

تثبیت پایدار خاک‌های رسی بستر راه با ژئوپلیمر حاصل از ترکیب پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید با رویکرد زیست‌محیطی

مقاله عملی - پژوهشی

*سید علی مرتضوی راوری (نویسنده مسئول)، دانش آموخته دکتری، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ایران

سید مرتضی مرنودی، استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: seyedali.mortazavi@eng.uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۱۵۴-۱۴۱

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از پسماندهای صنعتی و شهری در بهسازی خاک‌های مشکل‌دار - به‌ویژه خاک‌های رسی بستر راه‌ها - به‌عنوان یک استراتژی پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است. خاک‌های رسی به‌دلیل خصوصیات نامطلوبی همچون تورم‌پذیری بالا، نشست قابل‌توجه، ظرفیت باربری پایین و حساسیت به تغییرات رطوبتی، اجرای پایدار راه‌ها را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازند. روش‌های سنتی تثبیت خاک، از جمله مصرف سیمان و آهک، علاوه بر هزینه‌بر بودن، سهم قابل‌توجهی در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای - به‌ویژه دی‌اکسید کربن - دارند و با اصول توسعه پایدار همخوانی کاملی ندارند. در این زمینه، بازیافت پسماندهای جامد شهری و صنعتی نه تنها به‌عنوان جایگزینی هوشمندانه برای مواد مصرفی سنتی عمل می‌کند، بلکه گامی مؤثر در جهت کاهش حجم ضایعات، صرفه‌جویی در منابع معدنی و حرکت به‌سوی اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود. در این پژوهش، از ترکیب پودر شیشه زائد (به‌عنوان پسماند شهری غنی از سیلیس) و پسماند کلسیم کاربید (حاصل فرآیند تولید گاز استیلن در صنایع شیمیایی) در قالب یک سیستم ژئوپلیمری برای تثبیت خاک رسی استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد این ترکیب، آزمایش‌های ژئوتکنیکی و مطالعات ریزساختاری انجام شد. یافته‌ها نشان داد که نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با ۱۵ درصد پودر شیشه زائد و ۷ درصد پسماند کلسیم کاربید بیشترین بهبود را در پارامترهای مکانیکی از خود نشان دادند. همچنین، تحلیل‌های میکروسکوپی تأیید کردند که تشکیل محصولات ژئوپلیمری در ماتریس خاک، تراکم ساختاری و کاهش تخلخل مؤثر را به‌دنبال داشته است. این پژوهش نه تنها از دیدگاه فنی - مکانیکی، بلکه از منظر زیست‌محیطی و مدیریت پسماند، اهمیت بالایی دارد؛ چرا که استفاده از این ترکیب دوگانه می‌تواند همزمان چالش‌های فنی بهسازی بستر رسی راه و دغدغه‌های زیست‌محیطی ناشی از تجمع پسماندها را مدیریت کند. در نتیجه، یافته‌های این مطالعه می‌تواند زمینه‌ساز کاربرد گسترده‌تر مواد زائد در پروژه‌های زیرساختی پایدار و کم‌کربن باشد.

واژه‌های کلیدی: بستر رسی راه، پودر شیشه، پسماند کلسیم کاربید و ژئوپلیمر، مواد زائد

۱- مقدمه

رسی به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی‌شان - از جمله حساسیت بالا به رطوبت، تورم‌پذیری در حضور آب، نشست تأخیری و مقاومت برشی پایین - در برابر بارهای ترافیکی و نوسانات

بهسازی بستر خاکی راه‌ها، به‌ویژه در مناطقی که با خاک‌های رسی غیرمناسب مواجه هستند، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان عمران در پروژه‌های راهسازی بوده است. خاک‌های

پوزولانی مناسبی از خود نشان می‌دهند (Siddika et al., 2022; Tabaroei and Bozorgvar, 2025). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این پودر در حضور فعال‌کننده‌های قلیایی می‌تواند در واکنش‌های ژئوپلیمری شرکت کرده و به تشکیل یک شبکه سه‌بعدی پایدار از سیلیکات‌های آلومینیومی منجر شود که در نتیجه، مقاومت فشاری، چسبندگی و دوام خاک را به‌طور معناداری ارتقا می‌دهد (Premathilaka et al., 2026; Jamalimoghadam and Bahmyari, 2023). از سوی دیگر، پسماند کلسیم کاربید که عمدتاً از هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)_2) تشکیل شده است، به دلیل قلیایی بودن و توانایی واکنش با ترکیبات سیلیسی و آلومینی، می‌تواند هم‌زمان به عنوان منع کلسیم و فعال‌کننده قلیایی در سیستم‌های ژئوپلیمری عمل کند (Zhou et al., 2020; Chen et al., 2023). ژئوپلیمرها، به عنوان چسب‌های معدنی نسل جدید، از واکنش متقابل مواد غنی از سیلیس و آلومینا (مانند خاکستر بادی، متاکائولین یا پودر شیشه) با محلول‌های قلیایی پر قدرت مانند سدیم سیلیکات یا هیدروکسید سدیم تشکیل می‌شوند. این مواد به دلیل ساختار شیمیایی پایدار، مقاومت مکانیکی مناسب و پایداری بالا در برابر عوامل محیطی، جایگزینی امیدبخش برای سیمان پرتلند در کاربردهای ژئوتکنیکی محسوب می‌شوند (Zhong et al., 2023; Aswad et al., 2024). در اکثر تحقیقات گذشته از سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده شده است (Diana et al., 2025; Silva et al., 2025; Wassie and Demir, 2024). با وجود کارایی سدیم هیدروکسید در القای واکنش ژئوپلیمری، استفاده از آن با چالش‌های قابل توجهی مواجه بوده و به خاطر هزینه بالای مواد از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. لذا، باید از جنبه ایمنی خطرات خوردگی و نیاز به اقدامات ایمنی ویژه را در نظر گرفت، و از جنبه دوام، تشکیل لایه‌های سطحی نامطلوب، نشست یون سدیم و کاهش مقاومت در شرایط محیطی پویا را باید مد نظر قرار داد (Contreras et al., 2024; El-Habacha et al., 2024). برای حل این مشکل از پسماند کلسیم کاربید به عنوان یک زباله صنعتی برای نقش فعال‌کننده قلیایی استفاده گردید. در نتیجه شکاف‌های تحقیقاتی درباره استفاده از مواد فعال‌کننده قلیایی جدید وجود دارد. با این وجود، تلفیق پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید به عنوان یک سیستم دوجزئی ژئوپلیمری برای تثبیت خاک‌های

آب‌وهوایی رفتاری ناپایدار از خود نشان می‌دهند. این رفتار منجر به پدیده‌هایی همچون ترک‌خوردگی سطحی، نشست‌های غیریکنواخت، تغییر شکل‌های دائمی و در نهایت کاهش چشمگیر عمر سرویس روستازی می‌شود. این امر، نیاز فوری به راهکارهایی مؤثر، اقتصادی و در عین حال پایدار برای بهبود خواص مهندسی این خاک‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. روش‌های متداول تثبیت خاک، از جمله استفاده از سیمان و آهک، اگرچه از دیدگاه فنی عملکرد قابل قبولی دارند، اما با چالش‌های جدی از دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه‌اند؛ از جمله هزینه‌بر بودن، وابستگی به منابع معدنی غیرقابل تجدید و سهم قابل توجه در انتشار گاز دی‌اکسید کربن (Ramezani et al., 2023; Miraki et al., 2022). به عنوان نمونه، صنعت سیمان‌سازی به تنهایی حدود ۸ درصد از کل انتشارات جهانی CO_2 را به خود اختصاص داده است، که این موضوع لزوم جستجوی جایگزین‌های کم‌کربن و پایدار را به‌ویژه در صنعت ساخت‌وساز برجسته می‌سازد (Hosseini et al., 2022; Matsimbe et al., 2022).

