطالعات ریز ساختاری

۳-۵-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر SEM برای چهار نوع خاک در دو حالت بدون یخبندان-ذوب (0 FTC) و پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب (12 FTC) در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار اولیه خاک رس طبیعی، بافتی سست و ناهمگن داشته و پیوندهای سیمانی مشاهده نمی‌شود. پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب ، تغییرات قابل توجهی در خاک ایجاد شده و تعداد زیادی ترک و منفذ به‌وجود آمده است. این فرآیند منجر به تشکیل ذرات ضعیف‌تر و جداشده در خاک شده است. به عبارت دیگر، پیوندهای بین کانی‌های رس شکسته شده و ساختاری پراکنده ایجاد شده که باعث کاهش مقاومت فشاری و پارامترهای برشی و افزایش نفوذپذیری خاک تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب شده است.



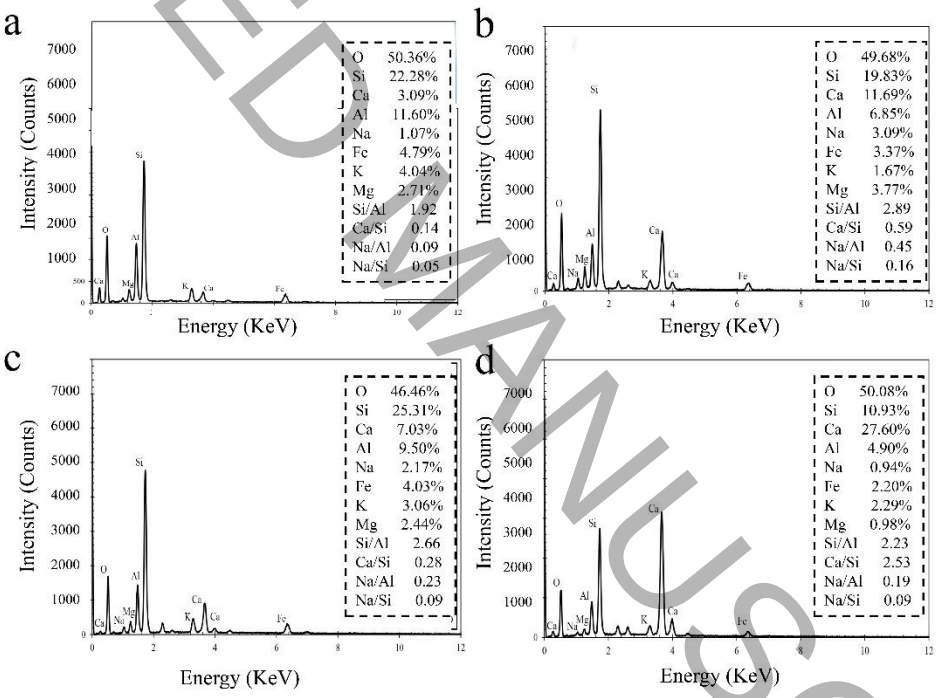
شکل ۱۷: تصاویرSEM خاک رسی طبیعی (نمونه شماره ۱)، نمونه تثبیت شده با مقادیر بهینه (نمونه شماره ۲)، نمونه تثبیت شده با فقط پودر شیشه (نمونه شماره ۳) و نمونه تثبیت شده با فقط کلسیم کاربید (نمونه شماره ۴) در شرایط بدون یخبندان-ذوب(0 FTC) و بعد از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب(12 FTC)

