

بررسی عملکرد فعال کننده‌های شیمیایی نوین برای تثبیت خاک با استفاده از سرباره فعال شده با قلیا

امیرحسین رفیعان^۱، عبدالحسین حداد^{۲*}، ابراهیم نجفی کانی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

Haddad@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۸/۶/۷

چکیده

این پژوهش پارامترهای مکانیکی و دوام خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سرباره فعال شده توسط قلیا را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است. ماده پایه چسباننده استفاده شده در این پژوهش سرباره کوره ذوب آهن است که به میزان ۵ درصد وزن خاک خشک استفاده شده است. برای تثبیت خاک از سه نوع چسباننده به نام‌های اختصاری Ac_1 ، Ac_2 و Ac_3 استفاده شده است. چسباننده Ac_1 ترکیبی از سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات و سرباره، چسباننده Ac_2 ترکیبی از سدیم کربنات و کلسیم هیدروکسید و سرباره، و چسباننده Ac_3 ترکیبی از سدیم سولفات و کلسیم هیدروکسید و سرباره می‌باشند. نتایج حاصل از این نمونه‌ها با نمونه‌های تثبیت شده به وسیله سیمان پرتلند مقایسه شده است. نمونه‌های خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند به صورت SOPC، و نمونه‌های تثبیت شده با چسباننده‌های Ac_1 ، Ac_2 و Ac_3 به ترتیب $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ و $SGAc_3$ نام‌گذاری شده‌اند. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، چرخه‌های ذوب و یخبندان و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های تثبیت شده با این چسباننده‌ها انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که چسباننده Ac_3 در مقایسه با سایر چسباننده‌های پیشنهادی عملکرد بهتری را از نظر پارامترهای مقاومتی و دوام ارائه داد. در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند مقاومت ۰/۷۵ مگاپاسکال و خاک تثبیت شده با چسباننده‌های Ac_1 ، Ac_2 و Ac_3 به ترتیب مقاومت ۲/۶۳، ۲/۲۸ و ۴/۵ مگاپاسکال را کسب نمودند. همچنین نتایج آزمایش چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان داد نمونه‌های تثبیت شده با چسباننده‌های پیشنهادی از ثبات حجمی و دوام مناسبی برخوردارند. بیشترین میزان تغییرات حجمی که نمونه‌های SOPC، $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ و $SGAc_3$ پس از ۱۲ سیکل به ترتیب برابر ۱۲/۸۲، ۵/۹۳، ۶/۶۵ و ۴/۱۷ درصد است.

واژگان کلیدی: بهسازی، تثبیت خاک، سیمان پرتلند، سرباره کوره ذوب آهن، فعال کننده بازی، پارامترهای مکانیکی، دوام

۱- مقدمه

مراحل اجرایی در هر پروژه به شمار می‌آید. روش‌های

بهسازی بکار رفته برای غلبه بر مشکلات بسترهای ضعیف و

ایجاد بستر مناسب برای احداث سازه‌های عمرانی از مهم‌ترین

تاکتون مواد و ترکیبات متنوعی برای بهسازی و تثبیت ماسه‌های سست ارائه شده‌اند. استفاده از سرباره کوره ذوب آهن نیز از جمله مواد شناخته شده در این امر است. در این راستا در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در زمینه تولید سرباره فعال‌شده با قلیا روی انواع مواد آلومیناسیلیکاتی و برخی از موادی که دورریز صنعت هستند، انجام شده است. رفتار این چسباننده‌ها بسیار وابسته به انتخاب مناسب مواد پایه و فعال‌کننده بازی، و تعیین ترکیب درست برای ایجاد واکنش شیمیایی مناسب است [3,5-9]. برخی از موارد استفاده از این مصالح برای بهسازی اختلاط سطحی و عمیق و به منظور بهبود خواص مقاومتی خاک بستر در زیر خاکریزها، پی‌ها، دیوارهای حائل و موارد مشابه است [8-10].

۲- بهسازی خاک با سرباره فعال شده با قلیا

سرباره کوره ذوب آهن محصولی جانبی است که به هنگام جداسازی آهن در کوره‌های ذوب‌آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن به وجود می‌آید. سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن آهن به صورت مواد ناخالص باقی می‌ماند. این سرباره یکی از موادی است که پژوهشگران برای تثبیت خاک از آن به شیوه‌های گوناگون استفاده کردند.