در این چارچوب، استفاده از پسماندهای صنعتی و شهری به عنوان مواد جایگزین در تثبیت خاک، در دهه‌های اخیر به عنوان یک رویکرد دوگانه-هم فنی و هم زیست‌محیطی- مورد توجه قرار گرفته است. این استراتژی نه تنها به بازیافت پسماندها و کاهش حجم آن‌ها در مراکز دفن کمک می‌کند، بلکه با حفظ منابع طبیعی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، گامی مؤثر در جهت تحقق اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار محسوب می‌شود (Pu et al., 2024; Wang et al., 2025). تاکنون، موادی چون خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و سایر ضایعات صنعتی در مطالعات متعددی به عنوان پوزولان یا افزودنی در تثبیت خاک به کار گرفته شده‌اند (Deng et al., 2025; Kavyani et al., 2025). با این وجود، استفاده از برخی پسماندهای نوظهور- از جمله پودر شیشه حاصل از بازیافت ضایعات شهری و پسماند کلسیم کاربید به عنوان محصول جانبی فرآیند تولید گاز استیلن- به‌ویژه در قالب سیستم‌های ژئوپلیمری، هنوز در مراحل آزمایشگاهی و تحقیقاتی قرار دارد و ظرفیت بالایی برای نوآوری در صنعت ژئوتکنیک دارد.

شیشه‌های بازیافتی پس از فرآیند جداسازی و آسیاب، به راحتی به پودر ریزی با ذرات یکنواخت تبدیل می‌شوند که به دلیل محتوای بالای سیلیس (معمولاً بیش از ۷۰ درصد SiO_2)، ویژگی

آماده‌سازی نمونه، آزمایش‌های حدود آتبرگ، دانه‌بندی و تراکم انجام شد. بر اساس منحنی دانه‌بندی (شکل ۱) و پارامترهای فیزیکی (جدول ۱)، خاک به‌عنوان رس کم‌پلاستیسیته (CL) طبقه‌بندی شد. رطوبت بهینه ۱۷/۳٪ و چگالی خشک حداکثر ۱/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین گردید. این خاک از نوع نرم و ضعیف است و در ساخت‌وسازهای عمرانی مشکلاتی ایجاد می‌کند. ترکیب شیمیایی آن با آنالیز مشخص شد که غنی از سیلیس (۴۲٪) و آلومینا (۱۲٪) است (جدول ۲).

۲-۱-۲- پودر شیشه

در این تحقیق، پودر شیشه از پسماند کارگاه‌های برش شیشه (به‌صورت خمیری) تهیه شد که نیاز به خردایش مجدد را مرتفع می‌کند. این پسماند که معمولاً وارد فاضلاب می‌شود، سالانه حجم قابل‌توجهی از شیشه را از چرخه صنعتی خارج می‌کند. استفاده از آن در تثبیت خاک، راهکاری پایدار و امیدبخش است. مراحل جمع‌آوری در شکل ۲ و ترکیب شیمیایی پودر شیشه در جدول ۲ آورده شده است. پودر شیشه غنی از SiO_2 است و به‌عنوان پیش‌ماده ژئوپلیمر مناسب است.

۳-۱-۲- پسماند کلسیم کاربید

پسماند کاربید کلسیم (CCR) یک پسماند صنعتی حاصل از تولید گاز استیلن است. ترکیب شیمیایی آن با آنالیز پراش پرتو ایکس (XRF) تعیین شد که در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مؤلفه اصلی آن اکسید کلسیم (۶۶/۵٪) است که باعث می‌شود CCR به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی در تشکیل ژئوپلیمر عمل کند.

رسی به‌ویژه در مناطق شهری که تولید این دو نوع پسماند بالاست، هنوز به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته و فضای گسترده‌ای برای پژوهش‌های آینده فراهم می‌کند.

در این پژوهش، ترکیبی از پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید به‌عنوان مواد اولیه یک سیستم ژئوپلیمری نوین برای تثبیت خاک رسی بستر راه مورد استفاده قرار گرفته است. این انتخاب با دو هدف کلیدی همراه است: اول، ارتقای خواص ژئوتکنیکی خاک از طریق تشکیل فازهای چسبنده معدنی؛ و دوم، مدیریت پایدار پسماندهای شهری و صنعتی از طریق دفع ایمن و مفید آن‌ها در پروژه‌های عمرانی. جهت ارزیابی جامع عملکرد این ترکیب، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش برش مستقیم و همچنین مطالعات زیرساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز طیف سنجی و آنالیز سطح ویژه بر پایه نظریه BET (Brunauer-Emmett-Teller) انجام شده است. یافته‌های این مطالعه نه تنها از منظر فنی-مکانیکی ارزشمند است، بلکه از دیدگاه توسعه پایدار و مدیریت پسماند نیز می‌تواند راهگشای کاربرد گسترده‌تر ضایعات شهری و صنعتی در پروژه‌های زیرساختی باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱-۲- مواد

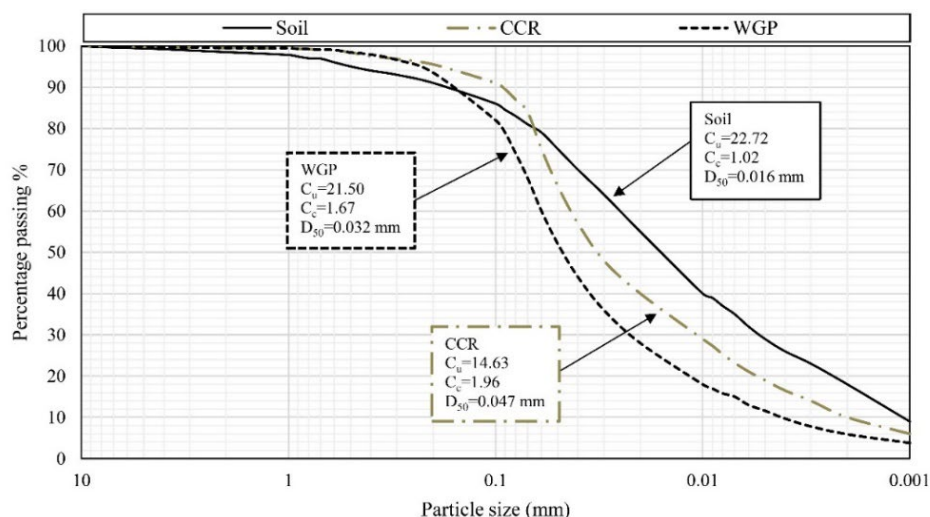
سه نوع ماده مورد استفاده قرار گرفته است: خاک رس طبیعی، پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربید.

