



مقایسه اثرات دو نوع حلال قلیایی کاربرد کلسیم پسماند و هیدروکسید سدیم بر تثبیت ژئوپلیمری خاک‌های رسی

میثم پورعباس بیلندی^{۱*}، محمد محسن توفیق^۲، وحید توفیق^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

پودر شیشه

کاربرد کلسیم پسماند

هیدروکسید سدیم

حلال قلیایی

ژئوپلیمر

خلاصه: تولید سیمان به دلیل مصرف مقادیر زیاد سوخت‌های فسیلی و انتشار میزان بالای گازهای گلخانه‌ای پیامدهای زیست‌محیطی فراوانی به دنبال دارد. این امر محققان را وادار به پژوهش و معرفی دسته جدیدی از چسباننده‌ها با کارایی بیشتر و آلاینده‌گی بسیار کمتر نسبت به سیمان پرتلند تحت عنوان سیمان‌های ژئوپلیمری یا سیمان‌های سبز نموده است. در این پژوهش تأثیر استفاده از دو نوع حلال قلیایی متفاوت: هیدروکسید سدیم و کاربرد کلسیم پسماند، برای تثبیت ژئوپلیمری خاک رسی CL مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا ترکیبات شیمیایی خاک، پودر شیشه، کاربرد کلسیم پسماند و هیدروکسید سدیم توسط آزمایش XRF تعیین گردید. سپس رفتار مکانیکی نمونه‌های مختلف تثبیت شده ژئوپلیمری، نمونه‌های حاکی تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند معمولی توسط آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر پارامترهایی همچون نوع و غلظت حلال قلیایی و زمان عمل‌آوری (۲۸، ۹۱ و روز) بر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مطالعه تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها از تصاویر SEM و آنالیز EDX بهره گرفته شده است. نتایج تحقیق حاکی از تثبیت مؤثر ژئوپلیمری خاک با استفاده از هر دو نوع حلال قلیایی بوده است. البته با توجه مزایای کاربرد کلسیم پسماند شامل: هزینه تهیه بسیار کم، بازیافتی بودن و همچنین راندمان بالاتر در فرآیند تثبیت، استفاده از این حلال قلیایی از دیدگاه اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی ارجحیت بیشتری دارد.

۱- مقدمه

کننده‌های محیط زیست به شمار می‌آید. در فرآیند تولید سیمان پرتلند، میزان انرژی مصرفی بسیار بالا می‌باشد (حدود ۴ گیگاژول برای تولید هر تن سیمان) که این امر از یک سو باعث بالا رفتن هزینه‌های تولید شده و از سوی دیگر میزان آلاینده‌گی آن را بسیار بالا می‌برد. تحقیقات نشان داده است که در فرآیند تولید این محصول، به ازاء تولید هر یک تن سیمان حدود یک تن گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌گردد. این امر سبب گردیده صنعت تولید سیمان به تنهایی حدود ۵ تا ۸ درصد از آلودگی ناشی از گاز دی‌اکسید کربن جهان را به خود اختصاص دهد [۲]. در نتیجه این صنعت در زمره صنایع بسیار آلوده کننده محیط زیست قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، گاز دی‌اکسید کربن بیشترین تأثیر را در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد که باعث تغییرات شدید آب و هوایی و افزایش دمای کره زمین می‌گردد. همچنین گرد و غبار ناشی از فرآیند آسیاب کردن مواد اولیه و به طور مشخص انتشار ذرات ریزتر از ۱۰ میکرون سبب بروز آسیب‌های بهداشتی فراوان برای سلامت

استفاده از سیمان یکی از روش‌های مرسوم در بهسازی و بهبود ظرفیت باربری، کنترل نشست و نیز بهسازی لزه‌ای خاک‌های مسئله‌دار است. معمولاً خاک محل احداث، خصوصیات مکانیکی لازم برای نیازهای پروژه را برآورده نمی‌کند. خاک رس نیز به دلیل ساختار لایه‌ای و ویژه‌ای که دارا می‌باشد می‌تواند منشاء بسیاری از ضعف‌ها و مشکلات در خاک ساختمانی یک منطقه باشد، لذا باید با اعمال تغییراتی این خصوصیات را اصلاح نمود. یکی از قدیمی‌ترین روش‌های اصلاح خاک، بهسازی با استفاده از سیمان پرتلند بوده است. مطالعات آزمایشگاهی فراوانی بر روی تأثیر تثبیت خاک‌های مسئله‌دار توسط سیمان انجام گردیده است که پژوهش آقای Lo- renzo و همکاران از جمله آن می‌باشد [۱]. سیمان رایج که با نام رسمی سیمان پرتلند معمولی (OPC) استفاده می‌شود، یکی از جدی‌ترین آلوده

1 Ordinary Portland Cement

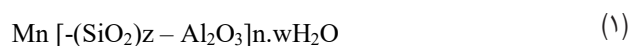
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: MPoorabbas64@gmail.com



کوره آهن و فولاد، متاکائولین و پودر شیشه بازیافتی (RGP) [۲۴-۲۰]. همه ساله حدود ۱۰ میلیون تن شیشه ضایعاتی در شهرهای بزرگ دنیا تولید می‌گردد که حدود ۳ تا ۵ درصد وزنی زباله‌های خانگی است [۲۵]. استفاده از ضایعات شیشه در تولید ژئوپلیمر نیز یک تکنولوژی جدید است که اخیراً در کارهای عمرانی مورد توجه قرار گرفته است. صباغ و توفیق (۱۳۹۸) در پژوهش خود به بررسی اثرات تثبیت ژئوپلیمری خاک‌های ماسه‌ای پرداخته‌اند. در پژوهش آن‌ها از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی تفتان برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده گردید. همچنین در این مطالعه سعی شد تا از خواص شیمیایی پودر شیشه به عنوان یک ماده ضایعاتی برای جایگزینی پوزولان طبیعی تفتان استفاده گردد. محلول فعال کننده مورد استفاده در پژوهش آن‌ها دو نوع بوده است. نوع اول ترکیب هیدروکسید سدیم و سدیم سیلیکات مایع و نوع دوم شامل غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم [۲۶]. پودر شیشه‌های به دست آمده از زباله‌های شهری معمولاً دارای مواد آمورف با ترکیبات متفاوتی همچون: SiO_2 ، CaO ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و Na_2O می‌باشند [۳۰-۲۷]. لذا در این پژوهش از پودر شیشه بازیافتی به دلیل داشتن خواص قلیایی و محتوی سیلیکاتی، به عنوان ماده پایه ژئوپلیمر با مقدار ثابت (RGP=9%) بهره برده شده است. از دیگر فاکتورهای موثر بر رفتار ژئوپلیمرها می‌توان به تاثیرات نوع و غلظت حلال قلیایی اشاره نمود. به منظور تهیه محلول قلیایی عموماً از موادی همچون هیدروکسید سدیم (NaOH)، ترکیب هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم، هیدروکسید پتاسیم و در پاره‌ای از موارد از پسماند کاربید کلسیم استفاده می‌گردد. این مواد دارای pH بالا بوده و زمانی که در آب حل می‌گردند می‌توانند محیط قلیایی مناسبی را برای انحلال ذرات آلمینو سیلیکاتی فراهم نمایند [۳۲ و ۳۱].

الوفوبی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۴، جهت تعیین خواص ژئوتکنیکی خاک‌های رس تثبیت شده با پودر شیشه، مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند [۳۳]. تاثیرات مثبت استفاده از پودر شیشه در بهبود مشخصات خاک در حوزه‌های مختلف ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار گرفته است، به عنوان مثال جولی^۴ و همکاران ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی تاثیرات پودر شیشه در بهبود مشخصات مقاومتی خاک رس با نگرش استفاده در تثبیت خاک بستر راه پرداختند. در این پژوهش از مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد پودر شیشه استفاده و برای کنترل اثر آن بر رفتار خاک، از تست‌های برش مستقیم و نسبت باربری

ساکنین نزدیک کارخانه‌های تولید سیمان می‌گردد. علاوه بر موارد فوق، باید به این نکته نیز اشاره نمود که برای تولید هر تن سیمان پرتلند حدود ۲ تن مواد خام اولیه مصرف می‌گردد که این مسئله می‌تواند برای ذخایر معدنی کشور نامناسب باشد. یکی از بهترین جایگزین‌های سیمان پرتلند، استفاده از ژئوپلیمرها می‌باشد. سیمان ژئوپلیمری یا سیمان سبز ترکیبی از مصالح ژئولوژی طبیعی شامل سیلیکات و آلومینا می‌باشد که به واسطه افزودن فعال کننده‌های قلیایی به آن‌ها، فرآیند ژئوپلیمریزاسیون صورت گرفته و از این جهت ژئوپلیمر نامیده می‌شود [۳]. این مواد برای اولین بار توسط محقق فرانسوی پروفیسور دیویدوتس^۱ در سال ۱۹۷۲ معرفی شدند [۴]. فرمول کلی ژئوپلیمرها به صورت زیر می‌باشد (معادله ۱):



در این رابطه M کاتیون قلیایی است و n درجه بسپارش تراکمی و Z نسبت Si/Al که معمولاً $z=1-15$ و مقدار آب ساختاری می‌باشد [۵ و ۶]. مطالعات بسیاری در خصوص مزایا و کارایی ژئوپلیمرها در زمینه‌های مختلف انجام شده است. محققان رشته مهندسی عمران نیز از این قاعده مستثنی نبوده و کاربرد ژئوپلیمرها در کارهای عمرانی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۷-۱۰]. در سالیان اخیر نیز تحقیقات بر روی استفاده از انواع سیمان‌های ژئوپلیمری به منظور بهسازی خاک‌ها انجام گرفته است که نتایج این پژوهش‌ها بیان کننده کارایی بسیار مفید این مواد در بهبود رفتارهای مقاومتی خاک‌های مسئله‌دار بوده است [۱۹-۱۱] البته مطالعه تاریخیچه مروری به خوبی نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام شده بر روی اصلاح خاک‌ها توسط ژئوپلیمرها، به خصوص در کشور ایران بسیار محدود بوده است. این امر بیان کننده لزوم انجام تحقیقات بیشتر و کامل‌تر در این حوزه و به خصوص بر روی خاک‌های مسئله‌دار کشور ایران می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر امکان بهسازی خاک‌های رسی با پلاستیسیته پایین (CL)، واقع در شهر کرمان، مورد مطالعه قرار گرفته است.