بی‌۱ و همکاران روی تثبیت رس نرم ساحلی با استفاده از سرباره فعال‌شده با قلیا بر پایه سرباره کوره ذوب آهن برای ارزیابی پارامترهای مقاومتی و مورفولوژی آزمایش‌هایی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، میکروسکوپ الکترونی، و پراش اشعه ایکس انجام دادند. خاک بررسی شده در این پژوهش رس نرم با چگالی ذرات جامد ۲/۶۲، حد خمیری ۳۳ درصد، و حد روانی ۷۴ درصد است. اثر فعال‌کننده‌های قلیایی بر پایه محلول سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات با نسبت‌های مختلف را بر روی مقاومت خاک بررسی کردند. پارامتر دیگر مورد بررسی در این پژوهش مقاومت فشاری تک‌محوری است که با سیمان پرتلند معمولی مقایسه شده و نمونه‌ها به

مسئله‌دار همواره فضایی برای چالش و ابتکار عمل مهندسان بوده است. از دیرباز روشهای گوناگون و متعددی برای بهسازی زمین‌های نامناسب توسط پژوهشگران ارائه شده است و همچنان این مسیر در حال پیمودن و آزمودن تجربه‌های نوین است. بهره‌برداری از روش‌های نوین مبتنی بر توسعه پایدار، نیازمند جایگزینی مصالح سنتی رایج با مواد نوین با کیفیت بهتر و هزینه پایین‌تر و با آسیب کمتر به محیط‌زیست است. مشکلاتی که مصالح سنتی بهسازی مانند سیمان پرتلند برای محیط‌زیست ایجاد می‌کنند، مانند تولید بی‌رویه دی‌اکسیدکربن (CO_2) در اثر فرآیند تولید این مصالح، پژوهشگران را بر آن داشته تا به معرفی مصالح نوین روی آورند. این مصالح نوین باید علاوه بر اقتصادی بودن، دوست‌دار محیط‌زیست و در جهت توسعه پایدار نیز باشند. سهم صنعت سیمان از تولید دی‌اکسیدکربن ۵ تا ۷ درصد از کل دی‌اکسیدکربن تولیدی توسط بشر است. از این رو بخش زیادی از دی‌اکسید کربن ره‌اشده در محیط مرتبط با حجم انبوه تولید سیمان در جهان است. فرآیند تولید و استفاده از مصالح سنتی برای تثبیت و بهسازی خاک نیازمند مصرف انرژی بالا در مقابل تولید حجم انبوه گازهای گلخانه‌ای نظیر کربن مونوکسید (CO) می‌باشد. از این رو، روی آوردن به مصالح جدید، پایدار و دوستدار محیط‌زیست به عنوان جایگزین تثبیت‌کننده‌های سنتی لازم و ضروری است [1-3].

انواع روش‌های بهسازی شامل بهسازی مکانیکی، بهسازی هیدرولیکی، بهسازی فیزیکی و شیمیایی و بهسازی به وسیله عناصر مسلح‌کننده است. که در بهسازی مکانیکی متراکم کردن حجم خاک، در بهسازی هیدرولیکی زهکشی آب موجود میان حفرات، بهسازی به وسیله عناصر مسلح‌کننده عواملی مانند شبکه‌بندی مسلح و در بهسازی شیمیایی مواد شیمیایی مختلف موجب بهسازی بستر خاک می‌شود [4].

بسترهای ماسه‌ای سست به دلیل نسبت تخلخل بالا در شرایط خشک دارای مقاومت بسیار پایین و در شرایط اشباع دارای پتانسیل روانگرایی بالایی است. به این لحاظ بهسازی این بسترها برای بهبود پارامترهای مهندسی در پروژه‌های عمرانی بسیار پراهمیت و در بیشتر موارد ضروری است.

مقاومت بهتری دست یافته‌اند. نکته جالب در این پژوهش این است که مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با فعال‌کننده قلیایی بر پایه سدیم هیدروکسید در زمان عمل‌آوری ۱۸۰ روز مقدار کمی با افت مقاومت نسبت به ۹۰ روز روبه رو شده است و این امر احتمالاً به دلیل به وجود آمدن ریزترک و افزایش تخلخل در نمونه‌ها بیان شده است [13]. در پژوهش دیگری، یی و همکاران پارامترهای مکانیکی و ریزساختار خاک رس نرم ساحلی را بررسی کردند. در این پژوهش از سرباره فعال‌شده با قلیا بر پایه سرباره کوره ذوب آهن و فعال‌کننده آهک استفاده شده است. بدین منظور آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، پراش اشعه ایکس، و میکروسکوپ الکترونی تدوین شده است. این پژوهش نشان داد نمونه خاک تثبیت شده با نسبت آهک به سرباره ۰/۱ دارای مقاومت فشاری تک‌محوری ۱/۷ برابر نمونه تثبیت‌شده با سیمان پرتلند است. همچنین این پژوهش نشان می‌دهد به لحاظ اقتصادی و همچنین محیط‌زیستی استفاده از سرباره فعال‌شده با قلیا به عنوان جایگزین سیمان انتخاب مناسبی است [14].