۲-۱-۱- خاک

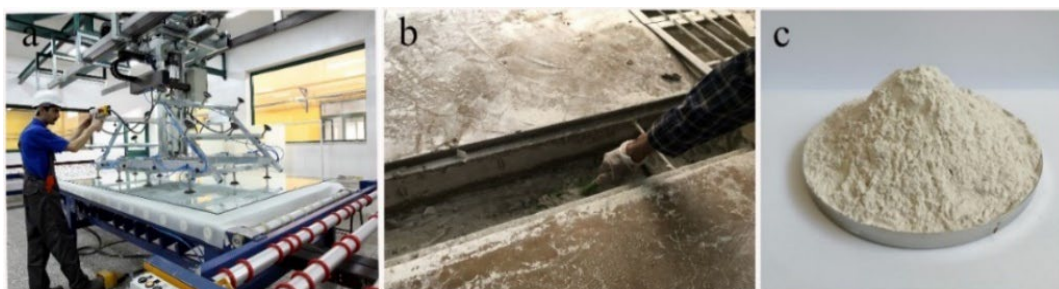
خاک رس طبیعی (NC) از منطقه لاله زار، سردترین منطقه استان کرمان، ایران (ارتفاع ۲۸۰۰ متری) جمع‌آوری شد. پس از

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



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک، CCR و WGP



شکل ۲. (a) کارگاه‌های برش شیشه، (b) جمع‌آوری خمیر پودر شیشه، (c) پودر شیشه زائد (WGP)

جدول ۲. ترکیب شیمیایی خاک، پودر شیشه زائد و پسماند کلسیم کاربرد

ترکیب شیمیایی (%)	پسماند کلسیم کاربرد	پودر شیشه زائد	خاک
SiO ₂	۴/۱۵	۷۰/۹۵	۴۲/۷۵
Al ₂ O ₃	۱/۵۷	۱/۷۶	۱۲/۶۵
CaO	۶۶/۴۹	۱۰/۶۱	۸/۱۲
Fe ₂ O ₃	۰/۴۳	۰/۲۹	۸/۳۳
MgO	۰/۵۹	۲/۵۴	۱۲/۸۱
SO ₃	۰/۵۱	۰/۳۸	۱/۴۸
K ₂ O	۰/۰۳	۰/۴۰	۱/۸۳
Na ₂ O	۰/۲۳	۱۲/۴۶	۱/۲۲
TiO ₂	۰/۰۳	۰/۱۷	۲/۶۵
LOI	۲۵/۵۷	۰/۲۴	۱۱/۵۸

۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش، به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند ساخت ژئوپلیمر، دو روش مختلف اختلاط مواد اولیه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در روش اول، تمام اجزای جامد شامل خاک رس، پودر شیشه زائد (WGP) و پسماند کلسیم کاربرد (CCR) به‌صورت

خشک و یکنواخت در مخلوط‌کن آزمایشگاهی هم‌زده شدند و سپس آب اضافه گردید. در مقابل، در روش دوم، ابتدا خاک و پودر شیشه زائد (WGP) با یکدیگر مخلوط شدند و سپس محلول فعال‌کننده قلیایی تشکیل‌شده از آب و پسماند کلسیم کاربرد (CCR) به‌صورت مایع به مخلوط اضافه گردید. یافته‌های

انجام شد. به منظور افزایش دقت و کاهش خطاهای آماری، برای هر ترکیب شیمیایی، سه نمونه تکراری تهیه و میانگین نتایج به عنوان مقدار نهایی گزارش گردید. همچنین، مراحل آماده سازی نمونه ها به صورت گام به گام در شکل ۳ نشان شده است.

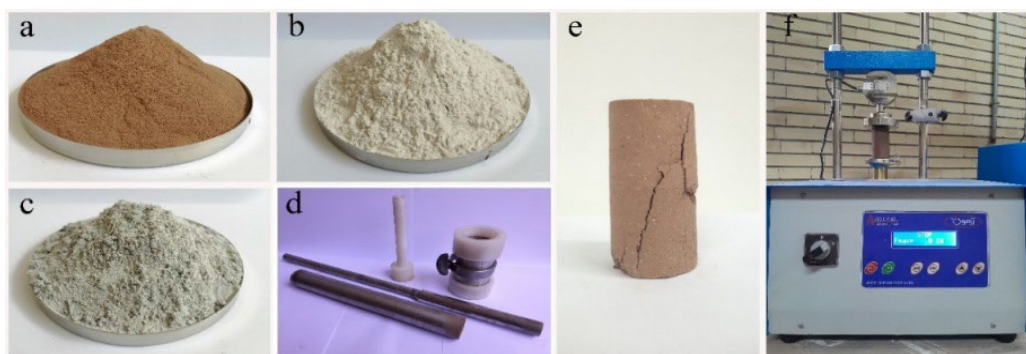
آزمون برش مستقیم نیز مطابق استاندارد ASTM D3080 انجام شد. نمونه های برش در قالب های مکعبی تهیه و با همان انرژی تراکم استاندارد در سه لایه در جعبه برش مستقیم قرار گرفتند. به منظور کاهش اثر اصطکاک جانبی بین صفحات فلزی جعبه و نمونه، لایه ای بسیار نازک از گریس سیلیکونی روی سطوح بالایی و پایینی جعبه اعمال گردید. پس از نصب نمونه در دستگاه، تنش های عمودی با مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال به صورت گام به گام اعمال شدند. سپس، جابه جایی افقی با نرخ کنترل شده ی ۰/۱ میلی متر بر دقیقه آغاز گردید. در حین آزمایش، تغییرات جابه جایی های افقی و عمودی به وسیله دو سنسور با دقت بالا ثبت شدند و نیروی برشی نیز توسط سیستم داده برداری دیجیتال دستگاه به صورت پیوسته ضبط گردید.

در پایان، به منظور درک عمیق تر از مکانیزم های ریز ساختمانی مؤثر بر بهبود خواص مکانیکی، مطالعات زیر ساختمانی شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی پرتو ایکس (EDX) و آنالیز BET بر روی نمونه ها انجام شد. این تحلیل ها به خوبی نشان دادند که تشکیل محصولات ژئوپلیمری در فضای بین دانه ای، منجر به کاهش تخلخل مؤثر، پر شدن حفرات ریز و ایجاد پیوندهای شیمیایی پایدار در ماتریس خاک شده است. در جدول ۳ الگوی آزمایش های انجام شده روی نمونه خاک رسی طبیعی (NC) تثبیت شده با پودر شیشه زائد (WGP) و پسماند کلسیم کاربید (CCR) نشان داده شده است.

آزمایشگاهی نشان داد که روش اول، یعنی اختلاط خشک تمام اجزای جامد پیش از افزودن آب، عملکرد برتری از خود نشان می دهد. این برتری از دو دیدگاه فنی و شیمیایی قابل تبیین است: اول، اختلاط خشک اولیه منجر به توزیع یکنواخت تر اجزای ریزدانه در ماتریس خاک می شود که در نتیجه، همگنی بیشتری در ترکیب نهایی ایجاد کرده و خطاهای انسانی در آماده سازی نمونه ها (به ویژه ناشی از جداسازی اجزا) را به طور چشمگیری کاهش می دهد. دوم، واکنش شیمیایی بین کلسیم کاربید و آب به شدت گرمازا است و گرمای حاصل از این واکنش می تواند به عنوان یک عامل انرژی دهنده، فرآیند پلیمر شدن ژئوپلیمر را تسریع کند. در روش اول، این گرما به طور مستقیم در محیط مخلوط خاکی تولید و جذب سیستم می شود، در حالی که در روش دوم (که در آن CCR از قبل با آب مخلوط شده است) بخش قابل توجهی از این گرما قبل از اضافه شدن به خاک هدر می رود و از اثربخشی آن در تسریع فرآیند ژئوپلیمری کاسته می شود.