نمونه تثبیت شده بهینه (نمونه شماره ۲) در ابتدا ساختاری یکپارچه و همگن داشته و پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب تغییرات بسیار اندکی مشاهده شده است، به‌طوری که تنها تعداد محدودی ترک ریز در آن مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، مواد سیمانی و ژل-های ژئوپلیمری از جمله ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) و هیدرات آلومینو-سیلیکات کلسیم (C-A-S-H) در خاک تشکیل شده‌اند. این ژل‌های ژئوپلیمری که به‌صورت شبکه‌های سه‌بعدی و پیوندهای برشی در خاک توسعه یافته‌اند، دو مزیت اصلی دارند: اول، ساختار خاک از حالت انفرادی به ساختار توده‌ای تبدیل شده و پیوندهای بین دانه‌ها ایجاد می‌شود. دوم، افزایش چسبندگی و نزدیک‌تر شدن ذرات و افزایش سطح تماس بین آن‌ها شده که منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. در مجموع، پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب، تعداد منافذ و ترک‌ها در این نمونه بسیار کمتر از خاک رس طبیعی است. بنابراین، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بهبود یافته و اثرات منفی سیکل‌های یخبندان-ذوب به حداقل رسیده است.

۳-۵-۲ آنالیز طیف سنجی EDX

ACCEPTED MANUSCRIPT

طیف‌های EDX نمونه‌های خاکی در چهار نوع مختلف در شکل ۱۸ ارائه شده است. با توجه به تأثیر قابل‌توجه تشکیل ژئوپلیمر بر بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی نتایج EDX به‌عنوان شاخص برای بررسی و تأیید تشکیل ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفت. طیف‌ها حضور عناصر اصلی اکسیژن (O)، سیلیسیم(Si) ، کلسیم (Ca)، آلومینیوم (Al) و عناصر فرعی مانند منیزیم (Mg)، پتاسیم (K) و آهن (Fe) را نشان می‌دهند. حضور Si، Al و Ca در ترکیب نمونه‌ها می‌تواند از نظر فراهم بودن عناصر اولیه موردنیاز برای انجام واکنش‌های احتمالی و تشکیل محصولات سیمانی و ژئوپلیمری اهمیت داشته باشد. همچنین، نسبت Si/Al به‌عنوان یکی از شاخص‌های ترکیب عنصری و برای مقایسه نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، نمونه تثبیت‌شده با مقادیر بهینه نمونه(b)، دارای بیشترین نسبت Si/Al است؛ درحالی‌که خاک رسی طبیعی کمترین مقدار این نسبت را نشان می‌دهد. این تغییرات می‌تواند بیانگر تأثیر افزودن پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید بر ترکیب عنصری نمونه‌ها باشد. در نمونه حاوی پودر شیشه به‌تنهایی نمونه(c)، نسبت Si/Al نیز افزایش یافته است. با این حال، افزایش این نسبت به‌تنهایی نشان‌دهنده تشکیل محصولات ژئوپلیمری نیست؛ زیرا تشکیل این محصولات علاوه بر حضور عناصر اولیه، به شرایط شیمیایی و انجام واکنش‌های فعال‌سازی نیز وابسته است. لازم به تأکید است که نتایج EDX صرفاً ترکیب عنصری نمونه‌ها را مشخص می‌کند و برای شناسایی قطعی فازهای واکنشی نظیر ژل‌های C-S-H و C-A-S-H کافی نیست. بنابراین، تفسیر نتایج این آزمون در پژوهش حاضر به بررسی ترکیب عنصری و تغییرات نسبت Si/Al محدود شده است. شناسایی دقیق محصولات واکنشی و فازهای تشکیل‌شده مستلزم انجام آزمون‌های تکمیلی مانند XRD و FTIR است که می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۸: طیف‌های EDX برای خاک رسی طبیعی (a)، نمونه تثبیت شده با مقادیر بهینه (b)، نمونه تثبیت شده با فقط پودر شیشه (c) و نمونه تثبیت شده با فقط کلسیم کاربید (d)