یی و همکاران همچنین تثبیت دو نوع خاک را با استفاده از تثبیت‌کننده‌هایی مانند سرباره کوره ذوب آهن، آهک، منیزیم اکسید و سیمان بررسی کردند. در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، نفوذپذیری، پراش اشعه ایکس، و میکروسکوپ الکترونی انجام شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که سرباره مخلوط با منیزیم اکسید مقاومت بالاتری نسبت به مخلوط سرباره با آهک از خود نشان می‌دهد و همچنین محصول هیدراتاسیون آن بسیار مشابه با هیدراتاسیون سیمان پرتلند است [15].

دو و همکاران روی مشخصات فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک رس تثبیت شده با سرباره فعال‌شده با قلیا پژوهشی را ارائه دادند. در این پژوهش، سرباره کوره ذوب آهن به عنوان ماده پایه و ترکیب سدیم سیلیکات و پسماند کلسیم کاربید به عنوان فعال‌کننده استفاده شده است. ضریب

هدایت هیدرولیکی، مقاومت فشاری و مطالعات ریزساختاری مواردی هستند که در این پژوهش بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خاک تثبیت‌شده با سرباره فعال‌شده با قلیا سبک نسبت به خاک تثبیت‌شده با سیمان از پارامترهای جذب آب، نفوذپذیری و مقاومت بهتری برخوردار است [16]. یو و همکاران پژوهشی روی دوام خاک رس تثبیت‌شده با استفاده از سرباره فعال‌شده با قلیا انجام دادند. چسباننده مورد استفاده این پژوهش بر پایه سرباره کوره ذوب آهن و منیزیم اکسید بوده است. نمونه‌ها برای ارزیابی دوام در معرض سدیم سولفات قرار گرفته‌اند. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی، مقاومت و ریزساختار خاک تثبیت‌شده در معرض محیط سولفات بررسی شده است. آزمایش‌های پراش اشعه ایکس، و میکروسکوپ الکترونی برای مطالعات ریزساختار نمونه‌ها انجام شده است [17]. گودرزی و همکاران روی تثبیت خاک آلوده به روی با استفاده از سرباره کوره ذوب آهن تحقیقی را انجام داده‌اند. در این پژوهش از خاک رس کائولین و از فعال‌کننده‌های مختلف مانند سیمان و منیزیم اکسید استفاده شده است [18]. پژوهش دیگری توسط کواک و همکاران نیز برای بررسی چسباننده بر پایه سرباره کوره ذوب آهن نیز صورت گرفت، در این پژوهش اثر درصدهای مختلف (از نسبت‌های ۵ تا ۲۵ درصد وزنی خاک) از سیمان‌های بر پایه سرباره کوره ذوب آهن (GBFS) روی پلاستیسیته، پتانسیل تورمی، حدود آتربرگ و محتوای رسی خاک رس لای‌دار بررسی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که سرباره کوره ۱۵ درصد انتخاب بهینه برای تثبیت خاک است [19].

همان‌گونه که از پیشینه پژوهش مشاهده می‌شود، بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته برای تثبیت روی خاک رس انجام شده و از فعال‌کننده‌های متداولی استفاده شده است.

2. Yu

3. Goodarzi

4. Cokca

5. Granulated Blast Furnace Slag

1. Du

ضریب انحنای و ضریب یکنواختی این خاک برابر ۰/۹۹ و ۱/۱۵ می‌باشد.

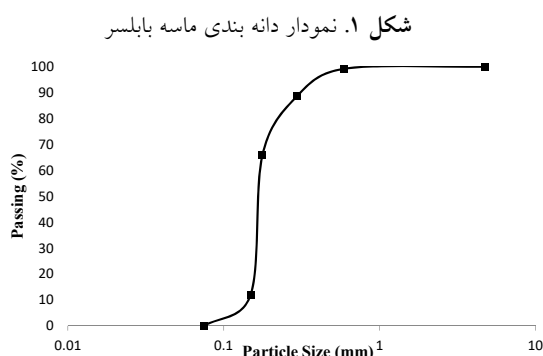


Fig. 1. Particle Size Distribution Curve of Babolsar Sand

سیمان پرتلند

برای بررسی و مقایسه عملکرد افزودنی‌های نوین از سیمان تیپ II کارخانه سیمان مشهد استفاده شده است. نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان به عنوان نمونه‌های شاهد قابل مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با سرباره فعال‌شده با قلیا است. ترکیبات شیمیایی این سیمان با استفاده از طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به دست آمده و در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند	
Chemical Component	Percentage
SiO ₂	21.99
Al ₂ O ₃	4.31
Fe ₂ O ₃	4.15
CaO	62.88
MgO	2.86
P ₂ O ₅	-
K ₂ O	0.47
Na ₂ O	0.21

Table 1. Chemical Component of Used Ordinary Portland Cement

سرباره

در این پژوهش از سرباره کوره ذوب آهن کارخانه ذوب آهن اصفهان استفاده شده است. این سرباره قبل از مصرف به مدت ۱۲ ساعت در آسیاب گلوله‌ای به صورت پودر درآمده تا واکنش‌پذیری بالایی داشته باشد. به طوری که این سرباره پس از عملیات آسیاب، ۷ درصد مانده روی الک شماره ۳۲۵ و