لازم به ذکر است نوع و مقدار مواد پایه مصرفی، بر روی خواص مقاومتی، فیزیکی و شیمیایی تولیدات ژئوپلیمری تاثیر فراوان دارند. بعضی از مواد رایج استفاده شده به عنوان پایه ژئوپلیمرها عبارتند از: خاکستر کوره زغال سنگ، خاکستر آتشفشانی، خاکستر پوسته برنج، سرباره و باطله‌های

1 Davidovits

2 Recycled Glass Powder
3 Olufowobi
4 Jolly

تیگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸) امکان تثبیت خاک توسط ژئوپلیمر بر پایه خاکستر زغال سنگ-خاکستر آتشفشانی^{۱۲} را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از ترکیب هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم و آلومینا سدیم برای تهیه حلال قلیایی استفاده گردید [۴۰].

با توجه به سابقه محدود استفاده از هر دو حلال قلیایی کاربرد کلسیم پسماند (CCR) و هیدروکسید سدیم، این دو ماده به طور مجزا به عنوان حلال قلیایی در این پژوهش استفاده شده‌اند. همچنین تاثیر نوع و غلظت هر یک از این فعال‌سازهای قلیایی بر رفتار نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری بر پایه پودر شیشه بازیافتی بررسی گردیده است. به منظور ارزیابی رفتار مقاومتی نمونه‌های تثبیت شده و شاهد، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری انجام شده است. همچنین به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها نیز، از تصاویر SEM و آنالیز EDX استفاده گردیده است.

۲- مصالح و روش‌ها

۲-۱- خاک

خاک مورد مطالعه در این پژوهش از سایت دانشگاه شهید باهنر کرمان (طول جغرافیایی ۳۰/۲۵۲۲ درجه، عرض جغرافیایی ۵۷/۱۰۵۵ درجه، با ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح آزاد دریا) و از عمق پنج متری تهیه گردید است. بر روی این خاک آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D422 انجام گردیده [۴۱]. شکل شماره ۱ نمودار دانه‌بندی خاک، پودر شیشه و کاربرد کلسیم پسماند استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

بر اساس آزمایش حدود آتربرگ (ASTM D4318-00) که بر روی خاک عبوری از الک نمره ۴۰ انجام گردید [۴۲]، خاک دارای نشانه خمیری (PI) برابر ۱۰٪ و حد روانی (LL) برابر ۳۰٪ می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی، آزمایش حدود آتربرگ و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک مورد استفاده در این پژوهش در دسته خاک‌های رسی با حد روانی کم (CL) قرار می‌گیرد [۴۳]. این خاک بخش اعظمی از خاک بستر بسیاری از پروژه‌های عمرانی شهر کرمان را تشکیل می‌دهد، این در حالی است که این نوع خاک معمولاً بسیار نرم و ضعیف بوده و برای تحمل بارهای فوقانی ناشی از وزن سازه‌ها، باربری بسیار پایینی دارد. لذا این نوع خاک به منظور بررسی اثرات تثبیت با مواد ژئوپلیمری در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

کالیفرنیا (CBR) استفاده شد [۳۴]. کاناک^۱ و همکاران (۲۰۱۶) اثرات استفاده از پودر شیشه بازیافتی تهیه شده از بطری‌های شیشه‌ای دور ریز، را در فرایند تثبیت خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌های این پژوهش استفاده از این ضایعات موجب بهبود خصوصیات مهندسی خاک رس، و اثرات مثبت بر میزان رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک در فرایند تراکم و همچنین افزایش مقادیر CBR خاک گردیده است [۳۵]. همچنین اثرات استفاده از پودر شیشه در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک سست بستر پی‌ها توسط سیاب خان^۲ و همکاران (۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر افزودنی در این پژوهش ۴، ۸ و ۱۲ درصد پودر شیشه بوده و تست‌های انجام شده شامل، CBR، برش مستقیم، تراکم و حدود آتربرگ بوده است. بر پایه یافته‌های این پژوهش افزودنی پودر شیشه به خوبی سبب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی خاک گردیده است [۳۶].

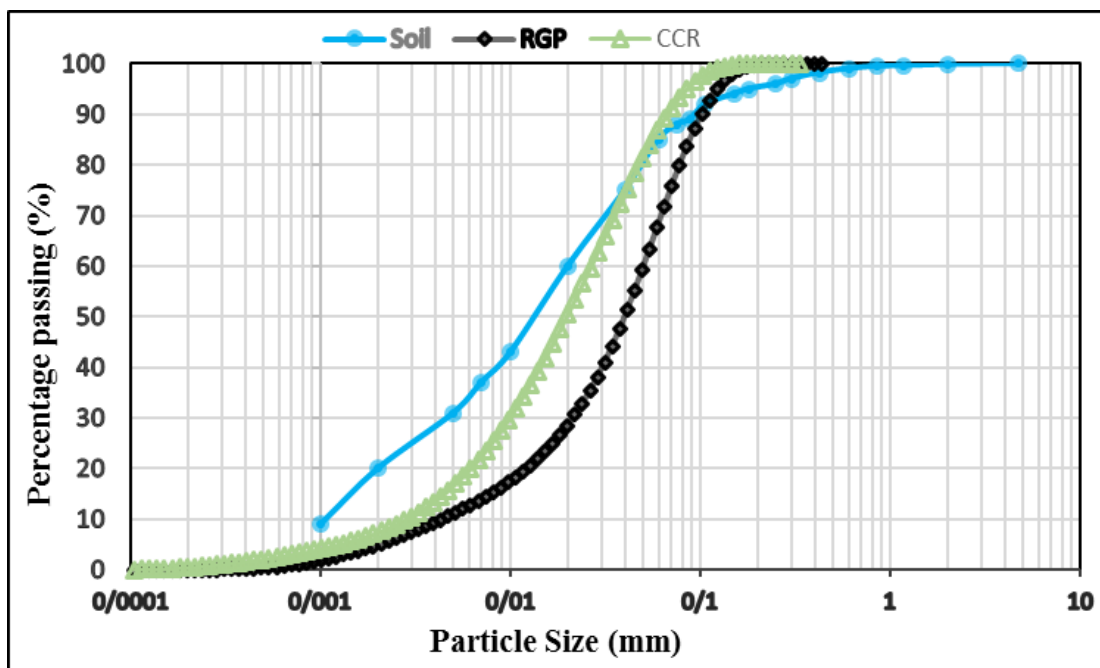
در حوزه کاربرد استفاده از کاربرد کلسیم پسماند در اصلاح خصوصیات خاک نیز پژوهش‌های محدودی انجام شده است. دو^۳ در سال ۲۰۱۵ به بررسی میدانی خاک نرم زیراساس بزرگراهی در چین که با کاربرد کلسیم پسماند (CCR^۴) تثبیت شده بود پرداخت [۳۷]. در این مطالعه یک آزمایش میدانی برای اثبات امکان استفاده از CCR در خاک رس به عنوان ماده زیراساس بزرگراه انجام شد. چایاکریت^۵ در سال ۲۰۱۶ به بررسی تثبیت خاک رس دریایی نرم با استفاده از درصد‌های ترکیبی مختلف CCR و خاکستر بادی (FA)^۶ پرداخت [۳۸].

سیواجی^۷ و همکاران (۲۰۱۷) اثر تثبیت خاک‌های رسی واگرا توسط ژئوپلیمر مرکب از پسماند کاربرد کلسیم و خاکستر زغال سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش مقاومت فشاری تک محوری^۸ و نسبت باربری کالیفرنیا^۹ برای نمونه‌های شاهد و تثبیت شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که امکان تثبیت خاک‌های رسی واگرا توسط این نوع ژئوپلیمر به خوبی وجود داشته، و مقاومت نمونه‌ها با افزایش میزان مواد پایه^{۱۰} رشد داشته است [۳۹].

- 1 Canakci
- 2 Siyab Khan
- 3 Du
- 4 Calcium carbide residue
- 5 Chayakrit
- 6 Fly Ash
- 7 Sivaji
- 8 Unconfined compression strength (UCS)
- 9 California bearing ratio (CBR)
- 10 Base materials

11 Tigge

12 Volcanic ash



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک، پودر شیشه و کاربرد کلسیم پسماند.

Fig. 1. Grain size distribution curve of soil, RGP and CCR.

۲-۳- کاربرد کلسیم پسماند (CCR)

کاربرد کلسیم پسماند یک محصول فرعی یا پسماند در چرخه صنعت تولید گاز استیلن بوده که فرمول عمومی آن طبق معادله (۲) می‌باشد [۴۵].