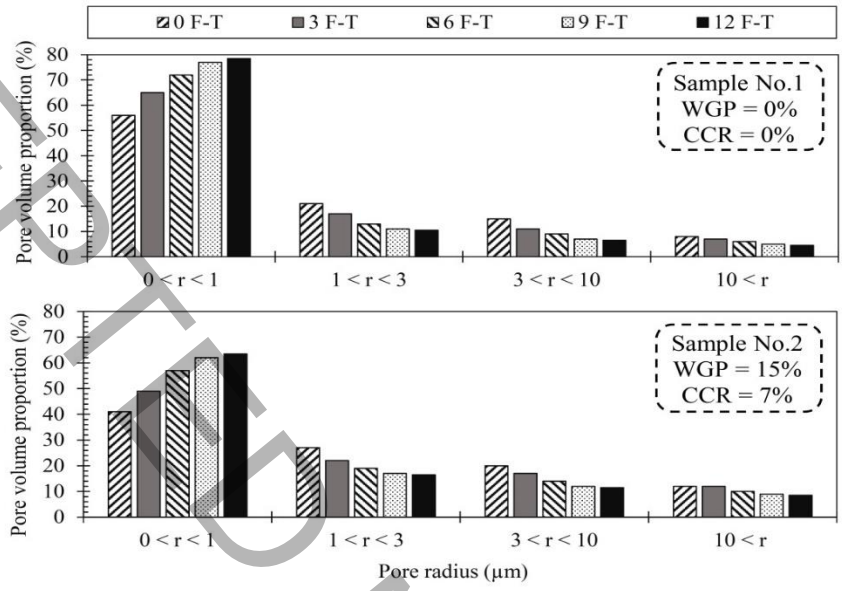
۳-۵- ۳ آزمایش BET

هدف از این بخش، ارزیابی تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر توزیع منافذ خاک[1] آنها بوده است. در شکل ۱۹ توزیع منافذ خاک برای خاک رسی طبیعی و خاک تثبیت شده با مقادیر بهینه افزودنی نشان داده شده است. در این تحقیق منافذ خاک بر اساس شعاع

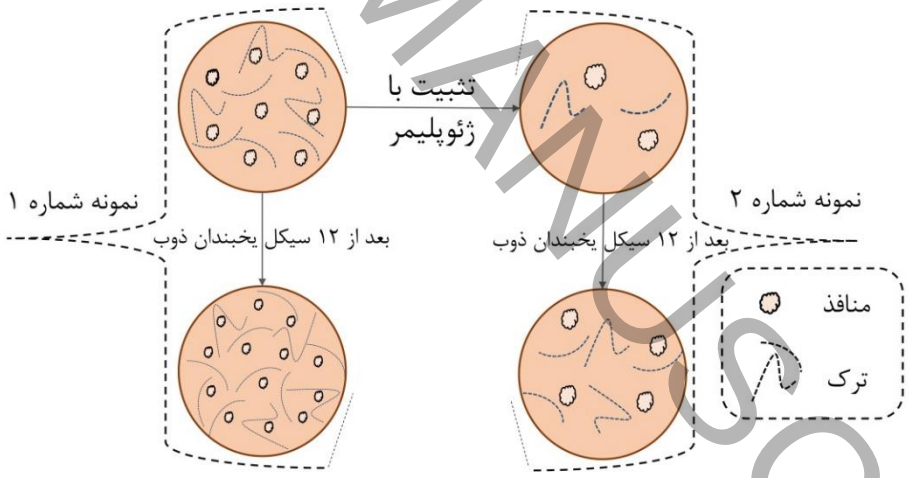
[1] pore volume proportion

ACCEPTED MANUSCRIPT

منافذ[1] به چهار گروه تقسیم شده‌اند: منافذ میکرو ($0 < r < 1\ \mu m$)، منافذ کوچک ($1\ \mu m < r < 3\ \mu m$)، منافذ متوسط ($3\ \mu m < r < 10$) و منافذ بزرگ ($10\ \mu m < r$). همانطور که مشاهده می‌شود، سیکل‌های یخبندان-ذوب برای هر دو نمونه خاک، منجر به افزایش میکرو منافذ و کاهش منافذ کوچک، متوسط و بزرگ شده است. به عبارت دیگر سیکل‌های یخبندان-ذوب با اینکه حجم منافذ خاک را افزایش داده‌اند ولی قطر آنها کاهش و تعداد آنها افزایش یافته است. در شکل شماره ۲۰ به صورت شماتیک این تغییرات نشان داده شده است.