با توجه به این یافته ها، روش اول به عنوان روش استاندارد آماده سازی نمونه ها در این مطالعه انتخاب گردید. نمونه های تهیه شده با استفاده از انرژی تراکم استاندارد (بر اساس آزمون پروکتور استاندارد) در سه لایه و با تراکم یکنواخت در قالب های استوانه ای فشرده شدند. بلافاصله پس از قالب گیری، تمام نمونه ها در کیسه های پلی اتیلنی ضد نفوذ درزبندی شدند تا از اتلاف رطوبت و تبخیر آب (که برای ادامه واکنش های ژئوپلیمری ضروری است) جلوگیری شود. نمونه ها به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری قرار گرفتند.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوره (UCS) بر اساس استاندارد ASTM D2166 و با نرخ کرنش ثابت ۱ میلی متر بر دقیقه



شکل ۳. آماده سازی نمونه ها برای آزمایش فشار آزاد: (a) خاک رس طبیعی، (b) پودر شیشه زائد (WGP)، (c) پسماند کلسیم کاربید (CCR)، (d) ابزار آماده سازی نمونه (e) نمونه پس از آزمایش، (f) دستگاه آزمایش تک محوری

جدول ۳. الگوی آزمایش‌های انجام شده روی نمونه خاک رسی طبیعی (NC) تثبیت شده با پودر شیشه زائد (WGP) و پسماند کلسیم کاربید (CCR)

شماره نمونه	نمونه تثبیت شده
۱	NC + 0% WGP + 0% CCR
۲	NC + 0% WGP + 3% CCR
۳	NC + 0% WGP + 7% CCR
۴	NC + 0% WGP + 10% CCR
۵	NC + 0% WGP + 13% CCR
۶	NC + 5% WGP + 0% CCR
۷	NC + 5% WGP + 3% CCR
۸	NC + 5% WGP + 7% CCR
۹	NC + 5% WGP + 10% CCR
۱۰	NC + 5% WGP + 13% CCR
۱۱	NC + 10% WGP + 0% CCR
۱۲	NC + 10% WGP + 3% CCR
۱۳	NC + 10% WGP + 7% CCR
۱۴	NC + 10% WGP + 10% CCR
۱۵	NC + 10% WGP + 13% CCR
۱۶	NC + 15% WGP + 0% CCR
۱۷	NC + 15% WGP + 3% CCR
۱۸	NC + 15% WGP + 7% CCR
۱۹	NC + 15% WGP + 10% CCR
۲۰	NC + 15% WGP + 13% CCR
۲۱	NC + 20% WGP + 0% CCR
۲۲	NC + 20% WGP + 3% CCR
۲۳	NC + 20% WGP + 7% CCR
۲۴	NC + 20% WGP + 10% CCR
۲۵	NC + 20% WGP + 13% CCR

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش فشاری محصورنشده

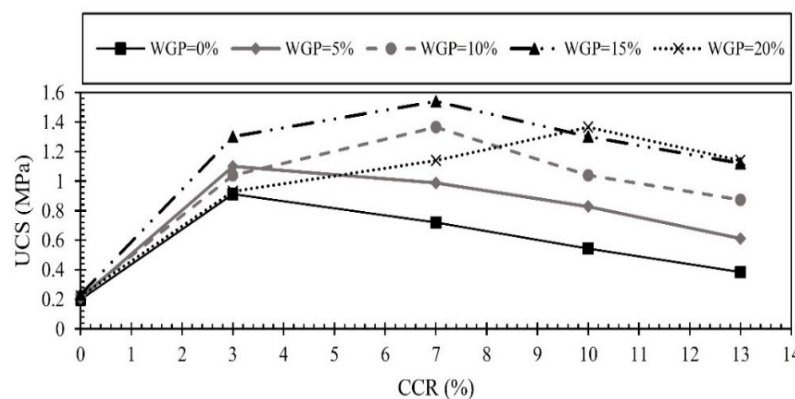
آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده به دلیل سادگی اجرا، هزینه پایین و قابلیت تکرارپذیری بالا، به عنوان یکی از روش های استاندارد و معتبر در ارزیابی رفتار مکانیکی خاک های تثبیت شده در پژوهش های ژئوتکنیکی مورد استقبال گسترده ای محققان قرار گرفته است. این آزمایش نه تنها اطلاعات اولیه ای درباره ی مقاومت فشاری و رفتار تنش-کرنش خاک ارائه می دهد، بلکه به عنوان شاخصی کارآمد برای تعیین نسبت های بهینه ی افزودنی های تثبیت کننده نیز عمل می کند.

در این پژوهش، این آزمایش با دو هدف اصلی انجام شد: اول، تعیین درصد های بهینه ی پودر شیشه ی زائد (WGP) و پسماند کلسیم کاربید (CCR) در ترکیب ژئوپلیمری؛ و دوم، مقایسه ی مستقیم عملکرد مکانیکی خاک رسی طبیعی (NC) با خاک تثبیت شده ی حاوی افزودنی های بهینه.

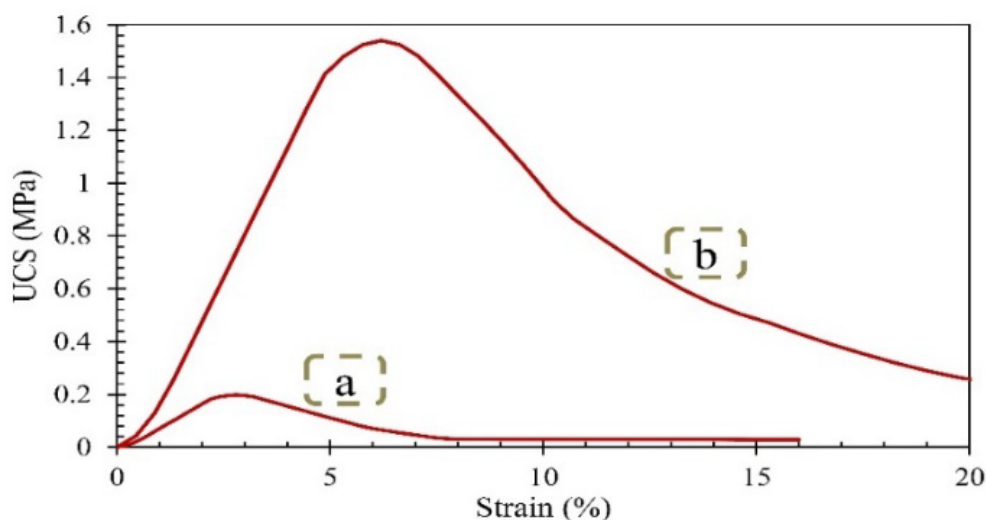
نتایج این آزمایش ها در شکل ۴ ارائه شده است، که در آن نقاط ماکزیمم مقادیر UCS (unconfined compressive strength) با برجسب مشخص شده اند. بر اساس این یافته ها، نمونه ای که حاوی ۱۵ درصد WGP و ۷ درصد CCR بود، بالاترین مقاومت فشاری محصورنشده را از خود نشان داد. این ترکیب به عنوان نسبت بهینه ی افزودنی ها در این مطالعه انتخاب گردید. مقاومت فشاری این نمونه بهینه نه تنها از سایر ترکیبات متمایز بود، بلکه در مقایسه با خاک رسی طبیعی (NC)، حدود ۸/۵ برابر افزایش یافت. این بهبود چشمگیر در مقاومت عمدتاً به تشکیل یک شبکه ی سه بعدی پایدار از ژل های ژئوپلیمری در فضای بین دانه ای خاک نسبت داده می شود. واکنش های پوزولانی و ژئوپلیمری در محیط قلیایی منجر به تولید ژل های ژئوپلیمری

می شوند. این محصولات واکنشی، سطح ذرات خاک را پوشانده، چسبندگی بین دانه ای را افزایش داده و ساختاری یکپارچه و سخت در ماتریس خاک ایجاد می کنند.