هر ساله در چرخه صنعت کشور ایران مقادیر قابل توجهی از این ضایعات تولید می‌گردد. نگهداری و انباشت این مواد به صورت زباله‌های صنعتی می‌تواند پیامدها و مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به دنبال داشته باشد. از این رو بازیافت و استفاده مجدد از این محصول فرعی، هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از دیدگاه اقتصادی می‌تواند بسیار سودمند باشد. کاربرد کلسیم پسماند به طور عمده از هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ تشکیل گردیده و به دلیل خاصیت قلیایی بالایی که دارد ($pH > 12$) می‌تواند به عنوان یک حلال قلیایی در فرآیند تولید ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گیرد. ترکیبات شیمیایی کاربرد کلسیم پسماند که با استفاده از آزمایش XRF تعیین گردیده است در جدول ۱ ارائه شده است؛ همچنین نمودار دانه‌بندی کاربرد کلسیم پسماند که به روش لیزر تعیین شده، نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

آزمایش تراکم بر روی این خاک مطابق با استاندارد ASTM D698 انجام شده است که رطوبت بهینه خاک برابر با ۲۰ درصد و وزن مخصوص خشک آن برابر 1.78 gr/cm^3 تعیین گردید ($\gamma_{dmax} = 1.78$ و gr/cm^3 و $OWC=20\%$). ترکیبات شیمیایی خاک، پودر شیشه و کاربرد کلسیم پسماند مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از آنالیز XRF به دست آمده که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- پودر شیشه

در این تحقیق از پودر شیشه بازیافتی به عنوان ماده خام اصلی ژئوپلیمر استفاده شده است. پودر شیشه بازیافتی (RGP) از ضایعات شیشه شهر کرمان تهیه گردید. برای این منظور ضایعات شیشه ابتدا توسط دستگاه سنگ‌شکن خرد شده، سپس توسط آسیاب سیاره‌ای کاملاً پودر گردید (شکل ۲). در انتها پودر شیشه از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون آن به عنوان ماده پایه ژئوپلیمر استفاده گردید. ترکیب شیمیایی پودر شیشه با استفاده از آنالیز XRF به دست آمده و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی پودر شیشه که با استفاده از دستگاه لیزر تعیین گردیده، نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی خاک، کاربید کلسیم پسماند و پودر شیشه

Table 1. Chemical compositions of soil, CCR and RGP

ترکیبات شیمیایی %	خاک	کاربید کلسیم پسماند (CCR)	پودر شیشه (RGP)
SiO ₂	۴۷/۴۳	۳/۱۹	۷۲/۵۹
Al ₂ O ₃	۱۱/۴۷	۱/۲۴	۱/۵۸
CaO	۱۲/۰۱	۶۳/۳۵	۱۱/۱۷
Fe ₂ O ₃	۳/۲	۰/۲۴	۰/۴۰
MgO	۳/۹۳	۰/۱۶	۱/۲۲
SO ₃	۲/۸۶	۰/۶۴	۰/۰۷
K ₂ O	۲/۱۲	۰/۰۱	۰/۵۳
Na ₂ O	۱/۳۴	۰/۲۸	۱۲/۴۹
TiO ₂	۰/۵۳	۰/۰۶	--
LOI	۱۳/۳۷	۳۰/۶۹	۰/۲۶
MnO	۰/۰۹	۰/۰۱	--
BaO	۰/۰۴	۰/۰۱	--
Cr ₂ O ₃	۰/۰۲	۰/۰۱	--



شکل ۲. فرآیند تولید پودر شیشه توسط (الف) دستگاه سنگ شکن (ب) آسیاب سیاره‌ای

Fig. 2. Producing glass powder by: a) crusher b) planetary mill.

سدیم یکنواخت با غلظت مولار مشخص طبق جدول ۳ حاصل شود (جرم سدیم هیدروکسید جامد مورد استفاده بر اساس غلظت مولی محلول محاسبه می‌شود). از آنجا که حل شدن هیدروکسید سدیم در آب، سبب بالا رفتن دمای محلول می‌گردد، لذا محلول باید قبل از استفاده به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گیرد تا هم دمای محیط گردد. پس از گذشت این زمان، از حلال A برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید.

برای تهیه حلال قلیایی B، از ترکیب آب و کاربید کلسیم پسماند استفاده گردید. بدین منظور، درصد مشخصی کاربید کلسیم پسماند به مقدار معینی آب (معادل رطوبت بهینه) اضافه شده و مخلوط تا انحلال کامل هم زده شد. برای استفاده از حلال قلیایی B نیاز به گذشت زمان ۲۴ ساعته نمی‌باشد و می‌توان بلافاصله پس از تهیه حلال، از آن برای ساخت نمونه‌ها استفاده نمود.

لازم به ذکر می‌باشد در انتخاب مقادیر غلظت حلال‌های قلیایی دو موضوع مورد توجه قرار گرفته شده است.

نخست، مطالعه پژوهش‌های مشابه و استفاده از مقادیر پیشنهادی و نتایج حاصل از این پژوهش‌ها به عنوان یکی از فاکتورهای اثرگذار در انتخاب محدوده اولیه مناسب برای حلال‌ها استفاده شده در این پژوهش. البته انتظار می‌رود، با توجه به تغییر ترکیبات شیمیایی و به خصوص مقادیر آلومینو سیلیکات، با تغییر خاک استفاده شده برای تثبیت و به خصوص تغییر ماده پایه ژئوپلیمر (که در این پژوهش پودر شیشه بوده است)، مقادیر و درصد‌های مورد نیاز برای حلال‌های قلیایی لزوماً مشابه پژوهش‌های گذشته نبوده و تغییر نماید. عامل دوم موثر در انتخاب غلظت‌ها، سعی در رسیدن به یک پیک مقاومتی در یک غلظت بهینه بوده است. بر این اساس غلظت‌های حلال قلیایی از مقادیر کم آغاز و تا رسیدن به یک مقدار بهینه برای کسب حداکثر مقاومت و سپس مشاهده کاهش مقاومت با افزایش مقادیر غلظت مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳. دانه‌های پولکی شکل هیدروکسید سدیم

Fig. 3. Solid pellets of NaOH

۲-۴- هیدروکسید سدیم (NaOH)

هیدروکسید سدیم دارای خاصیت قلیایی بسیار بالا بوده ($\text{pH} = 14$) و از رایج‌ترین مواد مورد استفاده برای تهیه حلال قلیایی در فرایند تولید ژئوپلیمرها می‌باشد. ورق‌های جامد پولکی شکل هیدروکسید سدیم مورد استفاده در این پژوهش متعلق به شرکت مرک آلمان و با خلوص ۹۸٪ بوده و تصویر و مشخصات آن به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۵- محلول فعال ساز قلیایی

در این پژوهش از دو نوع حلال قلیایی A (هیدروکسید سدیم) و B (کاربید کلسیم پسماند) برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری استفاده شده است. در ساخت محلول A ابتدا وزن مشخصی از تکه‌های جامد هیدروکسید سدیم را در آب داخل یک بالن به آرامی حل کرده تا محلول هیدروکسید

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی هیدروکسید سدیم

Table 2. Chemical and Physical data of NaOH

فرمول شیمیایی	چگالی	خلوص	جرم مولی	pH
NaOH	۲/۱۳	٪۹۸	۴۰ g/mol	۱۴ (50 g/l, H ₂ O, 20 °C)



شکل ۴. نمونه آماده شده جهت عمل‌آوری

Fig. 4. A specimen prepared for curing

۲-۷- عمل‌آوری نمونه‌ها

نمونه‌های قرار داده شده درون زیپ کیف داخل ظروف مخصوص درب دار قرار گرفته شده و روی آن‌ها با پارچه خیس کاملاً پوشانده شد. پس از آن ظروف حاوی نمونه‌ها در محفظه‌ای هم دما با دمای محیط و دارای رطوبت ثابت قرار گرفته تا نمونه‌ها در دمای محیط عمل‌آوری گردند. این فرآیند عمل‌آوری سبب می‌شد که رطوبت نمونه‌ها از زمان ساخت تا زمان انجام تست ثابت باقی مانده و در حقیقت نمونه‌ها در زمان تست دارای رطوبتی معادل رطوبت بهینه زمان ساخت (OWC) باشند. سه زمان متفاوت ۷، ۲۸ و ۹۱ روز برای عمل‌آوری نمونه‌ها انتخاب گردید. در انتهای زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها از درون زیپ کیف‌ها خارج و طلق دور آن‌ها باز گردیده و به منظور کنترل تغییر رطوبت نمونه‌ها، مجدداً وزن آن‌ها اندازه‌گیری گردید. بر اساس مشاهدات، تبخیر رطوبت نمونه‌ها پس از اتمام زمان عمل‌آوری بسیار ناچیز بود (کمتر از ۰/۳ درصد).

غلظت‌های استفاده شده برای هر دو حلال قلیایی ذکر شده در این پژوهش در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

۲-۶- آماده‌سازی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر ملاک ارزیابی بهبود خواص مکانیکی خاک تثبیت شده، آزمایش مقاومت تک محوری می‌باشد. در این تحقیق نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۷ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده و قالب ساخته برای نمونه‌ها از نوع فلزی و جدا شونده بود. در ابتدا نمونه‌های حاکی با استفاده از نسبت‌های مشخص خاک و پودر شیشه یا خاک و سیمان آماده شدند، سپس حلال قلیایی A یا B نیز با غلظت‌های مختلف تهیه و به نمونه‌ها افزوده گردید. درصد پودر شیشه و سیمان به کار برده شده، غلظت‌های حلال قلیایی و شرایط نام‌گذاری برای هر نمونه، در جدول ۳ بیان شده است. برای هر سری نمونه حداقل ۳ نمونه یکسان ساخته شده و میانگین مقاومت آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری ارائه شده است. برای ساخت نمونه‌های متراکم شده از روش زیر استفاده گردید:

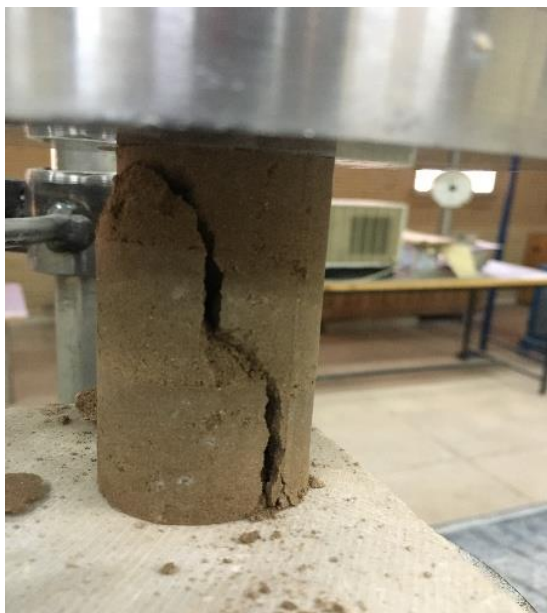
- خاک و کاربید کلسیم پسماند به صورت جداگانه از الک نمره ۴۰ و پودر شیشه از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده و سپس در گرم‌خانه^۱ و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ روز خشک گردیدند.
- مقادیر مورد نیاز از خاک و ماده پایه ژئوپلیمر یا همان پودر شیشه وزن گردیده و تا تهیه مخلوط کاملاً همگن (حدوداً ۱۰ دقیقه) کاملاً با هم مخلوط شدند.
- مقدار مناسب (معادل رطوبت بهینه OWC) از محلول قلیایی از پیش تهیه شده (محلول آب و سدیم هیدروکسید یا آب و کاربید کلسیم پسماند) به ترکیب خاک-پودر شیشه اضافه گردیده و به منظور تهیه مخلوط یکنواخت به مدت ۱۵ دقیقه با هم مخلوط گردیدند.
- برای هر نمونه، مقدار مناسب از مخلوط تهیه شده درون قالب ریخته شده و در سه لایه با انرژی معادل انرژی تراکم استاندارد (پراکتور) متراکم گردیدند.
- پس از تراکم، نمونه‌ها از قالب خارج و وزن گردیدند. سپس دور نمونه‌ها طلق پلاستیکی کشیده و به منظور حفظ رطوبت، درون زیپ کیف قرار گرفتند (شکل ۴).