شکل ۱۹: تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر نوزیع منافذ خاک رسی طبیعی (نمونه شماره ۱) و خاک تثبیت شده با مقادیر بهینه (نمونه شماره ۲)



شکل ۲۰: شکل شماتیک تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر منافذ و ترک‌های خاک رسی طبیعی (نمونه شماره ۱) و خاک تثبیت شده با مقادیر بهینه (نمونه شماره ۲)

۳-۶ محدودیت‌های پژوهش

تفاوت شرایط آزمایشگاهی با شرایط هیدرولیکی واقعی لندفیل: شرایط هیدرولیکی لایه آب‌بند در کف مراکز دفن پسماند علاوه بر ویژگی‌های اقلیمی منطقه، تحت تأثیر تولید شیرابه، عملکرد سیستم جمع‌آوری و زهکشی و میزان تماس لایه رسی با مایعات قرار دارد.

[1] pore radius

ACCEPTED MANUSCRIPT

در پژوهش حاضر، اگرچه آزمایش‌های مکانیکی و بررسی تغییرات حجمی تحت رطوبت اولیه کنترل‌شده انجام شدند، آزمایش‌های نفوذپذیری پس از اشباع نمونه‌ها صورت گرفتند. بنابراین، ضریب نفوذپذیری اندازه‌گیری‌شده، بیانگر رفتار هیدرولیکی نمونه‌ها در شرایط اشباع است. با این وجود، اشباع نمونه با آب در آزمایشگاه لزوماً معادل تماس طولانی‌مدت با شیرابه واقعی نیست؛ زیرا ترکیبات شیمیایی شیرابه می‌توانند بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک و محصولات ژئوپلیمری تأثیر بگذارند. همچنین، تغییرات تدریجی درجه اشباع در اثر نفوذ شیرابه و تأثیر هم‌زمان آن با سیکل‌های یخبندان–ذوب در این پژوهش به‌طور مستقل بررسی نشده است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، عملکرد بلندمدت خاک بهسازی‌شده در درجات مختلف اشباع، تحت جریان شیرابه واقعی یا محلول شبیه‌سازی‌شده آن و همراه با سیکل‌های یخبندان–ذوب بررسی شود.

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر به شرح زیر است:

۱- کمترین نفوذپذیری مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ پودر شیشه و ۷٪ کلسیم کاربید بود ($۳/۲\times۱۰^{-۹}$ cm/s)، بنابراین حتی پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب، نفوذپذیری آن ($۱/۶\times۱۰^{-۷}$ cm/s) کمتر از خاک رسی طبیعی ($۲/۵\times۱۰^{-۶}$ cm/s) بود. این نمونه تثبیت شده بهینه بیشترین افزایش مقاومت تک محوری را نسبت به خاک رسی طبیعی (۸/۵ برابر) و کمترین کرنش حجمی را بعد از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب (۲٪) داشت.

۲- ژئوپلیمر سازگار با محیط زیست که در این تحقیق استفاده شد، به طور موثری از نشت و نفوذ مواد سمی جلوگیری کرد. به طوریکه حتی پس از ۱۲ سیکل یخبندان-ذوب، ۸۳٪ سرب (Pb) در نمونه تثبیت شده بهینه، نگهداشت و گیرافتاده است.

۳- سیکل‌های یخبندان-ذوب منجر به کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده است. چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) در خاک رسی طبیعی به ترتیب ۳۸٪ و ۹/۶٪ کاهش یافت. در نمونه تثبیت شده بهینه، این کاهش‌ها به‌طور قابل توجهی کمتر بود، ۱۵٪ کاهش در c و ۷٪ کاهش درϕ مشاهده شد.

۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان‌دهنده متراکم‌تر شدن و افزایش پیوستگی ظاهری ساختار نمونه‌های بهسازی‌شده نسبت به خاک طبیعی است. این تغییرات می‌تواند ناشی از تشکیل محصولات واکنشی و بهبود پیوندهای بین‌ذره‌ای در اثر استفاده از مواد افزودنی باشد. در مقابل، اعمال سیکل‌های یخبندان-ذوب می‌تواند موجب ایجاد تغییرات و ناپیوستگی‌هایی در ساختار ریزدانه خاک شود.

۵- طبق نتایج آزمایش BET، سیکل‌های یخبندان-ذوب منجر به تغییر توزیع منافذ خاک شده است. برای همه نمونه‌های خاک سیکل‌های یخبندان-ذوب منجر به افزایش حجم منافذ خاک شده است ولی هم زمان قطر منافذ کاهش و تعداد آن‌ها افزایش یافته است. به عبارت دیگر منافذ بیشتری با قطر کوچکتر (منافذ میکرو) تشکیل شده است.

۶- با توجه به افزایش جمعیت و تولید انبوه زباله در سراسر جهان، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به مدیریت زباله و جلوگیری از آلودگی محیط زیست کمک کند. توصیه می‌شود سایر محققان پایداری طولانی‌مدت محل‌های دفن زباله را تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب و تأثیر نشت مواد سمی در این دوره را بررسی کنند.

منابع

[1] S.P. y Santos, E.F. de Carvalho, C.d.S. Penin, The big challenge: Reducing global emissions and increasing global GDP, Journal of Electrical Power & Energy Systems, 8(2) (2025) 76-93.

[2] E. Adeyanju, C. Okeke, Clay soil stabilization using cement kiln dust, in: IOP conference series: materials science and engineering, IOP Publishing, 2019, pp. 012080.

[3] S.A. Mortazavi Ravari, S.M. Marandi, S. Hamidi, Effect of eco-friendly geopolymer on permeability of clay soils under freeze-thaw cycles, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 35(6) (2026) 819-848.