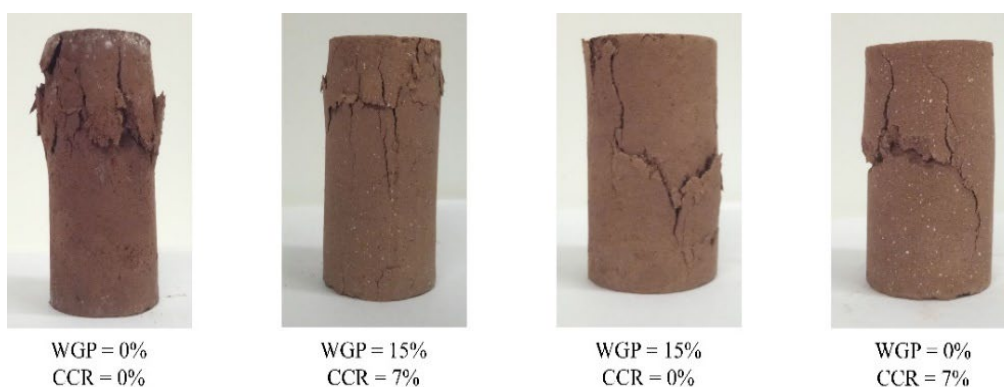
با این حال، استفاده از مقادیری فراتر از درصدهای بهینه ی WGP و CCR تأثیر معکوسی بر خواص مکانیکی خاک داشته است. مازاد WGP به دلیل ماهیت شیشه ای و غیرفعال خود در صورت عدم وجود فعال کننده ی کافی، به عنوان ذرات بی اثر و جدا از ماتریس ژئوپلیمری باقی ماند. این ذرات اضافی، علاوه بر کاهش وزن مخصوص خشک خاک، باعث اختلال در تماس مؤثر بین دانه ها و کاهش چسبندگی بین دانه ای شدند که در نهایت منجر به ضعف ساختاری و کاهش مقاومت نمونه ها گردید. از سوی دیگر، افزودن بیش از حد CCR، سبب افزایش شدید pH محیط خاک (به مقادیر بالای ۱۲) شد و محیطی بسیار قلیایی ایجاد کرد. چنین شرایطی نه تنها می تواند به مرور زمان به ساختار سیلیسی ذرات شیشه آسیب برساند (پدیده ی واکنش قلیایی-سیلیسی)، بلکه از ثبات بلندمدت خاک نیز می کاهد و در نتیجه، دوام و مقاومت مکانیکی نمونه ها را در طول زمان کاهش می دهد. برای تحلیل دقیق تر رفتار مکانیکی، منحنی های تنش-کرنش نمونه ی NC و نمونه ی بهینه ی تثبیت شده در شکل ۵ به صورت مقایسه ای نمایش داده شده اند. این نمودارها نشان می دهند که خاک تثبیت شده نه تنها مقاومت بیشتری دارد، بلکه رفتاری شکل پذیر با شکست تدریجی تر نسبت به خاک طبیعی از خود نشان می دهد. همچنین، تصاویر شکست چهار نمونه با ترکیبات مختلف افزودنی در شکل ۶ ارائه شده است که به خوبی الگوی ترک خوردگی، یکنواختی شکست و تأثیر ترکیب مواد بر مکانیزم گسیختگی را آشکار می سازد. این مشاهدات بصری همراه با داده های کمی، شواهد جامعی برای درک نحوه ی بهبود خواص ژئوتکنیکی از طریق فرآیند ژئوپلیمری ارائه می دهند.



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری برای نمونه های مختلف تثبیت شده



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش برای خاک رسی طبیعی (a) و نمونه تثبیت شده با مقادیر بهینه افزودنی (b)



شکل ۶. تصاویر شکست چهار نمونه خاک با مقادیر مختلف افزودنی

۳-۲- آزمایش برش مستقیم

منفی قابل توجهی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک دارند. در این پژوهش، تأثیر تثبیت کننده ژئوپلیمری بر رفتار برشی خاک و تحمل آن در برابر تغییرات حجمی ناشی از سیکل های یخبندان-ذوب مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) در جدول ۴ ارائه شده است.

آزمایش برش مستقیم به منظور ارزیابی مقاومت برشی خاک تحت شرایط سیکل های یخبندان-ذوب انجام شد. در فرآیند یخ زدگی، حجم آب حدود ۹٪ افزایش می یابد که منجر به گسترش فضا های منفذی در ماتریس خاک می شود. پس از ذوب یخ، این منافذ به طور کامل بازگشت نمی کنند و به عنوان تخلخل های دائمی باقی می مانند، که باعث ایجاد ترک ها و کاهش انسجام بین ذرات خاک می شوند. این تغییرات ساختاری تأثیر

جدول ۴. پارامترهای مقاومت برشی

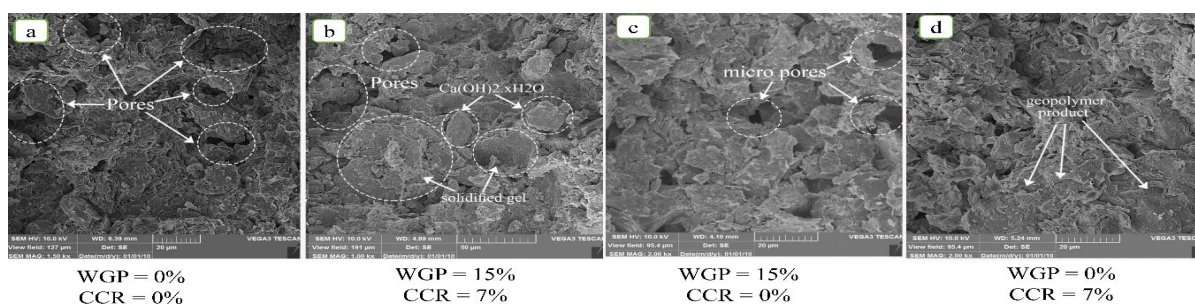
خاک رسی طبیعی WGP = 0% CCR = 0%		نمونه تثبیت شده بهینه WGP = 15% CCR = 7%		نمونه دارای فقط پودر شیشه WGP = 15% CCR = 0%		نمونه دارای فقط کلسیم کاربید WGP = 0% CCR = 7%	
c (kPa)	ϕ (Degree)	c (kPa)	ϕ (Degree)	c (kPa)	ϕ (Degree)	c (kPa)	ϕ (Degree)
۶۳	۲۰	۴۰۰	۳۵	۵۹	۳۰	۲۱۶	۲۸

می‌کنند. همچنین، در نمونه حاوی فقط کلسیم کاربید (بدون WGP)، چسبندگی به ۲۱۶ kPa افزایش یافت که نشان‌دهنده واکنش محدود پوزولانی Ca(OH)_2 موجود در CCR با مواد سیلیسی خاک است.

۳-۳-۳ مطالعات ریز ساختمانی

۳-۳-۳-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های خاکی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل ۷ ارائه شده است. این تصاویر بینش عمیقی در مورد تحولات ریز ساختمانی ناشی از تثبیت با ترکیبات نوین — شامل پودر شیشه (WGP)، کلسیم کاربید باقیمانده (CCR) و ترکیب بهینه آنها — فراهم می‌کنند.

نتایج نشان داد که تأثیر ژئوپلیمر بر چسبندگی بارزتر از تأثیر آن بر زاویه اصطکاک داخلی بود. در نمونه بهینه، چسبندگی به حدود ۶/۳ برابر مقدار خاک طبیعی رسید که این بهبود عمدتاً ناشی از تشکیل شبکه سه‌بعدی ژئوپلیمری و ایجاد پیوندهای شیمیایی پایدار بین ذرات خاک است. همزمان، افزایش ϕ نیز مشاهده شد که ناشی از بهبود چیدمان ذرات و کاهش فاصله بین آنها در اثر واکنش‌های پوزولانیک است. در مقابل، در نمونه حاوی صرفاً پودر شیشه، ساختار دانه‌های زاویه‌دار این ماده باعث بهبود قفل‌شدگی مکانیکی و در نتیجه افزایش ϕ شد. با این حال، عدم واکنش‌پذیری شیمیایی پودر شیشه با ماتریس رسی و نقش آن به‌عنوان یک پرکننده بی‌اثر، منجر به کاهش چسبندگی نسبی شد، زیرا ذرات شیشه تمایل به ایجاد فواصل بین دانه‌های رسی داشته و شبکه انسجامی خاک را تضعیف



شکل ۷. تصاویر SEM 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)