واکنش منابع آلومیناسیلیکاتی بستگی به آرایش شیمیایی، ترکیب شیمیایی، ترکیب کانی‌شناسی و ریخت‌شناسی آن دارد. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد و امکان‌سنجی استفاده از مواد شیمیایی نوین برای فعال کردن سرباره کوره ذوب آهن به منظور ساخت چسباننده برای تثبیت خاک است. نوآوری این کار مربوط به استفاده از مواد شیمیایی نوین به عنوان فعال‌کننده سرباره کوره ذوب آهن و استفاده از آن برای تثبیت خاک ماسه بابلسر است. این پژوهش قصد دارد با معرفی فعال‌کننده‌های نوین، اقتصادی و دوست‌دار محیط‌زیست، ماسه بد دانه‌بندی شده بابلسر را با استفاده از سرباره فعال‌شده با قلیا بر پایه سرباره کوره ذوب آهن تثبیت کند. آزمایش‌های صورت گرفته برای تعیین پارامترهای مکانیکی، دوام و ریزساختار تدوین شده است. برای این منظور آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، سیکل‌های ذوب و یخبندان، و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی تعریف شده است.

۳- مواد و روش ساخت نمونه

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

موادی که در این پژوهش به منظور تثبیت خاک در نظر گرفته شده است شامل خاک، سیمان، آب، سرباره کوره ذوب آهن و فعال‌کننده‌های مختلف بازی است که در ادامه معرفی شده‌اند.

خاک

ماسه بابلسر به عنوان خاکی سست و بد دانه‌بندی شده که دارای ساختاری تمیز و تقریباً گردگوشه است برای تثبیت مورد استفاده قرار گرفته است. این خاک طبق طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)^۱، SP نام‌گذاری می‌شود. نمودار دانه‌بندی این خاک در

شکل ۱ قابل مشاهده است. چگالی ویژه خاک استفاده شده در این پژوهش برابر ۲/۶۵، و وزن واحد حجم کمینه و بیشینه آن برابر ۱/۵ و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

1. Unified Soil Classification System

فعال کننده های بازی

در این پژوهش از سه نوع فعال کننده بازی برای فعال کردن سرباره کوره ذوب آهن استفاده شده است. این فعال کننده ها شامل ترکیبی از سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) و سدیم هیدروکسید (NaOH)، ترکیبی از سدیم کربنات (Na_2CO_3) و کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)_2)، و ترکیبی از سدیم سولفات (Na_2SO_4) و کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)_2) است.

سدیم هیدروکسید و کلسیم هیدروکسید مصرفی با خلوص ۹۹ درصد، و سدیم سیلیکات استفاده شده دارای ۳۲/۸۷ درصد از سیلیسیم اکسید (SiO_2)، ۲۴/۲۱ درصد از سدیم اکسید (Na_2O)، و ۴۲/۹۲ درصد از آب (H_2O) است. همچنین سدیم سولفات مصرفی با وزن مولکولی ۱۴۲ گرم بر مول و خلوص ۹۹ درصد، و سدیم کربنات مورد استفاده با وزن مولکولی ۱۰۶ گرم بر مول و خلوص ۹۹ درصد است. تمامی مواد شیمیایی ذکر شده از کارخانه تولید مواد شیمیایی مجلی تهیه شده اند.

۲-۳- روش ساخت نمونه ها

ایجاد واکنش های پوزولانی و تشکیل چسباننده میان دانه های خاک نیازمند ایجاد محیط بازی اولیه در سرباره است. بدین ترتیب لازم است در ابتدا سرباره با مواد شیمیایی بازی فعال شده تا ژل مورد نظر تشکیل شود. همان گونه که بیان شد، برای فعال سازی سرباره کوره ذوب آهن به عنوان ماده پایه تولید چسباننده های پیشنهادی، از سه نوع مختلف فعال کننده بازی برای تهیه چسباننده های Ac_1 ، Ac_2 ، و Ac_3 استفاده شده است.

برای نمونه های خاک تثبیت شده نسبت آب به کل مواد جامد برابر ۲۰ درصد که در حدود حد اشباع خاک ماسه مورد استفاده، در نظر گرفته شده است. این میزان آب به دو بخش تقسیم شده است که طبق محاسبات استوکیومتری مقداری از آن برای ساخت دوغاب چسباننده و مقدار باقی مانده برای خیساندن خاک خشک استفاده شده است. این روش به منظور شکل گیری بهتر واکنش های شیمیایی در چسباننده و همچنین همگنی مناسب مخلوط خاک و چسباننده صورت گرفته شده است.