1 Oven

جدول ۳. نام، مشخصات و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها

Table 3. Name, curing time and specification of the specimens

نمونه	غلظت هیدروکسید سدیم (مولار) - حلال A	غلظت کاربید کلسیم پسماند (%) - حلال B	پودر شیشه بازیافتی (%)	افزودنی سیمان (%)	زمان عمل‌آوری (روز)
Soil (کنترل ۱)	۰	۰	۰	۰	۲۸،۷ و ۹۱
S-OPC5 (کنترل ۲)	۰	۰	۰	۵	۲۸،۷ و ۹۱
M1G9	۱	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M2G9	۲	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M3G9	۳	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M4G9	۴	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M5G9	۵	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M6G9	۶	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M7G9	۷	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
M8G9	۸	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
C0G9	۰	۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
C4G9	۰	۴	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
C7G9	۰	۷	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
C10G9	۰	۱۰	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱
C13G9	۰	۱۳	۹	۰	۲۸،۷ و ۹۱



شکل ۵. تصویر نمونه شکسته شده تحت تست مقاومت فشاری محصور نشده

Fig. 5. Image of a broken specimen after UCS tes

۲-۸- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

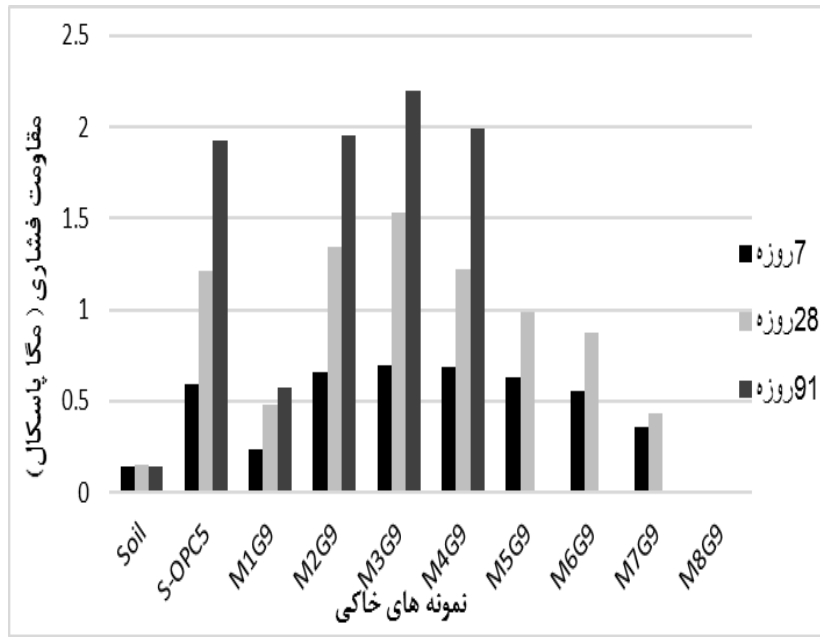
پس از اتمام زمان عمل‌آوری، بر روی نمونه‌ها تست مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166-87 [۴۶] انجام گردیده و مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و کرنش گسیختگی (ϵ_f) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۵ وضعیت نمونه را پس از انجام تست و شکست نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- حلال A

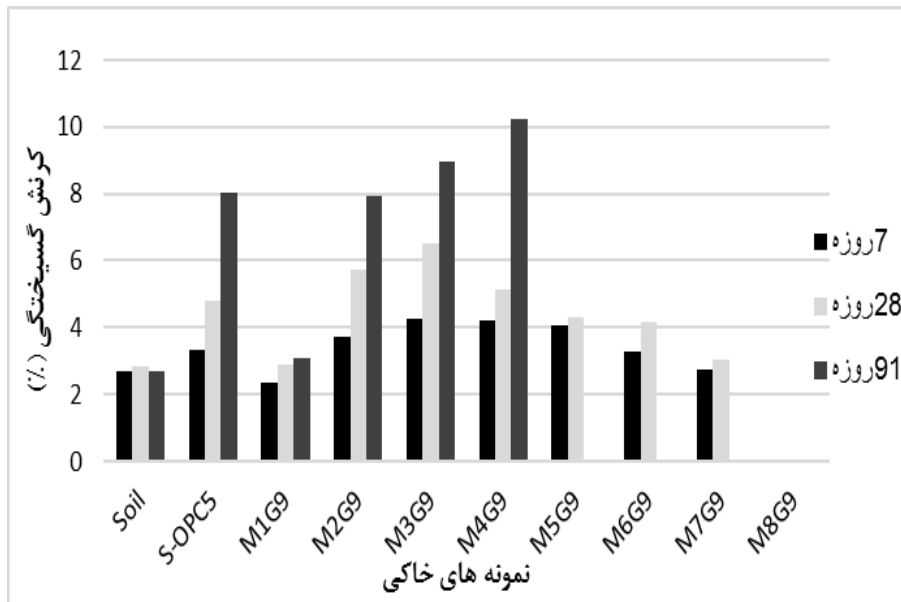
۳-۱-۱- تاثیر افزایش غلظت حلال قلیایی هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

اثر افزایش غلظت حلال قلیایی هیدروکسید سدیم و تثبیت خاک با استفاده از ژئوپلیمر هیدروکسید سدیم-پودر شیشه، بر مقاومت فشاری محصور نشده و کرنش گسیختگی نمونه‌ها به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



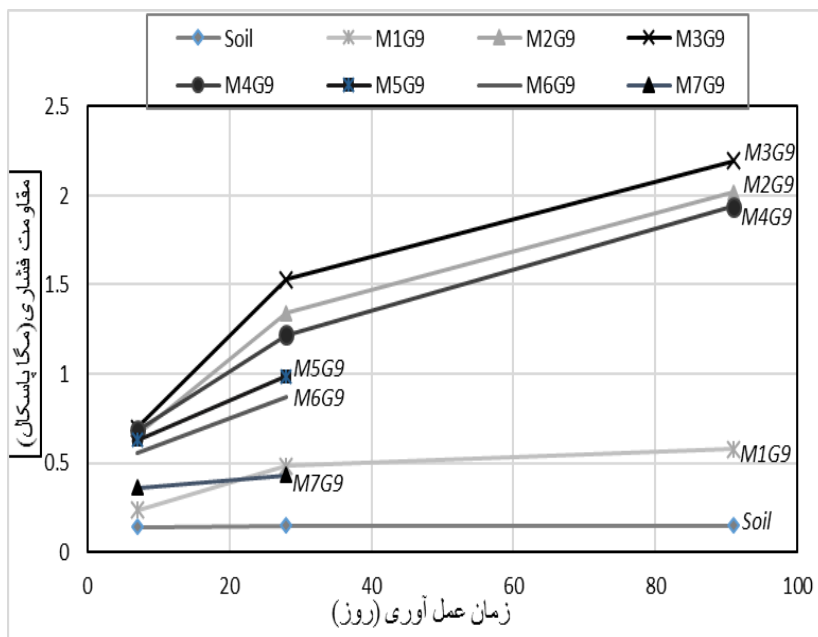
شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با هیدروکسید سدیم و تثبیت شده با سیمان

Fig.6. The UCS of unstabilized, stabilized by sodium hydroxide and by OPC



شکل ۷. کرنش گسیختگی نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با هیدروکسید سدیم و تثبیت شده با سیمان

Fig. 7. The failure strain of unstabilized, stabilized by sodium hydroxide and by OPC



شکل ۸. تاثیر زمان عمل‌آوری بر رشد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با هیدروکسید سدیم

Fig. 8. Effect of curing time on increasing UCS of sodium hydroxide -stabilized specimens

۳-۱-۲- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

اثر افزایش زمان عمل‌آوری بر سرعت رشد مقاومت نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. مقاومت فشاری خاک بدون تثبیت کننده پس از ۷ روز عمل‌آوری معادل ۰/۱۴۷ مگاپاسکال بوده و پس از افزایش دوره عمل‌آوری افزایش مقاومت فشاری در خاک بدون تثبیت کننده اتفاق نمی‌افتد، اما در نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری، با افزایش زمان عمل‌آوری نیز بر مقاومت فشاری اضافه می‌گردد.

سرعت افزایش مقاومت از ۷ به ۲۸ روز قابل توجه بوده و پس از آن تا ۹۱ روز سرعت رشد نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است (شکل ۸). مقاومت ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه نمونه M3G9 نسبت به نمونه خاک تثبیت نشده به ترتیب حدود ۳/۹، ۹/۴ و ۱۴/۴ برابر افزایش نشان می‌دهد، همچنین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه M3G9 از مقاومت نمونه تثبیت شده با سیمان نیز برای هر سه زمان عمل‌آوری بیشتر بوده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های ۹۱ روزه M5G9، M6G9 و M7G9 به دلیل تورم و ترک خوردگی زیاد قبل از انجام تست تخریب گردیدند.