ترکیبات ژئوپلیمری C-S-H (کلسیم-سیلیکات-هیدرات)، C-A-H (کلسیم-آلومینات-هیدرات) و به‌ویژه C-A-S-H (کلسیم-آلومینو-سیلیکات-هیدرات) است. این ترکیبات نقش اصلی را در ایجاد پیوند بین ذرات و بهبود مقاومت مکانیکی ایفا می‌کنند. این شبکه‌های ژئوپلیمری، ذرات خاک را به یک ساختار یکپارچه تبدیل می‌کنند که باعث افزایش چسبندگی (c) از طریق پرشدن منافذ و ایجاد پیوندهای شیمیایی، کاهش تخلخل موثر و بهبود تراکم، افزایش تماس سطحی بین ذرات و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می‌شود. همچنین، این ساختار متراکم، راه‌های نفوذ آب و گسترش بلورهای یخ را محدود کرده و مقاومت خاک در برابر سیکل‌های یخ‌زدان-ذوب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

(c) : نمونه تثبیت شده فقط با پودر شیشه

در نمونه حاوی صرفاً ۱۵٪ پودر شیشه (شکل ۷c)، هیچ شبکه ژئوپلیمری واضحی مشاهده نمی‌شود. این به دلیل عدم وجود عامل فعال‌کننده قلیایی مثل Ca(OH)_2 موجود در CCR است

(a) : خاک رسی طبیعی

در نمونه خاک رسی طبیعی (شکل ۷a)، ساختار ذرات به‌وضوح سست، لایه‌ای و ناهمگن است. ذرات رس عمدتاً به صورت لایه‌های موازی قرار گرفته‌اند و تماس نقطه‌ای ضعیفی بین آنها وجود دارد. هیچ شبکه چسبندگی یا محصول سیمانی مشاهده نمی‌شود. این ساختار بافتی باعث پایین بودن مقاومت برشی و بالا بودن متراکم‌ناپذیری می‌شود و آسیب‌پذیری ذاتی خاک را در برابر عوامل محیطی مانند سیکل‌های یخ‌زدان-ذوب تشدید می‌کند.

(b) : نمونه تثبیت شده بهینه

در نمونه حاوی ۱۵٪ پودر شیشه و ۷٪ کلسیم کاربید (شکل ۷b)، تحول ریز ساختمانی چشمگیری مشاهده می‌شود. ساختار اولیه لایه‌ای کاملاً دگرگون شده و جای خود را به یک ماتریس متراکم، همگن و توده‌ای داده است. محصولات هیدراتاسیون و پوزولانی به‌صورت شبکه‌های سه‌بعدی متصل در فضاها بین ذرات ظاهر شده‌اند. الگوهای ریز ساختمانی حاکی از تشکیل

(به عنوان پیش ماده پوزولانی) است. در نتیجه، ترکیبات C-S-H و C-A-S-H به صورت نقاط پراکنده و لایه های نازک تشکیل شده اند که ساختار را متراکم تر از خاک طبیعی کرده اند. با این حال، به دلیل محدودیت مقدار سیلیس فعال، شبکه گسترده ای تشکیل نمی شود و بهبود حاصل نسبت به نمونه بهینه محدود است. نتایج SEM به وضوح نشان می دهند که ترکیب پودر شیشه (منبع سیلیس فعال) و کلسیم کاربید (منبع قلیا و کلسیم)، به عنوان یک سیستم ژئوپلیمری، قادر است شبکه های سه بعدی متراکم و پایداری تشکیل دهد که هر دو مؤلفه مقاومت برشی (c و ϕ) را بهبود می بخشد. این تحول از ساختار لایه ای به ساختار توده ای، مبنای اصلی بهبود پایداری بلندمدت خاک است. در مقابل، استفاده از هر یک از این مواد به تنهایی تنها بهبود جزئی ایجاد می کند و نیاز به ترکیب آنها برای دستیابی به عملکرد بهینه ضروری است.

که برای شروع واکنش پوزولانی ضروری است. بنابراین، پودر شیشه به عنوان یک ماده بی اثر عمل می کند. با این حال، ذرات زاویه دار پودر شیشه به عنوان یک پرکننده بین ذرات رس عمل کرده و با ایجاد اصطکاک بیشتر و بهبود قفل شدگی مکانیکی، کمی به تراکم خاک کمک می کنند. این موضوع تا حدی باعث بهبود ϕ می شود، اما بدون تشکیل پیوند شیمیایی، چسبندگی (c) بهبود چندانی نمی یابد و حتی ممکن است به دلیل اختلال در شبکه رسی کاهش یابد.

(d) : نمونه تثبیت شده فقط با کلسیم کاربید

در نمونه حاوی ۷٪ کلسیم کاربید (شکل Vd)، اگرچه پودر شیشه وجود ندارد، اما محصولات پوزولانی محدودی تشکیل شده اند. این به دلیل آزاد شدن Ca^{2+} و OH^- از CCR در محیط مرطوب و واکنش آن با سیلیس و آلومینای موجود در خود ذرات رس

۳-۳-۲- آنالیز طیف سنجی EDX

طیف های EDX نمونه های خاکی پس از ۲۸ روز عمل آوری در چهار نوع مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به تأثیر قابل توجه تشکیل ژئوپلیمر بر بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی نتایج EDX به عنوان شاخص کیفی برای بررسی و تأیید تشکیل ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفت. طیف ها حضور عناصر اصلی اکسیژن (O)، سیلیسیم (Si)، کلسیم (Ca)، آلومینیوم (Al) و عناصر فرعی مانند منیزیم (Mg)، پتاسیم (K) و آهن (Fe) را نشان می دهند. بر اساس مطالعات پیشین، حضور Si، Al و Ca شرایط لازم برای تشکیل ژئوپلیمرهایی مانند ژل های C-S-H، C-A-H و C-A-S-H را فراهم می کند. همچنین، نسبت Si/Al به عنوان معیاری کلیدی برای اثبات تشکیل محصولات ژئوپلیمری مورد

استفاده قرار می گیرد. معمولاً در خاک های رسی، این نسبت بین ۱ تا ۳ است و هرچه به ۳ نزدیک تر باشد، شرایط برای تشکیل ژئوپلیمر بهتر است. نسبت Si/Al برای نمونه های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. در خاک رسی طبیعی کمترین نسبت (Si/Al) بوده است که تأیید کننده عدم تشکیل ژئوپلیمر است. در نمونه تثبیت شده با مقادیر بهینه (b)، بیشترین نسبت (Si/Al) بوده است که نشان دهنده تشکیل بهتر ژل ژئوپلیمری است. در نمونه تثبیت شده با فقط پودر شیشه (c)، نسبت (Si/Al) بالا بوده است اما ژئوپلیمر تشکیل نشده است که دلیل آن عدم حضور فعال کننده قلیایی است.