چسباننده Ac_1 ترکیبی از سدیم هیدروکسید (NaOH) و سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) و سرباره است. برای ساخت این چسباننده، ابتدا سدیم هیدروکسید در آب حل شده و سپس

صفر درصد مانده روی الک شماره ۱۲۰ داشته است. شکل ۲ آنالیز پراش اشعه ایکس برای پودر سیمان پرتلند و سرباره کوره ذوب آهن و جدول (۲) عناصر شیمیایی سرباره کوره ذوب آهن حاصل از آزمایش آنالیز نقطه ای تصاویر میکروسکوپ الکترونی (EDX) استفاده شده را نشان می دهد.

جدول ۲. عناصر شیمیایی سرباره کوره ذوب آهن

Chemical Elements	Percentage
O	66.8
Mg	1.15
Al	2.95
Si	10.91
S	0.28
Ca	16.78
K	0.19

Table 2. Chemical Elements of Used GGBS^۱ Slag

شکل ۲. آنالیز پراش اشعه ایکس برای الف) پودر سیمان پرتلند، و ب) سرباره کوره ذوب آهن

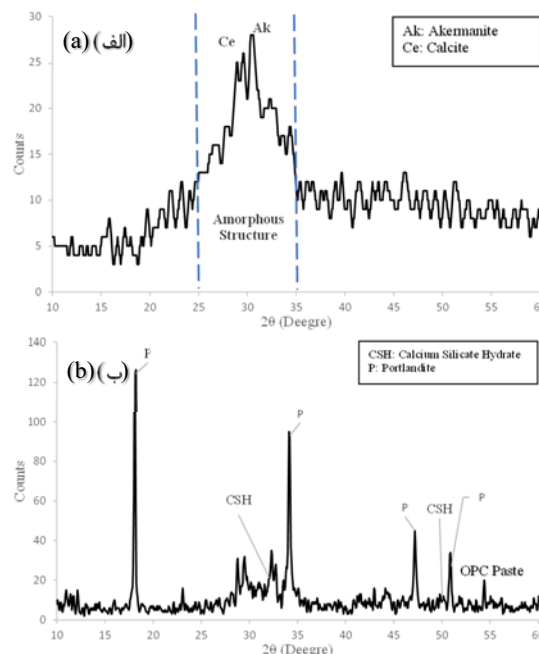


Fig. 2. Patterns of XRD for (a) OPC and (b) GGBS Powder

1. Ground Granulated Blast Slag

ابتدا وزن مخصوص بیشینه و کمینه طبق آزمایش‌های مربوطه برای ماسه بابلسر ۱/۵۰۲ و ۱/۸۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمده است، و سپس میزان وزن مخصوص خاک خشک مورد نیاز برای رسیدن به تراکم مورد نظر طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\gamma_{\min} - \gamma_d}{\gamma_{\min} - \gamma_{\max}} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن حجم مولد نمونه و همچنین محاسبه وزن مخصوص خشک که از رابطه ۳، ۱/۶۴ به دست آمد، می‌توان از رابطه زیر میزان وزن خاک خشک مورد نیاز را برای تراکم ۵۰ درصد محاسبه کرد:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (4)$$

لازم به ذکر است که خاک مخلوط با چسباننده در سه لایه و به میزان یکسان درون قالب ریخته شده و با اعمال تراکم مناسب متراکم شده است. در این پژوهش از روش اختلاط سرباره فعال‌شده با قلیا و خاک به صورت روش مرطوب استفاده شده است. از این نمونه‌ها برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و چرخه‌های ذوب و یخبندان مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش میکروسکوپ الکترونی حاصل از تکه‌های باقی مانده از نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش مقاومت تک‌محوری در هر ترکیب پس از ۹۰ روز عمل‌آوری بوده است.

۳-۳- برنامه آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با چسباننده‌های سیمان پرتلند، Ac₁، Ac₂ و Ac₃ به ترتیب SOPC، SGAc₁، SGAc₂ و SGAc₃ نام‌گذاری شده‌اند. ترکیبات و نوع چسباننده تثبیت‌کننده برای هر نمونه در جدول (۳) بیان شده است. پس از ساخت نمونه‌ها، در دمای اتاق و رطوبت ۹۵ درصد مورد عمل‌آوری قرار گرفته تا واکنش‌های ایجاد شده بین دانه‌های خاک و چسباننده کامل شود. برای این منظور برای انجام آزمایش مقاومت فشاری مدت زمان‌های عمل‌آوری ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز و برای انجام آزمایش دوام مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در نظر گرفته شده است.

سدیم سیلیکات به محلول اضافه می‌شود. با اضافه کردن سرباره به محلول چسباننده Ac₁ تهیه می‌شود. مقادیر سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و آب بر اساس ۱۸ درصد از سدیم اکسید (Na₂O)، نسبت سیلیسیم اکسید به سدیم اکسید (SiO₂/Na₂O) برابر ۰/۲ و نسبت آب به سایر مواد چسباننده (W/T) برابر با ۲/۸۶ در نظر گرفته شده است.