[4] D. Wang, Q. Sun, Y. Pu, J. Wang, X. Xu, M. Zhan, Characteristics and predictive analysis of heavy metal pollution in typical municipal solid waste landfill soil, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 34(7) (2025) 1697-1716.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[5] T. Deng, H. Liu, J. Ni, H. Ke, L. Li, Y. Deng, Pb2+ leachability in the cement-based solidified/stabilized contaminated clay under saline and alkaline environments, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 34(2) (2025) 276-290.
[6] Z. Kavyani, N. Ghorbanzadeh, H. Etesami, M. Khalili Rad, Lead immobilization in contaminated soil through phosphate bioprecipitation with immobilized bacteria on biochar surface, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 34(7) (2025) 1636-1653.
[7] M. Nazari Heris, S. Aghajani, M. Hajialilue-Bonab, H. Vafaei Molamahmood, Effects of lead and gasoline contamination on geotechnical properties of clayey soils, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 29(3) (2020) 340-354.
[8] A. Zad, M. Kazemzadeh, Stabilization of lead and zinc nitrate-contaminated low plasticity clayey soil using metakaolin geopolymer, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 33(7) (2024) 759-783.
[9] S. Fateh, Y. Mansourkiaei, M.M. Shalchian, M. Arabani, M. Payan, P.Z. Ranjbar, A comparison of temperature and freeze-thaw effects on high-swelling and low-swelling soils stabilized with xanthan gum, Results in Engineering, 25 (2025) 103719.
[10] Y. Mansourkiaei, S. Fateh, M.M. Shalchian, M. Arabani, M. Payan, P.Z. Ranjbar, The impact of raspberry fiber and xanthan gum in improving the mechanical properties and freeze-thaw durability of bentonite soil subgrade, Case Studies in Construction Materials, 22 (2025) e04569.
[11] F. Shao, Z. Zhang, X. Tan, X. Huang, Effect of oil pollution on permeability of the grey desert soil under freeze-thaw cycles in arid areas of western China, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 30(8) (2021) 964-977.
[12] S. Maleki, Dadfarin, E. Ashari, Laboratory investigation of chemical-mechanical stabilization conditions and durability of SP sand samples under the effect of freeze-thaw periods., Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(8) (2023) 1601-1624.
[13] M.T. Asl, E. Taherabadi, Modification of silty clay strength in cold region's pavement using glass residue, Cold Regions Science and Technology, 154 (2018) 111-119.
[14] A.R. Fard, G. Moradi, B.K. Ghalehjough, A. Abbasnejad, Freezing-thawing resistance evaluation of sandy soil, improved by polyvinyl acetate and ethylene glycol monobutyl ether mixture, Geomechanics & engineering, 23(2) (2020) 179-187.
[15] J. Qi, P.A. Vermeer, G. Cheng, A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties, Permafrost and periglacial processes, 17(3) (2006) 245-252.
[16] M.F. Aswad, A.S. Al-Gharbawi, M.Y. Fattah, R.H. Mustfa, H.R. Hameed, Improvement of clayey soil characteristics using poly acrylamide geopolymer, Transportation Infrastructure Geotechnology, 11(4) (2024) 1673-1690.
[17] N. Bahrami, D. MOAZAMI, S. Pourakbar, The effect of calcium presence in limepet for clayey soil stabilization using the geopolymer method, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(11) (2024) 2179-2194.
[18] H. Castillo, H. Collado, T. Droguett, M. Vesely, P. Garrido, S. Palma, State of the art of geopolymers: A review, e-Polymers, 22(1) (2022) 108-124.
[19] A. Dibamehr, F. Behrouz Sarand, R. Vafaiepour Sorkhabi, The application of geopolymerization method to modify the yellow marl soil of Tabriz, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 56(4) (2024) 457-476.
[20] M. Kheimi, I.H. Aziz, M.M.A.B. Abdullah, M. Almadani, R. Abd Razak, Waste material via geopolymerization for heavy-duty application: A review, Materials, 15(9) (2022) 3205.
[21] W. Zhong, Y. Zhang, L. Fan, High-ductile engineered geopolymer composites (EGC) prepared by calcined natural clay, Journal of Building Engineering, 63 (2023) 105456.
[22] S.E. Hosseini, A. Tabarsa, A. Bahmanpour, Experimental study of stabilization of natural soil with geopolymer based on glass powder and calcium carbide, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(12) (2023) 4827-4846.
[23] A.O. Mawlod, D.K.H.A. Bzeni, Experimental and numerical investigation of fiber-reinforced slag-based geopolymer precast tunnel lining segment, Structural engineering and mechanics: An international journal, 89(1) (2024) 47-59.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[24] A.U. Qazi, A.M. Rasool, I. Ahmad, M. Ali, F.S. Niazi, Investigating the long-term behavior of creep and drying shrinkage of ambient-cured geopolymer concrete, Structural engineering and mechanics: An international journal, 89(4) (2024) 335-347.
[25] Rezvani, Saheli, J. Kamali, Optimizing the mechanical properties of geopolymer paste containing calcined clay and Dust clinker by Taguchi method, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 57(2) (2025) 247-270.