خاک رس تثبیت نشده مورد آزمایش، مقاومت فشاری محصور نشده کمی دارد (۰/۱۴۷ مگاپاسکال) در حالی که مقاومت نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری نسبت به نمونه تثبیت نشده، رشد قابل توجهی داشته است. بررسی شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۱ مولار تا ۳ مولار (M 1 تا M 3)، افزایش مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده و کرنش گسیختگی مشاهده شده و پس از آن با افزایش مقادیر غلظت (M 4 تا M 8)، کاهش این مقادیر در نمونه‌ها روی داده است. مقادیر پایین غلظت سبب می‌شود که محیط، قلیابیت کافی برای انحلال منبع آلومینو سیلیکاتی را نداشته و واکنش ژئوپلیمرزاسیون به صورت ناقص انجام پذیرد. همچنین غلظت‌های بالاتر از مقدار بهینه (3 M) نیز سبب تخریب محیط خاک و تاخیر در تشکیل ژل و حتی توقف واکنش ژئوپلیمرزاسیون می‌گردد [۴۷ و ۴۸]. لذا این امر نشان می‌دهد برای انجام مناسب واکنش ژئوپلیمرزاسیون، به غلظت بهینه‌ای از محلول قلیایی نیاز می‌باشد که در این تحقیق غلظت M 3 به عنوان مقدار بهینه به دست آمده است. همچنین بررسی تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های ژئوپلیمری در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد، نمونه‌های با مقاومت بالاتر دارای شکل‌پذیری بیشتری نیز بوده‌اند که این امر سبب رفتار بهتر خاک قبل از گسیختگی خواهد بود.



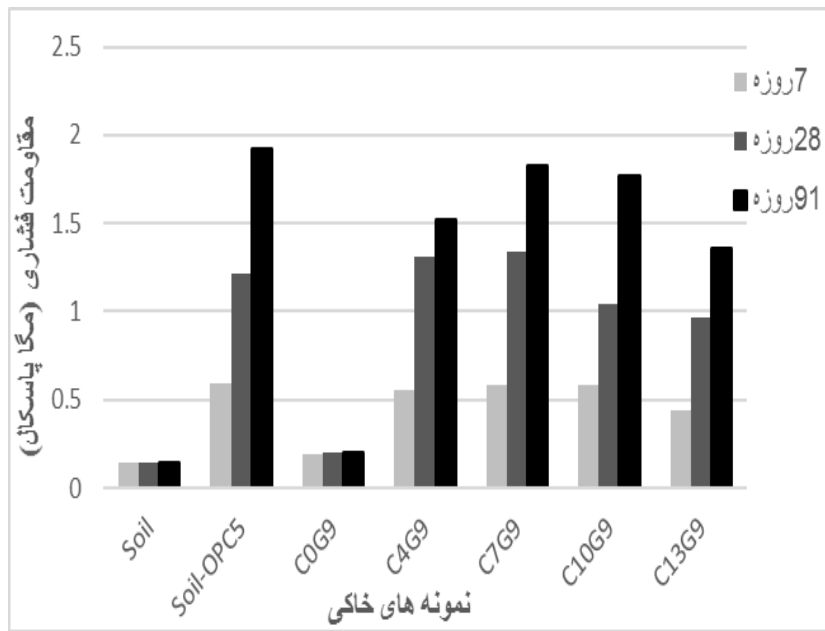
شکل ۹. الف) تخریب خود به خودی نمونه ۹۱ روزه M7G9 ب) تخریب خود به خودی نمونه M8G9 در زمان کوتاهی پس از ساخت

Fig. 9. a) Spontaneous destruction of the 91-day specimen M7G9 b) Spontaneous destruction of the M8G9 specimen, shortly after construction

۳-۲- حلال B

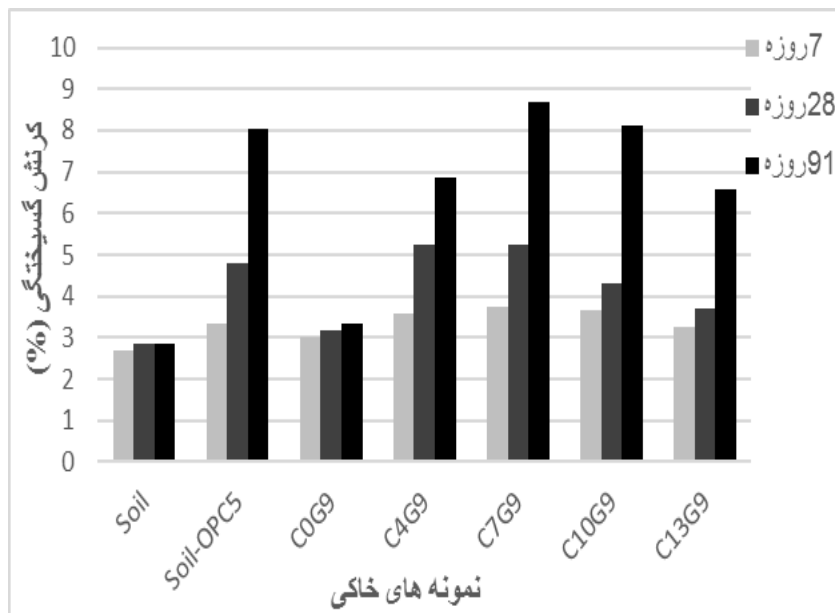
۳-۲-۱- اثر افزایش مقدار کاربید کلسیم پسماند بر مقاومت فشاری
 به منظور بررسی تاثیر نوع حلال قلیایی بر مقاومت فشاری از محلول کاربید کلسیم پسماند- آب نیز استفاده شده است. اثر افزایش مقدار کاربید کلسیم پسماند و تثبیت خاک با استفاده از ژئوپلیمر کاربید کلسیم-پودر شیشه، بر مقاومت فشاری محصور نشده و کرنش گسیختگی نمونه‌ها برای مقادیر مختلف CCR (۰٪، ۴٪، ۷٪، ۱۰٪ و ۱۳٪) و برای مقدار پودر شیشه ثابت ۹٪ به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.
 جهت فراهم آمدن شرایط مناسب برای فرایند ژئوپلیمرزاسیون و تشکیل ژل‌های ژئوپلیمر نیاز به محیط قلیایی مناسب و وجود مقادیر کافی ذرات آمورف آلومینو سیلیکاتی می‌باشد. کاربید کلسیم به دلیل دارا بودن خاصیت قلیایی ($pH > 12$) می‌تواند شرایط مناسبی را برای لیچینگ و انحلال ذرات آلومینا سیلیکای موجود در خاک و پودر شیشه و در نتیجه تثبیت ژئوپلیمری خاک فراهم نماید. همانطور که قبلا بیان شد مقاومت نمونه خاک تثبیت نشده در حالت مرطوب حدودا $0/147$ مگاپاسکال می‌باشد، که مقاومت کمی برای خیلی از پروژه‌های عمرانی می‌باشد. همچنین مقاومت نمونه COG9 نسبت به نمونه خاک تثبیت نشده اختلاف اندکی دارد و به نظر می‌رسد واکنش ژئوپلیمرزاسیون در این نمونه انجام نشده است. این نتیجه نشان

۳-۱-۳- تاثیر افزایش غلظت حلال هیدروکسید سدیم بر شکل ظاهری و شوره زدگی سطح نمونه‌ها
 در بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها مشاهده گردید که برای غلظت‌های بیش از ۴ مولار، با افزایش میزان غلظت هیدروکسید سدیم، شوره زدگی، ترک خوردگی و تورم نمونه‌ها افزایش چشمگیری داشته است. همین امر باعث تخریب خود به خودی نمونه‌های ۹۱ روزه M6G9، M5G9 و M7G9 به علت تورم بیش از حد قبل از انجام تست مقاومت فشاری بوده است (شکل ۹). همچنین به دلیل غلظت بالای هیدروکسید سدیم در نمونه M8G9، نمونه در زمان بسیار کوتاهی پس از ساخت تخریب گردید. به نظر می‌رسد این رفتار در نمونه‌های با غلظت بالا به دو دلیل اتفاق افتاده است: الف) از یک سو انجام واکنش بین آنیون‌های آزاد شده مازاد هیدروکسید سدیم ($-OH$) با کاتیون‌های مثبت خاک باعث تشکیل هیدروکسید فلزی و در نتیجه تخریب ساختار خاک شده است [۴۷ و ۴۸]. ب) از سوی دیگر افزایش بیش از حد غلظت NaOH سبب افزایش ویسکوزیته محلول قلیایی گردیده که این امر نیز مانع خیس خوردگی و انحلال ذرات آلومینو سیلیکاتی می‌گردد؛ لذا تاثیر منفی بر فرایند تشکیل ژل ژئوپلیمر و انجام واکنش ژئوپلیمرزاسیون داشته و حتی می‌تواند باعث توقف آن گردد [۴۷ و ۴۸].