چسباننده Ac₂ متشکل از ترکیب سدیم کربنات (Na₂CO₃) و کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)₂) و سرباره می‌باشد. برای ساخت این چسباننده ابتدا کلسیم هیدروکسید با سدیم کربنات به وسیله همزن به طور مناسبی مخلوط شده و سپس آب به آن افزوده می‌شود و سوسپانسیون آماده شده به سرباره اضافه شده و چسباننده Ac₂ تهیه می‌شود. چسباننده Ac₃ ترکیبی از سدیم سولفات (Na₂SO₄) و کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)₂) و سرباره می‌باشد. برای تهیه این چسباننده ابتدا سدیم سولفات با آب مخلوط شد و سپس کلسیم هیدروکسید به آن اضافه می‌شود، در نهایت سوسپانسیون تولید شده به مدت حداقل ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه و در دمای اتاق قرار گرفته و سپس به سرباره اضافه شده و چسباننده Ac₃ آماده می‌شود. برای تهیه چسباننده‌های Ac₂ و Ac₃، مواد استفاده شده قرار گرفته بر اساس روابط استوکیومتری به گونه‌ای محاسبه شده‌اند که طبق روابط ۱ و ۲ مقدار ۵ درصد وزنی مواد، سدیم هیدروکسید تولید شود. همچنین نسبت آب به کل مواد جامد چسباننده برابر ۰/۴ است.



چسباننده‌های پیشنهادی با روشی که بیان شد تهیه می‌شوند و سپس به مخلوط خاک و آب که به مدت ۳ دقیقه در دستگاه میکسر قرار گرفته شده اضافه می‌شود تا به مدت ۱۰ دقیقه به خوبی مخلوط شود. چسباننده‌ها به نسبت ۵ درصد وزنی خاک اضافه شده است. سپس مخلوط خاک و سرباره فعال‌شده با قلیا را در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر متراکم شده تا مخلوط به تراکم مورد نظر ۵۰ درصد دست یابد، این تراکم نسبی در حالت بدبینانه برای تثبیت در نظر گرفته شده است. نحوه دست‌یابی به این تراکم بدین شکل است که

۴- بررسی و تفسیر نتایج

به منظور شناخت بهتر پارامترهای مکانیکی و دوام نمونه‌های تثبیت شده، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و چرخه‌های ذوب و یخبندان و همچنین برای بررسی مورفولوژی نمونه‌های تثبیت شده، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روی آن‌ها انجام شده است. انتظار این است این مواد بتوانند سازوکار مناسبی را به عنوان تثبیت‌کننده ارائه کنند.

۴-۱- مقاومت فشاری

شکل ۳ مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که مقاومت ۱۴، ۲۸، و ۹۰ روز خاک تثبیت‌شده با سیمان پرتلند (نمونه SOPC) به ترتیب برابر ۰/۴۳ و ۰/۴۲ و ۰/۷۵ مگاپاسکال است، از این مقادیر به عنوان مقادیر مقایسه‌ای با مقاومت فشاری نمونه‌های $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ و $SGAc_3$ استفاده می‌شود.

نمونه‌های $SGAc_1$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مقاومت ۱/۱۵ و ۱/۹۳ و ۲/۶۳ مگاپاسکال هستند. پس از ۹۰ روز، این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده سیمان پرتلند در همان زمان عمل‌آوری، ۳/۵ برابر است. نمونه‌های $SGAc_2$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مقاومت ۰/۴۴ و ۱/۳۲ و ۲/۲۸ مگاپاسکال هستند. پس از ۹۰ روز، این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده سیمان پرتلند در همان زمان عمل‌آوری، ۳/۰۴ برابر است. نمونه‌های $SGAc_3$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مقاومت ۱/۲۳ و ۲/۳۴ و ۴/۵ مگاپاسکال می‌باشند. پس از ۹۰ روز، این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده سیمان پرتلند در همان زمان عمل‌آوری، ۶ برابر است. در همه ترکیبات مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در میان نمونه‌های تثبیت‌شده با چسباننده‌های پیشنهادی، این افزایش در نمونه $SGAc_2$ بیشترین رشد و در نمونه $SGAc_1$ کمترین رشد را داشته است.

جدول (۴) مقادیر کرنش متناظر با شکست نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که

روی نمونه‌های آماده شده آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شده است. سرعت بارگذاری دستگاه آزمایش تک‌محوری برابر ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه و به روش کرنش کنترل‌شده بوده است. برای هر سری آزمایش مقاومت تک‌محوری، سه عدد نمونه مشابه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته شده است.

آزمایش دوام چرخه‌های ذوب و یخبندان بر طبق استاندارد ASTM D560 انجام شده است. بر اساس این استاندارد، شکل انجام آزمایش بدین گونه است که پس از ساخت نمونه‌ها بایستی آنها را به مدت ۱۲ ساعت در کوره با دمای 5 ± 110 درجه سانتی‌گراد خشک نمود، و بلافاصله به مدت ۷ روز نمونه‌ها را در اتاقک مرطوب قرار داد.