[26] S.K. Mohanty, P.K. Pradhan, C.R. Mohanty, Stabilization of expansive soil using industrial wastes, Geomechanics and engineering, 12(1) (2017) 111-125.
[27] A. Soltanian, A. Zad, M. Yazdib, A. Tohidic, An experimental investigation on dispersion and geotechnical properties of dispersive clay soil stabilized with Metakaolin and Zeolite, Geomechanics & engineering, 36(6) (2024) 589-599.
[28] A. Amiri, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Stabilisation of organic soils with alkali-activated binders, International Journal of Pavement Engineering, 24(2) (2023) 2104844.
[29] L.B. de Oliveira, A.R. de Azevedo, M.T. Marvila, E.C. Pereira, R. Fediuk, C.M.F. Vieira, Durability of geopolymers with industrial waste, Case Studies in Construction Materials, 16 (2022) e00839.
[30] J. Matsimbe, M. Dinka, D. Olukanni, I. Musonda, Geopolymer: A systematic review of methodologies, Materials, 15(19) (2022) 6852.
[31] P. Cong, Y. Cheng, Advances in geopolymer materials: A comprehensive review, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 8(3) (2021) 283-314.
[32] D. Khale, R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, Journal of materials science, 42(3) (2007) 729-746.
[33] A. Mobasherzadeh Mahani, S.M. Marandi, S. Hamidi, Macrostructural and Microstructural Study on the Bentonite stabilized using Recycled Glass Powder-Based Geopolymer, Iranian Journal of Soil and Water Research, 57(8) (2026) 1981-2001.
[34] J. de Jesús Arrieta Baldovino, R. dos Santos Izzo, J.L. Rose, M.A. Avanci, Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization, Geotechnical and Geological Engineering, 38(4) (2020) 4013-4031.
[35] Y. Jiang, T.-C. Ling, K.H. Mo, C. Shi, A critical review of waste glass powder–Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products, Journal of environmental management, 242 (2019) 440-449.
[36] D. Kazmi, D.J. Williams, M. Serati, Waste glass in civil engineering applications—A review, International Journal of Applied Ceramic Technology, 17(2) (2020) 529-554.
[37] M.A. Mohammadzadeh, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Durability and strength of geopolymer with recycled glass powder base for clay stabilization, KSCE Journal of Civil Engineering, 27(1) (2023) 156-168.
[38] A. Siddika, A. Hajimohammadi, V. Sahajwalla, Stabilisation of pores in glass foam by using a modified curing-sintering process: Sustainable recycling of automotive vehicles' waste glass, Resources, Conservation and Recycling, 179 (2022) 106145.
[39] A.A. Al-Dossary, A.M. Awed, A.R. Gabr, M.Y. Fattah, S.M. El-Badawy, Performance enhancement of road base material using calcium carbide residue and sulfonic acid dilution as a geopolymer stabilizer, Construction and Building Materials, 364 (2023) 129959.
[40] T. Li, L. Kong, A. Guo, The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze–thaw cycles with loads, Cold Regions Science and Technology, 192 (2021) 103393.
[41] M. Aamir, Z. Mahmood, A. Nisar, A. Farid, T. Ahmed Khan, M. Abbas, M. Ismaeel, S.A.R. Shah, M. Waseem, Performance evaluation of sustainable soil stabilization process using waste materials, Processes, 7(6) (2019) 378.
[42] B. Mir, A.R. Wani, K.S. Wani, Influence of municipal solid waste leachate on the geotechnical properties of soil, Indian Geotechnical Journal, 56(3) (2026) 1403-1422.
[43] B.N. Kulkarni, V. Anantharama, Comparative analysis of soil contamination caused by existing municipal solid waste management facilities, Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 22 (2024) 100979.
[44] C.A. Igwegbe, E.A. López-Maldonado, A.C. Landázuri, P.E. Ovuoraye, A.I. Ogbu, N. Vela-García, A. Białowiec, Sustainable municipal landfill leachate management: Current practices, challenges, and future directions, Desalination and Water Treatment, 320 (2024) 100709.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[45] X. Zhang, P. Ye, M. Fujii, G. Kondo, The application of freeze-thaw cycle treatment on landfill sludge: Impact on physicochemical properties and physical-mechanical characteristics, Journal of Cleaner Production, 468 (2024) 143106.
[46] S. Wei, X. Li, H. Liu, Y. Gu, T. Wang, Stabilization and release characteristics of heavy metals in desulfurization sludge from coal-fired power plants, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 34(3) (2025) 376-391.
[47] W. Zhou, Z. Dan, D. Meng, J. Guo, P. Zhou, G. Chen, Analysis and assessment of the soil environment around a plateau municipal solid waste incineration plant, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 33(7) (2024) 905-921.
[48] Y. Wu, B. Lu, T. Bai, H. Wang, F. Du, Y. Zhang, L. Cai, C. Jiang, W. Wang, Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges, Construction and Building Materials, 224 (2019) 930-949.

ACCEPTED MANUSCRIPT