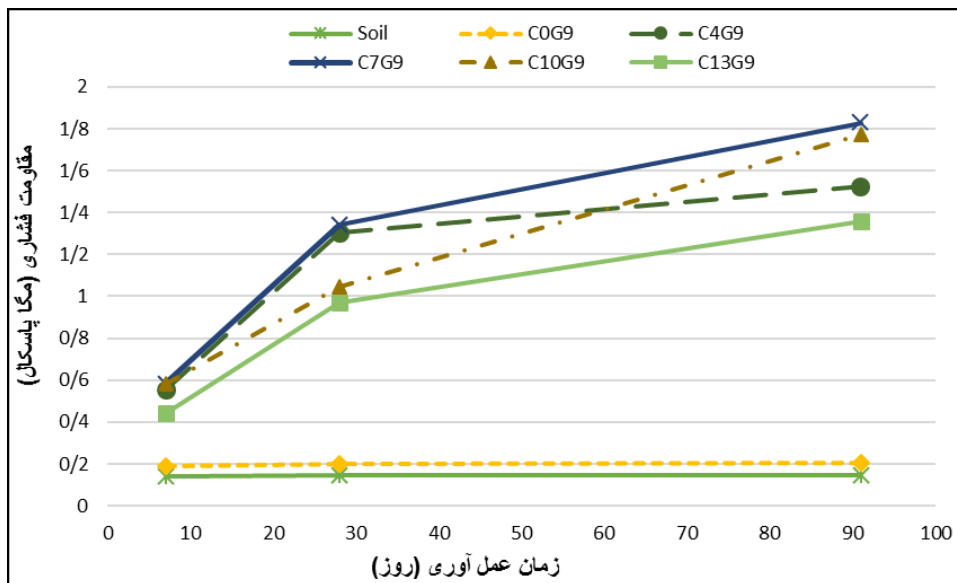
شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با کاربید کلسیم پسماند و تثبیت شده با سیمان

Fig. 10. The UCS of unstabilized, stabilized by CCR and stabilized by OPC



شکل ۱۱. کرنش گسیختگی نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با کاربید کلسیم پسماند و تثبیت شده با سیمان

Fig. 11. The failure strain of unstabilized, stabilized by CCR and stabilized by OPC



شکل ۱۲. تاثیر زمان عمل‌آوری بر رشد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با کاربرد کلسیم

Fig. 12. Effect of curing time on increase in UCS of the specimens stabilized by CCR

مانع لیچینگ و انحلال ذرات آلومینو سیلیکاتی و در نتیجه توقف فرایند ژئوپلیمرزاسیون گردد [۴۷].

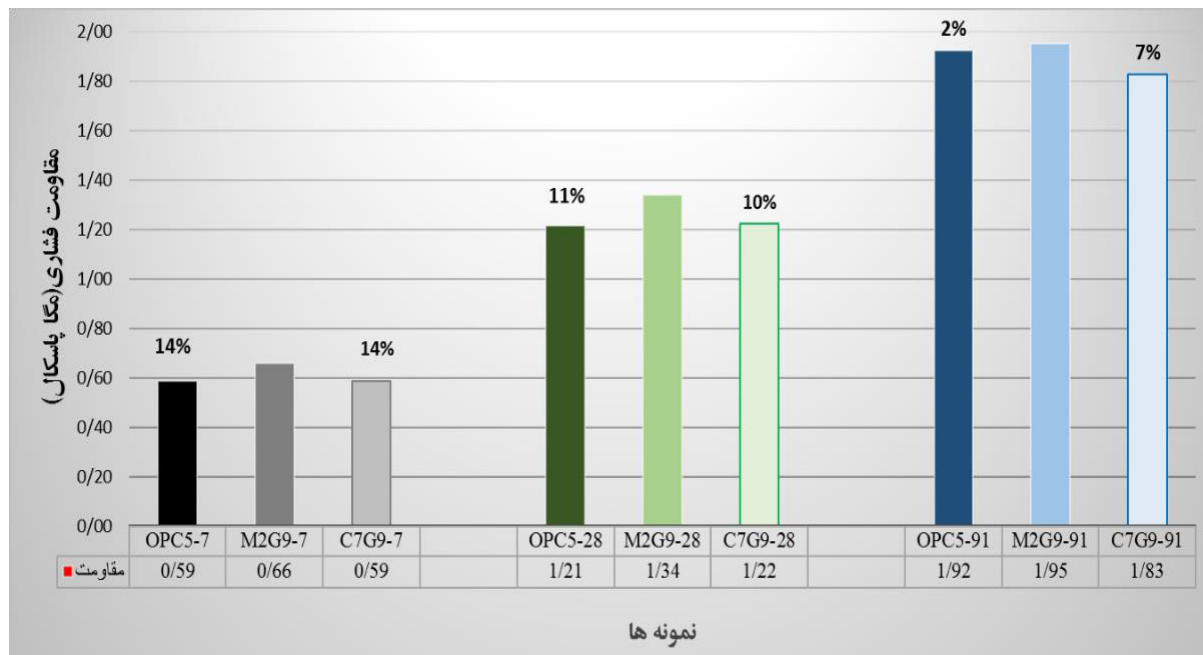
۳-۲-۲- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

در شکل ۱۲ رابطه بین افزایش زمان عمل‌آوری و سرعت رشد مقاومت نمونه‌ها در سنین مختلف نشان داده شده است. بر اساس این شکل، افزایش مقاومت در مقابل افزایش زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های C4G9، C7G9، C10G9 و C13G9 مشاهده می‌گردد.

این امر نشان می‌دهد که تثبیت خاک در این نمونه‌ها تحت فرایند ژئوپلیمرزاسیون اتفاق افتاده است. برای نمونه خاک بدون افزودنی (نمونه کنترل) و نمونه C0G9، با گذشت زمان عمل‌آوری تغییری در مقاومت این نمونه‌ها مشاهده نگردیده است. این نتیجه از یک سو تایید کننده عدم انجام واکنش در این دو نمونه بوده و از سوی دیگر نشان دهنده اهمیت حضور فعال کننده قلیایی مناسب برای انجام تثبیت ژئوپلیمری می‌باشد. همچنین بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که سرعت رشد مقاومت نمونه‌های تثبیت شده در فاصله زمانی ۷ تا ۲۸ روز قابل توجه بوده و پس از آن، رشد مقاومت با سرعت کمتری ادامه داشته است.

دهنده اهمیت وجود یک حلال قلیایی مناسب مانند CCR، برای انجام و پیشبرد واکنش ژئوپلیمرزاسیون و توسعه مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری می‌باشد.

بر اساس اشکال ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار CCR از ۰٪ تا ۷٪ مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها افزایش و برای غلظت‌های بالاتر CCR (۱۰٪ و ۱۳٪) این مقادیر کاهش پیدا کرده است. بیشترین مقاومت و کرنش گسیختگی برای نمونه تثبیت شده ژئوپلیمری با ۷٪ کاربرد کلسیم به دست آمده است. مقاومت ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه نمونه C7G9 نسبت به نمونه خاک تثبیت نشده به ترتیب حدود ۳/۱، ۷/۶ و ۱۱/۹ برابر افزایش نشان داده است. مطالعه مشابهی که توسط کمپلا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام گرفت نشان داد که مقدار ۷٪ CCR بهترین شرایط برای انجام واکنش ژئوپلیمرزاسیون را فراهم نموده و نمونه‌های خاکی تثبیت شده با این درصد CCR دارای بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده بوده اند [۱۲]. غلظت‌های پایین‌تر CCR موجب کاهش قلیائیت محیط و در نتیجه کاهش قدرت انحلال ذرات آلومینو سیلیکاتی می‌گردد که خود موجب واکنش ناقص ژئوپلیمرزاسیون می‌شود. غلظت‌های بالاتر از غلظت بهینه CCR نیز سبب افزایش ویسکوزیته حلال قلیایی شده که می‌تواند



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بهینه M2G9 و C7G9 در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز

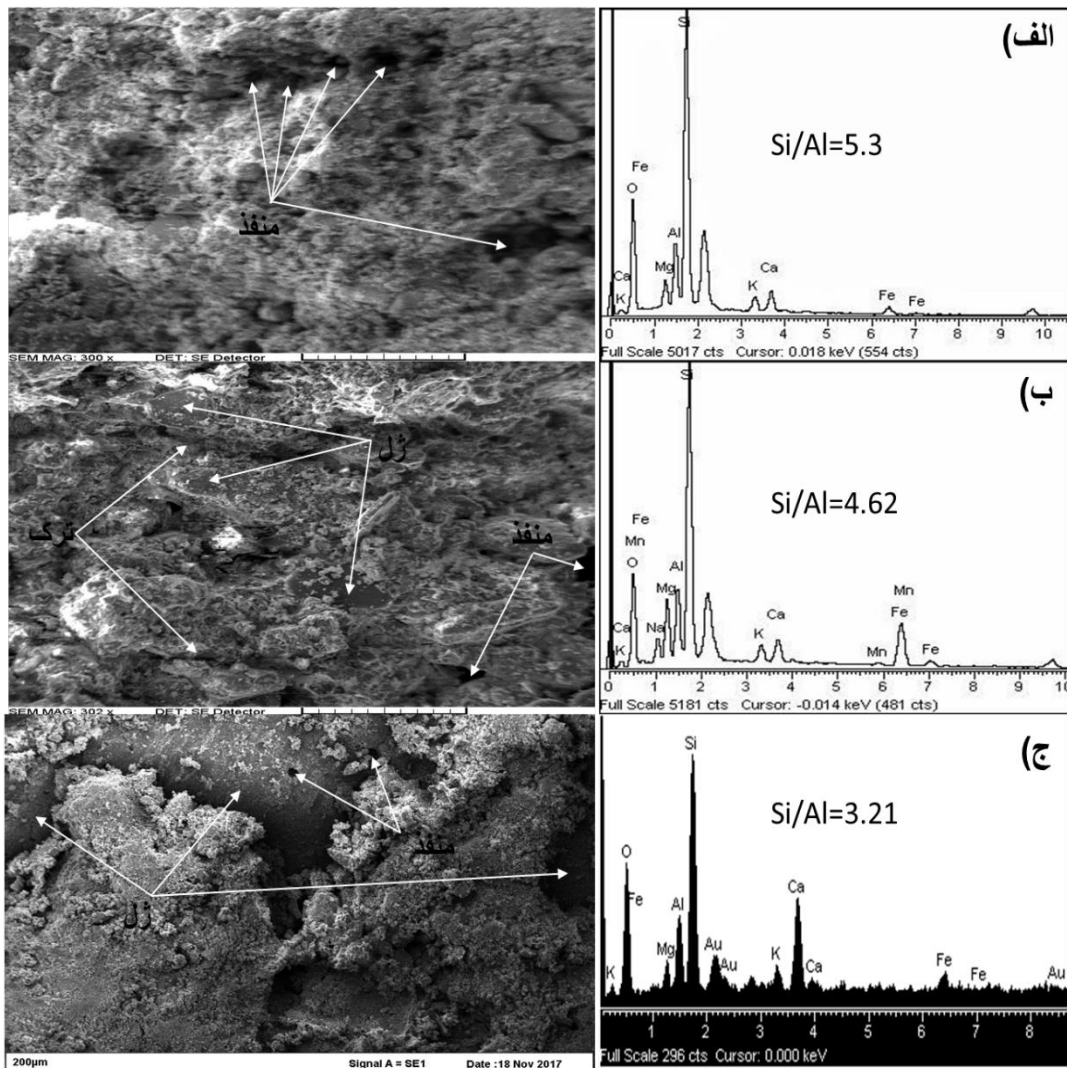
Fig. 13. Comparison of compressive strength of optimal M2G9 and C7G9 specimens at 7, 28 and 91 days of age