جدول ۳. ترکیبات و نوع چسباننده تثبیت‌کننده برای هر نمونه

Sample Name	Paste	Composition
SOPC	OPC	Soil + OPC paste
$SGAc_1$	Activated slag by Ac_1	Soil + Activated slag by Ac_1
$SGAc_2$	Activated slag by Ac_2	Soil + Activated slag by Ac_2
$SGAc_3$	Activated slag by Ac_3	Soil + Activated slag by Ac_3

Table 3. Composition and Type of Binders for Each Stabilized Samples

سپس نمونه‌ها آماده قرارگیری در سیکل‌های یخبندان و ذوب هستند. برای این منظور برای هر ترکیب ۲ نمونه به نام‌های نمونه شماره ۱ و نمونه شماره ۲ ساخته شده است. هدف از ساخت نمونه شماره ۱ تعیین میزان تغییرات حجم و هدف از ساخت نمونه شماره ۲ تعیین افت وزنی خاک تثبیت‌شده در هر مرحله است.

برای انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی از دستگاه VEGA\TESCAN-LMU مرکز پژوهش متالورژی رازی استفاده شده است. ابتدا نمونه‌ها در هوای آزاد خشک شده و سپس پوشش‌دهی طلا روی سطح آن‌ها انجام شده است. نمونه‌های اعمال شده در این آزمایش با زمان عمل‌آوری ۹۰ روز و با بزرگ‌نمایی ۳۰۰ برابر بوده است. هدف از این آزمایش مشاهده مورفولوژی ناحیه انتقالی میان دانه‌های خاک و چسباننده افزودنی روی نمونه‌های $SGAc_2$ و $SGAc_3$ است.

به نظر می‌رسد مقدار زمان لازم برای رسیدن مقاومت نهایی نمونه‌های $SGAc_2$ نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. همان‌گونه که بیان شد، این نمونه‌ها در کوتاه مدت (۱۴ و ۲۸ روز) مقاومت کمتری نشان می‌دهند اما در ۹۰ روز به مقاومت قابل توجهی دست یافته‌اند. دلیل این مسئله می‌تواند به واکنش‌پذیری کمتر سدیم کربنات (Na_2CO_3) به دلیل بازی بودن کمتر و زمانبر بودن تشکیل واکنش‌های پوزولانی در این نمونه‌ها بازگردد. همچنین کلسیت (Calcite) که در تثبیت خاک می‌تواند موثر باشد، یکی از محصولات واکنش سدیم کربنات (Na_2CO_3) و کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) است که با گذشت زمان مقدار آن افزایش می‌یابد و این امر ممکن است به زمان بیشتری نیاز داشته باشد.

جدول ۴. مقادیر کرنش متناظر با شکست نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

Sample Name	Failure Strain (%)		
	14 days of curing	28 days of curing	90 days of curing
SOPC	1.5	1.7	1.9
$SGAc_1$	1.1	2.03	2.1
$SGAc_2$	2.5	2.3	2.2
$SGAc_3$	3.5	2.6	2.2

Table 4. Failure strain of samples in different curing time

۴-۲-۴- مدول الاستیسیته

مقادیر مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند، و چسباننده‌های $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ ، و $SGAc_3$ پس از ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در شکل ۴ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته بررسی شده در این پژوهش از نوع سکانتی بوده و طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$E_s = \frac{\sigma_{Failure}}{\epsilon_{Failure}} \quad (5)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدول الاستیسیته ۱۴، ۲۸، و ۹۰ روز خاک تثبیت‌شده با سیمان پرتلند به ترتیب برابر

مشاهده می‌شود، با افزایش زمان عمل‌آوری مقادیر کرنش متناظر با شکست نمونه‌های SOPC و $SGAc_1$ افزایش می‌یابد در حالی که کرنش متناظر با شکست نمونه‌های $SGAc_2$ و $SGAc_3$ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که مقادیر تغییرات کرنش متناظر با شکست نمونه‌ها ناچیز است. این تغییرات جزئی می‌تواند بیانگر این مسئله باشد که نمونه‌ها در کوتاه مدت به مقادیر نهایی کرنش متناظر با شکست رسیده‌اند. همچنین میزان تغییرات کرنش متناظر با شکست نمونه‌ها در ۹۰ روز در مقایسه با ۲۸ روز بسیار ناچیز است.