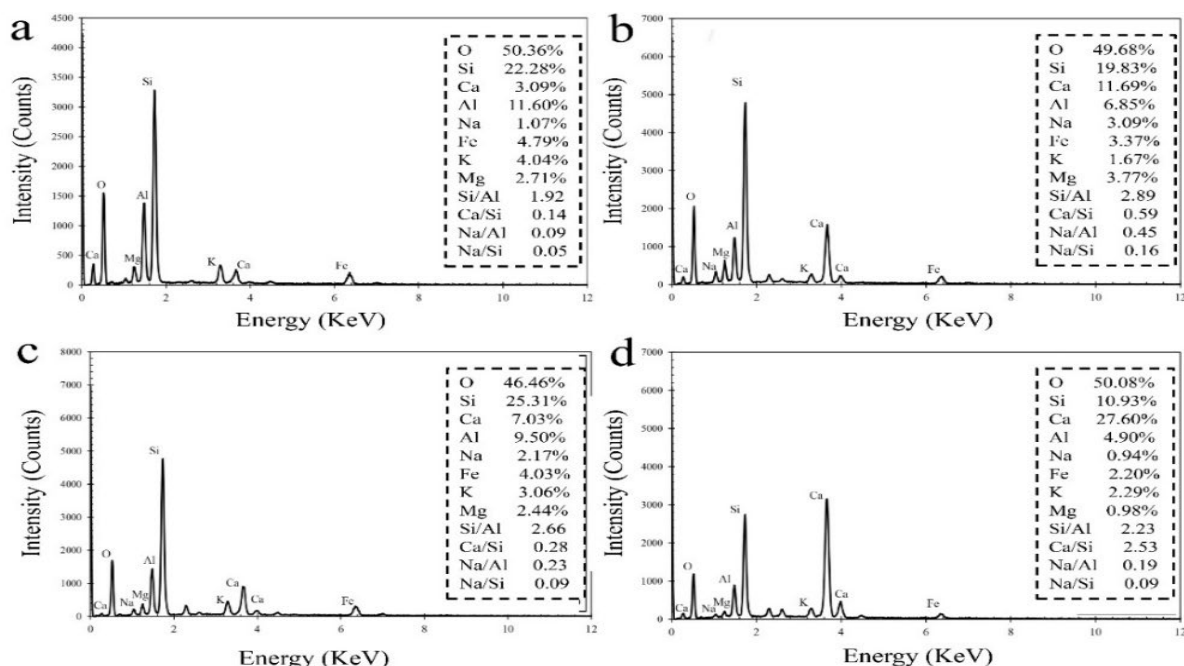
۳-۳-۳ آزمایش BET

هدف از این بخش، ارزیابی تأثیر افزودنی ها بر سطح ویژه، حجم کل منافذ و قطر متوسط منافذ خاک بود. نتایج آزمون BET برای چهار نوع نمونه خاکی پس از ۲۸ روز عمل آوری در شکل ۹ ارائه شده است. بیشترین کاهش سطح ویژه مربوط به نمونه شماره ۲ (نمونه تثبیت شده) با مقادیر بهینه است که به دلیل تشکیل شبکه های ژئوپلیمری و ایجاد واحدهای بزرگ تر از ذرات خاک رخ داده است. کمترین حجم کلی منافذ مربوط به همین نمونه است و بیشترین آن مربوط به نمونه شماره ۱ است. به عبارت دیگر، تشکیل ژئوپلیمر منجر به کاهش حجم تخلخل

شده است. قابل توجه است که هرچه حجم کلی منافذ کمتر باشد، مقاومت فشاری تک محوره خاک بیشتر است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، تشکیل ژل ژئوپلیمری منجر به افزایش قطر متوسط منافذ شده است. این یافته در نگاه اول غیرمنتظره است، اما دلیل آن تجمع ذرات ریز و تشکیل واحدهای بزرگ تر در فرآیند ژئوپلیمری است. در این فرآیند، حجم کلی منافذ کاهش می یابد، اما قطر متوسط منافذ افزایش یافته است. نتایج BET تأیید می کنند که تشکیل ژئوپلیمر از طریق واکنش پوزولانی پودر شیشه و کلسیم کاربید، منجر به

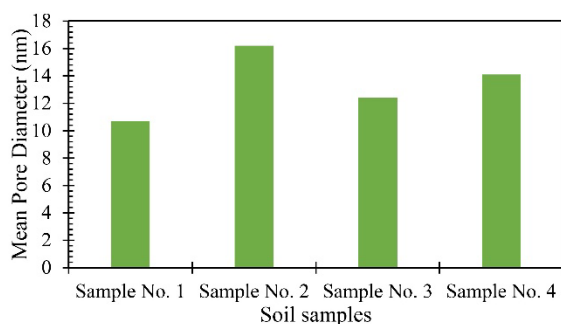
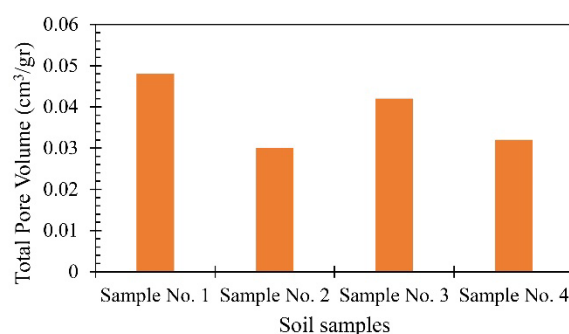
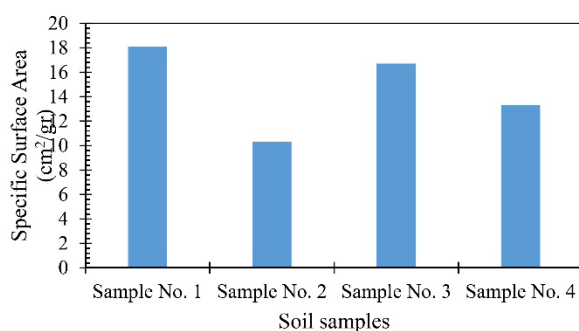
سیکل های یخبندان-ذوب شده اند. این یافته ها همخوانی کاملی با نتایج SEM و EDX دارند و چارچوبی یکپارچه از رابطه بین ترکیب شیمیایی، ریزساختار و رفتار ژئوتکنیکی ارائه می دهند.

کاهش چشمگیر سطح ویژه و حجم کل منافذ، تغییر توزیع منافذ به سمت قطره های بزرگ تر (به دلیل تجمع ذرات و تشکیل ساختار توده ای) و در نهایت، بهبود مقاومت مکانیکی و پایداری در برابر



شکل ۸. طیف های 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)



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%

شکل ۹. تأثیر افزودنی های پودر شیشه و پسماند کلسیم کاربید بر سطح ویژه، حجم کل منافذ و قطر متوسط منافذ خاک

۵- نتیجه گیری

این تحول از "ذره‌ای" به "توده‌ای"، پایه اصلی بهبود مقاومت مکانیکی و پایداری است.

-با توجه به آنالیز طیف سنجی EDX، نسبت (Si/Al)، فاکتوری کلیدی برای تأیید تشکیل ژئوپلیمر در خاک بوده است. وجود پودر شیشه در خاک به تنهایی منجر به تشکیل ژئوپلیمر در خاک نشده است ولی وجود پسماند کلاسیم کاربرد به تنهایی منجر به تشکیل ژئوپلیمر شده است.

-نتایج آزمون BET به وضوح تأیید می‌کنند که تشکیل ژئوپلیمر با مواد بازیافتی منجر به کاهش چشمگیر حجم کل منافذ و کاهش سطح ویژه می‌شود. این کاهش نشان‌دهنده پرشدن منافذ میکرو و افزایش تراکم خاک است. هرچند قطر متوسط منافذ افزایش یافت که ناشی از تجمع ذرات خاک است. اما کاهش حجم کلی، منجر به بهبود مقاومت می‌شود.

-از دیدگاه زیست‌محیطی و اقتصادی، این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از پودر شیشه زائد و پسماند کلاسیم کاربرد نه تنها خواص ژئوتکنیکی خاک را بهبود می‌بخشد، بلکه با بازیابی ضایعات صنعتی، از مسائل زیست‌محیطی مرتبط با انباشت این مواد می‌کاهد. بنابراین، این رویکرد دوگانه — تثبیت خاک + مدیریت پسماند — یک راهکار هوشمند و پایدار برای مهندسی ژئوتکنیک و تثبیت بستر رسی راه محسوب می‌شود.

نتایج این مطالعه به طور جامع نشان می‌دهند که استفاده ترکیبی از ضایعات شامل پودر شیشه زائد (WGP) و پسماند کلاسیم کاربرد (CCR) می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر، پایدار و کم هزینه در تثبیت بستر رسی راه عمل کند. مهم ترین یافته‌ها به شرح زیر هستند.

-نمونه بهینه حاوی ۱۵٪ پودر شیشه و ۷٪ پسماند کلاسیم کاربرد بیشترین بهبود در مقاومت فشاری تک محوره (UCS) را نشان داد، به طوری که UCS آن به ۸/۵ برابر مقدار خاک رسی طبیعی رسید. این افزایش قابل توجه ناشی از تشکیل شبکه متراکم محصولات ژئوپلیمری در ساختار خاک است.