۳-۳- مقایسه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده حاوی حلال های قلیایی A و B

در شکل ۱۳ تفاوت مقاومت نمونه‌های بهینه ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه تثبیت شده با دو حلال قلیایی هیدروکسید سدیم (A) و کاربید کلسیم پسماند (B) و نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند نشان داده شده است. بر اساس این شکل مقاومت در نمونه‌های بهینه حاوی حلال قلیایی هیدروکسید سدیم (M2G9) نسبت به نمونه‌های حاوی حلال قلیایی کاربید کلسیم پسماند (C7G9) و نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند، در هر سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بیشتر بوده است. بر این اساس مقاومت نمونه ۷ روزه M2G9-7 نسبت به نمونه C7G9-7 و نمونه OPC5-7، به میزان ۱۴٪ بیشتر بوده است. همچنین مقاومت نمونه ۲۸ روزه M2G9-28 نسبت به نمونه C7G9-28 و نمونه OPC5-28 به ترتیب ۱۰٪ و ۱۱٪ بیشتر بوده، و برای نمونه ۹۱ روزه M2G9-91 مقدار مقاومت نسبت به نمونه C7G9-91 و نمونه OPC5-91 به ترتیب برابر ۷٪ و ۲٪ بیشتر بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر حلال قلیایی هیدروکسید سدیم در افزایش مقاومت و تثبیت خاک نسبت به حلال قلیایی کاربید کلسیم و سیمان پرتلند معمول تا حدودی بیشتر بوده است. علت این امر می‌تواند به

۳-۲-۳ تاثیر افزایش کاربید کلسیم بر شکل ظاهری و شوره زدگی سطح نمونه‌ها

برخلاف نمونه‌های تثبیت شده با استفاده از هیدروکسید سدیم، شکل ظاهری نمونه‌های تثبیت شده با کاربید کلسیم دارای ترک‌های و شوره زدگی بسیار کمتری می‌باشد. همچنین هیچ یک از نمونه‌ها در زمان ساخت و یا در دوره عمل‌آوری بر اثر رشد ترک‌ها و تورم بیش از حد تخریب نگردیدند، این در حالی است که برای نمونه‌های با غلظت بالای هیدروکسید، شوره زدگی بیش از حد و توسعه ترک‌ها سبب تخریب خود به خودی نمونه‌ها در دوره عمل‌آوری گردید. لذا به نظر می‌رسد رفتار نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه حلال قلیایی کاربید کلسیم از لحاظ کنترل شوره زدگی، توسعه ترک و تورم نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های تثبیت شده بر پایه حلال قلیایی هیدروکسید سدیم مناسب‌تر باشد. همچنین لازم به ذکر است که کاربید کلسیم پسماند جزء پسماندها و یا زباله‌های صنعتی بوده و هزینه تهیه و بهره‌برداری مجدد آن به مراتب نسبت به هیدروکسید سدیم کمتر است. لذا استفاده از حلال بر پایه کاربید کلسیم نسبت به حلال بر پایه هیدروکسید سدیم، هم از دیدگاه زیست‌محیطی و هم از دیدگاه اقتصادی مناسب و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.



شکل ۱۴. تصویر SEM و طیف EDX نمونه‌های الف) خاک تثبیت نشده (کنترل) ب) M2G9 ج) C7G9 با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه

Fig. 14. SEM image and EDX spectrum of specimens a) unsterilized soil (control) b) M2G9 c) C7G9 with 28 days curing

SEM به همراه طیف EDX برای سه نمونه ۲۸ روزه خاک تثبیت نشده، M2G9 و C7G9 به ترتیب در اشکال ۱۴-الف-ج نشان داده شده است.

۳-۴-۱- بررسی تصاویر SEM

تصاویر SEM تشکیل ژل ژئوپلیمر را در نمونه‌های تثبیت شده (کنترل) دارای محیط متراکم‌تر و ساختار همگن‌تری بوده و تخلخل در سطح این نمونه‌ها کاهش یافته است. این مشاهدات ریز ساختاری با نتایج به دست آمده در تصاویر ۶ و ۷ برای هیدروکسید سدیم و اشکال ۱۰ و ۱۱

دلیل pH بالاتر هیدروکسید سدیم و قدرت انحلال قلیایی بیشتر آن باشد. با این حال، در صورت توجه به مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی، و با توجه به اختلاف نه چندان چشمگیر، در مقادیر مقاومت نمونه‌های بهینه این دو حلال، استفاده از کاربید کلسیم پسماند در پروژه‌های اجرایی می‌تواند توجیه بیشتری داشته باشد.

۳-۴-۲- مطالعات ریز ساختاری

تجزیه و تحلیل رفتار ریز ساختاری نمونه‌های منتخب، توسط بررسی تصاویر SEM و تهیه آنالیز EDX از سطح شکسته نمونه‌های M2G9، C7G9 و نمونه خاک تثبیت نشده (نمونه کنترل) انجام گردید. تصویر

برای کاربید کلسیم که بیان کننده بهبود رفتار مکانیکی (افزایش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی) نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری نسبت به نمونه کنترل بودند، تطابق داشته و نشان می‌دهد که علت افزایش میزان مقاومت و شکل‌پذیری در نمونه‌های M2G9 و C7G9 توسعه ژل‌های ژئوپلیمری آلومینو سیلیکاتی (N-A-S-H) ناشی از فرایند ژئوپلیمرزاسیون و تشکیل درجات بالاتر اتصال و ساختار متراکم‌تر این نمونه‌ها بوده است. همچنین با مقایسه تصاویر اشکال ۱۴-ب و ۱۴-ج مشاهده می‌گردد که میزان ترک‌ها در نمونه M2G9 نسبت به نمونه C7G9 بیشتر می‌باشد که این تصاویر نیز با مشاهدات شکل ظاهری نمونه‌ها تطابق دارند.

۳-۴-۲- آنالیز طیف‌های EDX

به طور کلی بررسی آنالیز EDX نشان می‌دهد که برای نمونه‌های M2G9 و C7G9 ترکیبات عنصری در محل تشکیل ژل ژئوپلیمر تقریباً یکسان بوده است و عمدتاً شامل عناصر سیلیکون، آلومینیوم، آهن، سدیم، کلسیم و میزان کمی از منیزیم و پتاسیوم بوده است. برای نمونه M2G9 عنصر سدیم و برای نمونه C7G9 میزان عنصر کلسیم بیشتر به چشم می‌خورد که علت آن، تفاوت در محلول فعال کننده استفاده شده در هر یک از این نمونه‌ها بوده است. همچنین مشاهده طیف‌ها نشان می‌دهد که عنصر سدیم و کلسیم در نمونه خاک تثبیت نشده به میزان بسیار اندکی وجود دارد. وجود مقادیر بالای سیلیس، و مقادیر کافی سدیم، آلومینیوم و کلسیم سبب فراهم آمدن شرایط مناسب تشکیل ژل‌های N-A-S-H و C-S-H در نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری شده است. با توجه به پژوهش‌های همکاران (۲۰۱۲) نسبت‌های Si/Al در انجام بهتر فرایند ژئوپلیمرزاسیون، تشکیل و توسعه ژل‌های ژئوپلیمری و رفتار فیزیکی و شیمیایی ژئوپلیمرها تاثیر بسزایی دارد. تشکیل و توسعه این ژل‌ها موجب افزایش تراکم ساختار خاک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها می‌گردد [۴۷]. با توجه به طیف‌های موجود در شکل ۱۴-ب و شکل ۱۴-ج این نسبت‌ها برای نمونه M2G9 برابر Si/Al=4.62 و برای نمونه C7G9 برابر Si/Al=3.21 می‌باشد. نسبت‌های Si/Al برای هر دو نمونه در محدوده مناسبی برای انجام واکنش ژئوپلیمرزاسیون و تشکیل ژل ژئوپلیمر قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مقایسه تاثیر دو نوع حلال قلیایی هیدروکسید سدیم

و کاربید کلسیم بازبافتی بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاکی تثبیت شده ژئوپلیمری بر پایه پودر شیشه بازبافتی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصل از تثبیت با این ژئوپلیمرها با نتایج حاصل از تثبیت خاک با ۵٪ سیمان پرتلند معمولی (OPC) نیز مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج به صورت خلاصه در زیر ارائه گردیده است.

- میزان مقاومت فشاری محصور نشده و کرنش گسیختگی کلیه نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری نسبت به نمونه خاک تثبیت نشده (نمونه کنترل) افزایش داشته است.

- بررسی اثر غلظت هر دو نوع محلول فعال کننده قلیایی بر رفتار نمونه‌های ژئوپلیمری نشان داد که، برای انجام مناسب واکنش ژئوپلیمرزاسیون و رفتار بهتر نمونه‌های ژئوپلیمری به غلظت بهینه‌ای از حلال قلیایی نیاز می‌باشد و استفاده از غلظت‌های کمتر یا بیشتر از مقدار بهینه سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها خواهد گردید.

- مقدار غلظت بهینه برای حلال قلیایی هیدروکسید سدیم ۳ مولار (3M) بوده و مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با این غلظت (M3G9) برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز به ترتیب ۳/۹، ۹/۴ و ۱۴/۴ برابر مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت نشده بوده است.

- مقدار درصد بهینه استفاده از کاربید کلسیم پسماند به عنوان حلال قلیایی برابر ۷٪ تعیین گردیده و مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با این غلظت (C7G9) برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز به ترتیب ۳/۱، ۷/۶ و ۱۱/۹ برابر مقاومت فشاری نمونه کنترل تعیین گردید.

- برای هر دو نوع حلال قلیایی، با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری محصور نشده اضافه گردیده است. سرعت رشد مقاومت در ۲۸ روز اول قابل توجه بوده و پس از آن نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های ۹۱ روزه نسبت به ۲۸ روزه کمتر بوده است.

- نمونه‌های تثبیت شده ژئوپلیمری علاوه بر دارا بودن مقاومت بالاتر، دارای توانایی تحمل تغییر شکل و کرنش گسیختگی بیشتری نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده بودند. این عملکرد در شرایطی که اثر توام مقاومت فشاری و انعطاف‌پذیری بالایی در خاک نیاز باشد بسیار مفید است (همچون روسازی‌های انعطاف‌پذیر).

- در بررسی شکل ظاهری نمونه‌های تثبیت شده با حلال قلیایی هیدروکسید سدیم مشاهده گردید که افزایش بیش از حد غلظت هیدروکسید سدیم سبب شوره زدگی و گسترش ترک در این نمونه‌ها گردیده و حتی می‌تواند باعث تخریب خود به خودی آن‌ها گردد. در حالی که در نمونه‌های

- Journal of the Physical Sciences, 5(9) (2010) 1419-1423.
- [8] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M. Sumajouw, B. Rangan, Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, *Civil engineering dimension*, 6(2) (2004) 88-93.
- [9] M.M. Al Bakri Abdullah, K. Hussin, M. Bnhussain, K.N. Ismail, Z. Yahya, R.A. Razak, Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent, *International journal of molecular sciences*, 13(6) (2012) 7186-7198.
- [10] G. Saravanan, C. Jeyasehar, S. Kandasamy, Flyash Based Geopolymer Concrete-A State of the Art Review, *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 6(1) (2013).
- [11] N. Cristelo, S. Glendinning, A. Teixeira Pinto, Deep soft soil improvement by alkaline activation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2) (2011) 73-82.
- [12] A. Kampala, S. Horpibulsuk, A. Chinkullijniwat, S.-L. Shen, Engineering properties of recycled calcium carbide residue stabilized clay as fill and pavement materials, *Construction and Building Materials*, 46 (2013) 203-210.
- [13] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and building materials*, 47 (2013) 1468-1478.
- [14] P. Sargent, P.N. Hughes, M. Rouainia, M.L. White, the use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils, *Engineering geology*, 152(1) (2013) 96-108.
- [15] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A.T. Pinto, Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation, *Acta Geotechnica*, 8(4) (2013) 395-405.
- [16] B. Singhi, A.I. Laskar, M.A. Ahmed, Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending, *Arabian Journal for science and engineering*, 41(2) (2016) 393-400.
- [17] R.A. Mozumder, A.I. Laskar, Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using artificial neural network, *Computers and*

تثبیت شده با استفاده از حلال کاربید کلسیم شوره زدگی و ترک بسیار کمتری در نمونه‌ها مشاهده گردید.

- بر پایه نتایج کسب شده هم ژئوپلیمر هیدروکسید سدیم-پودر شیشه و هم ژئوپلیمر کاربید کلسیم پسماند-پودر شیشه، رفتار بسیار موثری در تثبیت خاک رسی از خود نشان داده‌اند و به خوبی می‌توانند جایگزین‌های موثری برای سیمان‌های پرتلند معمولی در فرایند تثبیت شیمیایی خاک باشند.
- با توجه به حجم بالای تولید پسماند کاربید کلسیم در کشور، خطرات فراوان زیست‌محیطی ناشی از انباشت آن، هزینه بسیار ناچیز تهیه این ماده، و همچنین رفتار مناسب‌تر در برابر تغییرات حجمی و شوره زدگی، در نمونه‌های کاربیدی نسبت به نمونه‌های هیدروکسیدی، به نظر می‌رسد، استفاده از حلال بر پایه کاربید کلسیم پسماند نسبت به حلال بر پایه هیدروکسید سدیم، هم از دیدگاه زیست‌محیطی، هم از دیدگاه اقتصادی و هم از دیدگاه فنی مناسب‌تر، مقرون به صرفه‌تر و اجرایی‌تر باشد.

منابع

- [1] G.A. Lorenzo, D.T. Bergado, Fundamental parameters of cement-admixed clay—New approach, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(10) (2004) 1042-1050.
- [2] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and concrete research*, 38(2) (2008) 128-136.
- [3] D. Khale, R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, *Journal of materials science*, 42(3) (2007) 729-746.
- [4] J. Davidovits, *Geopolymer chemistry and applications*. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, in, ISBN 2-951-14820-1-9, 2008.
- [5] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8) (1991) 1633-1656.
- [6] A. Palomo, F. Glasser, Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin, *British ceramic. Transactions and journal*, 91(4) (1992) 107-112.
- [7] K. Vijai, R. Kumutha, B. Vishnuram, Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete, *International*

- Eng. Technol, 3(13) (2014) 32-36.
- [28] M. Cyr, R. Idir, T. Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet, *Journal of Materials Science*, 47(6) (2012) 2782-2797.
- [29] M. Torres, F. Puertas, M. Blanco-Varela, PREPARACIÓN DE CEMENTOS ALCALINOS A PARTIR DE RESIDUOS VÍTREOS. SOLUBILIDAD DE RESIDUOS VÍTREOS EN MEDIOS FUERTEMENTE BÁSICOS.
- [30] F. Puertas, M. Torres-Carrasco, Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation, *Cement and Concrete Research*, 57 (2014) 95-104.
- [31] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation, *Journal of cleaner production*, 90 (2015) 397-408.
- [32] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, M.M. Disfani, Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 285-294.
- [33] J. Olufowobi, A. Ogundoku, B. Michael, O. Aderinlewo, Clay soil stabilisation using powdered glass, *Journal of Engineering Science and Technology*, 9(5) (2014) 541-558.
- [34] J.R. Benny, J. Jolly, J.M. Sebastian, M. Thomas, Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6 (2017).
- [35] H. Canakci, A. Aram, F. Celik, Stabilization of clay with waste soda lime glass powder, *Procedia engineering*, 161 (2016) 600-605.
- [36] M.S. Khan, M. Tufail, M. Mateeullah, Effects of waste glass powder on the geotechnical properties of loose subsoils, *Civil Engineering Journal*, 4(9) (2018) 2044-2051.
- [37] Y.-J. Du, N.-J. Jiang, S.-Y. Liu, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, Field evaluation of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue, *Soils and Geotechnics*, 69 (2015) 291-300.
- [18] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, S.-L. Shen, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Materials and Pavement Design*, 17(4) (2016) 877-891.
- [19] M. Abdullah, F. Ahmad, A. Mustafa Al Bakri, Geopolymer application in soil: a short review, *Applied Mechanics and Materials*, 754 (2015) 378-381.
- [20] A.M. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, I.K. Nizar, A. Rafiza, A. Izzat, Chemical reactions in the geopolymerisation process using fly ash-based geopolymer: a review, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7) (2011) 1199-1203.
- [21] P.N. Lemougna, K.J. MacKenzie, U.C. Melo, Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash, *Ceramics International*, 37(8) (2011) 3011-3018.
- [22] E. Papa, V. Medri, E. Landi, B. Ballarin, F. Miccio, Production and characterization of geopolymers based on mixed compositions of metakaolin and coal ashes, *Materials & Design (1980-2015)*, 56 (2014) 409-415.
- [23] S.M. Rao, I.P. Acharya, Synthesis and characterization of fly ash geopolymer sand, *Journal of materials in civil engineering*, 26(5) (2014) 912-917.
- [24] M.P. Bilondi1a, S. Marandi, F. Ghasemi2b, Effect of recycled glass powder on asphalt concrete modification, *Structural Engineering and Mechanics*, 59(02) (2016) 373-385.
- [25] M. Pattengil, T. Shutt, Use of ground glass as a pozzolan, in: *Proc., Int. Symp. on Utilization of Waste Glass in Secondary Products*, ASCE, Albuquerque, NM, 1973.
- [26] M. Sabbagh Gol, V. Toufigh, Feasibility Study of Sandy Soil Stabilization with Glass Powder and Natural Pozzolan Based Geopolymer, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1) (2019) 169-182.
- [27] A.B. Pascual, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, Waste glass powder-based alkali-activated mortar, *Int. J. Res.*

- [43] D. ASTM, 2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes, in: American Society for Testing of Materials, 2011.
- [44] D. ASTM, on Soil and Rock: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³)) 1, ASTM international, (2007).
- [45] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, C. Namarak, V. Sata, Effects of binder and CaCl₂ contents on the strength of calcium carbide residue-fly ash concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33(3) (2011) 436-443.
- [46] D. ASTM, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, ASTM standard D, 2166 (2006).
- [47] J. He, Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications, (2012).
- [48] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak, Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, *Waste management*, 29(2) (2009) 539-543..
- Foundations, 56(2) (2016) 301-314.
- [38] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, A. Udomchai, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, *Applied clay science*, 127 (2016) 134-142.
- [39] S. Gurugubelli, D. Prasad, B. Eswararao, A laboratory study on the strength improve of expansive soil treated with calcium carbide residue and fly ash, *International Journal of innovative research in technology*, 3(12) (2017) 120-125.
- [40] A.A.S. Tigue, J.R. Dungca, H. Hinode, W. Kurniawan, M.A.B. Promentilla, Synthesis of a one-part geopolymer system for soil stabilizer using fly ash and volcanic ash, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, pp. 05017.
- [41] D. ASTM, Standard test method for particle-size analysis of soils, (2007).
- [42] A. ASTM, D4318-10 standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, *astm int*, West Conshohocken, Pa, (2010).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Pourabbas Bilondi, M. Mohsen Toufigh, V. Toufigh, Comparing the effects of two alkaline activators of sodium hydroxide and calcium carbide residue on geopolymeric stabilization of clay soils, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3923-3942.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20790.7527