-در ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی، نمونه بهینه به وضوح عملکرد برتری داشت. چسبندگی (c) به ۶/۳ برابر و زاویه اصطکاک داخلی (φ) به ۱/۷ برابر مقدار خاک طبیعی افزایش یافت. این بهبود دوگانه نشان‌دهنده تأثیر همزمان ژئوپلیمر بر چسبندگی شیمیایی (از طریق تشکیل ژل) و مقاومت اصطکاکی (از طریق تراکم و بهبود تماس ذرات) است.

-تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) شواهد مستقیمی از تحول ریز ساختاری در نمونه‌های تثبیت شده ارائه می‌دهند. در حالی که خاک طبیعی ساختاری سست و لایه‌ای دارد، نمونه بهینه دارای یک ماتریس متراکم، همگن و توده‌ای است که نشان‌دهنده تشکیل شبکه سه بعدی ژئوپلیمری است.

۶- مراجع

Hydroxide Concentration and Alkaline Activator Ratio. *In Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. Vol. 2989, No. 1, 012038.

-El-Habacha, M., Lagdali, S., Dabagh, A., Mahmoudy, G., Assouani, A., Benjelloun, M., & Zerbet, M. (2024). High efficiency of treated-phengite clay by sodium hydroxide for the Congo red dye adsorption: optimization, cost estimation, and mechanism study. *Environmental Research*, 259, 119542.

-Hosseini, S. E., Tabarsa, A., & Bahman Pour, A. (2022). Experimental study of subgrade soil stabilized with geopolymer based on glass powder and calcium carbide. *Road Materials and Pavement Design*, 1-16.

-Jamalimoghadam, M., & Bahmyari, H. (2023). Freeze-Thaw Characteristics of Slaking Marl Clay Stabilized with a Binder Based on Alkali-Activated Recycled Glass Powder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(11), 04023394.

-Kavyani, Z., Ghorbanzadeh, N., Etesami, H., & Khalili Rad, M. (2025). Lead Immobilization in Contaminated Soil Through Phosphate

-Aswad, M. F., Al-Gharbawi, A. S., Fattah, M. Y., Mustfa, R. H., & Hameed, H. R. (2024). Improvement of clayey soil characteristics using poly acrylamide geopolymer. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(4), 1673-1690.

-Chen, Z., Gao, Y., Wei, W., Lv, Y., & Wu, Z. (2023). Stabilization of Soft Clay by a Low-Calcium Fly Ash Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(11), 04023398.

-Contreras, R. R., Almarza, J., Rincon, L., & Ruiz, C. (2024). Green sodium hydroxide for industrial purposes. A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 114972.

-Deng, T., Liu, H., Ni, J., Ke, H., Li, L., & Deng, Y. (2025). Pb2+ Leachability in the Cement-Based Solidified/Stabilized Contaminated Clay Under Saline and Alkaline Environments. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 34(2), 276-290.

-Diana, W., Ma'rifah, R. A., & Hartono, E. (2025). The Tensile Strength of Marine Sand Using Fly Ash-Based Geopolymer: Influence of Sodium

Resources, Conservation and Recycling, 179, 106145.

-Silva, A. C. P. D., Rodrigues, K. H. D. P., Nalon, G. H., Pitanga, H. N., Silva, N. A. B., Silva, T. O. D., & Rodrigues, M. H. R. (2025). Mechanical Behavior of Geopolymers Containing Soil and Red Mud Stabilized by Alkali Activation. *Buildings*, 15(17), 3105.

-Tabaroei, A., & Bozorgvar, F. (2025). Mechanical and microstructural enhancement of clayey soils through recycled glass powder stabilization. *Scientific Reports*, 15(1), 36702.

-Wang, D., Sun, Q., Pu, Y., Wang, J., Xu, X., & Zhan, M. (2025). Characteristics and Predictive Analysis of Heavy Metal Pollution in Typical Municipal Solid Waste Landfill Soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 1-20

-Wassie, T. A., & Demir, G. (2024). Mechanical Strength and Microstructure of Soft Soil Stabilized with Cement, Lime, and Metakaolin-Based Geopolymer Stabilizers. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), 6613742.

-Zhong, W. L., Zhang, Y. H., & Fan, L. F. (2023). High-ductile engineered geopolymer composites (EGC) prepared by calcined natural clay. *Journal of Building Engineering*, 63, 105456.

-Zhou, Y., et al. (2020). Carbide slag-based geopolymers: Synthesis, properties and applications. *Materials & Design*, 195, 108998.

Bioprecipitation with Immobilized Bacteria on Biochar Surface. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 1-18.

-Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*, 15(19), 6852.

-Miraki, H., Shariatmadari, N., Ghadir, P., Jahandari, S., Tao, Z., & Siddique, R. (2022). Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 576-591.

-Premathilaka, K. K. W., Liyanapathirana, D. S., & Leo, C. J. (2026). A Novel Geopolymer-Based Composite Material from Recycled Waste Glass. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 38(3), 04025584.

-Pu, Y., Sun, Q., Yang, J., Wang, H., Xu, X., Wang, J., & Zhan, M. (2024). "Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in the soil of a municipal solid waste landfill site. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 1-18.

-Ramezani, S. J., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2023). Utilization of glass powder and silica fume in sugarcane bagasse ash-based geopolymer for soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023042.

-Siddika, A., Hajimohammadi, A., & Sahajwalla, V. (2022). Stabilization of pores in glass foam by using a modified curing-sintering process: sustainable recycling of automotive vehicles' waste glass.

Sustainable Stabilization of Roadbed Clay Soils Using Geopolymer Derived from Waste Glass Powder and Calcium Carbide Residue: An Environmentally Friendly Approach

*Seyed Ali Mortazavi Ravari, Ph.D., Grad., Civil Engineering Department,
Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Seyed Morteza Marandi, Professor of Civil Engineering Department, Shahid Bahonar
University of Kerman, Kerman, Iran.*

E-mail: seyedali.mortazavi@eng.uk.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

In recent years, the use of industrial and municipal waste materials in stabilizing problematic soils—particularly clayey roadbeds—has emerged as a sustainable and environmentally friendly strategy in geotechnical engineering. Clay soils exhibit unfavorable characteristics such as high swell potential, significant settlement, low bearing capacity, and moisture sensitivity, posing serious challenges to sustainable road construction. Conventional soil stabilization methods, including the use of cement and lime, are not only costly but also contribute significantly to energy consumption and greenhouse gas emissions—especially CO₂—making them less compatible with sustainable development principles. In this context, recycling solid urban and industrial wastes serves not only as an intelligent alternative to traditional binders but also as an effective step toward reducing waste volume, conserving natural resources, and advancing the circular economy. This study investigates the application of a geopolymer system combining waste glass powder (WGP)—a silica-rich urban waste—and calcium carbide residue (CCR)—a by-product of acetylene gas production—for the stabilization of clay soil. A series of geotechnical tests and microstructural analyses were conducted to evaluate the performance of this composite. Results showed that soil samples stabilized with 15% WGP and 7% CCR exhibited the highest improvement in mechanical properties. Microscopic analyses confirmed the formation of geopolymeric gels (C-A-S-H and C-S-H), which enhanced structural densification and reduced effective porosity. This research holds dual significance: from both a technical-mechanical and an environmental-waste management perspective, as the synergistic use of these two wastes simultaneously addresses geotechnical challenges of soft clay stabilization and environmental concerns related to waste disposal. Therefore, the findings of this study can pave the way for broader utilization of waste-derived materials in sustainable, low-carbon infrastructure projects.

Keywords: Roadbed Clay, Waste Glass Powder, Calcium Carbide Residue, Geopolymer, Waste Materials