وجود آهک در فعال‌کننده پیشنهادی سبب افزایش قلیایی چسباننده تثبیت‌کننده شده و این امر سبب تسریع روند واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه تثبیت بهتر و مقاومت بالاتر نمونه‌های خاک می‌شود. همچنین سرباره فعال‌شده با فعال‌کننده Ac_1 همانند سرباره فعال‌شده با فعال‌کننده Ac_3 به مقاومت بالایی در کوتاه‌مدت رسیده است. از این چسباننده‌ها می‌توان برای بهسازی بستر پروژه‌هایی که به مقاومت بالا در کوتاه‌مدت نیاز دارند استفاده کرد. نکته دیگری که از این نتایج می‌توان یافت این است که با توجه به مقاومت بسیار بالایی که درصدهای به نسبت کم چسباننده‌های پیشنهادی به آنها دست یافته‌اند، برای رسیدن به مقاومت مشخص، شاید بهتر باشد از درصدهای کمتری از این چسباننده‌ها در مقایسه با سیمان پرتلند استفاده کرد. این امر علاوه بر مزیت‌های محیط‌زیستی، سبب بهبود پارامترهای اقتصادی پروژه بدون تغییر در مقاومت مطلوب می‌شود.

شکل ۳. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های خاک تثبیت‌شده

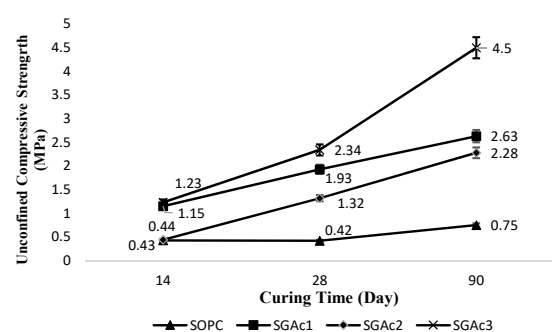


Fig. 3. UCS Values for Stabilized Soil Samples

توانست ۷ سیکل را طی نموده و پس از آن گسیخته شد. میزان تغییرات حجم در هر سیکل بر اساس تغییرات حجم نمونه اولیه محاسبه شده است. طبق رابطه ۴ می‌توان تغییرات حجم هر مرحله از سیکل را نسبت به حجم اولیه نمونه محاسبه کرد. لازم به ذکر است حجم نمونه اولیه، حجم نمونه‌ای در نظر گرفته شده است که همانطور که گفته شد پس از ۷ روز از اتاقک مرطوب بیرون آورده شده است.

$$VolumeChange = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \quad (6)$$

که V_0 برابر حجم اولیه خاک و V_i برابر حجم خاک پس از هر سیکل می‌باشد.

در شکل ۵ تغییرات حجم نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند، و چسباننده‌های Ac_1 ، Ac_2 ، و Ac_3 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری پس از هر سیکل مشاهده می‌شود.

بیشترین میزان تغییر حجمی که نمونه SOPC تجربه می‌کند برابر ۱۲/۸۲ درصد و برای $SGAc_1$ برابر ۵/۹۳، برای $SGAc_2$ برابر ۶/۶۵، برای $SGAc_3$ برابر ۴/۱۷ درصد است. مشخص است که میزان تغییر حجم نمونه‌های تثبیت شده با چسباننده‌های پیشنهادی کمتر از نمونه تثبیت شده با سیمان است. کمترین تغییر حجم مربوط به نمونه $SGAc_3$ است، این نشان می‌دهد تثبیت خاک با چسباننده‌های پیشنهادی می‌تواند ثبات حجمی بیشتری را نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان به همراه داشته باشد. ثبات حجمی مناسب در سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌تواند باعث عدم تخریب خاک تثبیت شده بر اثر تغییرات آب و هوایی در گذر زمان در مناطق مختلف شود.

افت وزنی خاک تثبیت شده در هر سیکل بر اساس تغییرات وزن نمونه اولیه محاسبه شده است. طبق رابطه ۵ می‌توان تغییرات افت وزنی خاک هر مرحله از سیکل را نسبت به وزن اولیه نمونه محاسبه کرد. لازم به ذکر است وزن نمونه اولیه، وزن نمونه‌ای در نظر گرفته شده است که همانطور که گفته شد پس از ۷ روز از اتاقک مرطوب بیرون آورده شده است.

$$Soil - CementLoss = \frac{W_i - W_0}{W_0} \quad (7)$$

نمونه‌های $SGAc_1$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مدول الاستیسیته ۹۲/۸۹ و ۹۴/۵۵ و ۱۲۳/۶۷ مگاپاسکال است. نمونه‌های $SGAc_2$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مدول الاستیسیته ۱۷/۶۵ و ۵۵/۸۷ و ۹۹/۷۳ مگاپاسکال هستند. نمونه‌های $SGAc_3$ در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب دارای مدول الاستیسیته ۳۴/۷۷ و ۹۰/۹۶ و ۲۰۳/۷۵ مگاپاسکال است. شکل ۴ مقادیر مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت شده را به صورت مقایسه‌ای در طول زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، تقریباً در تمامی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۴. مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک تثبیت شده پس از مدت زمان عمل‌آوری ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز

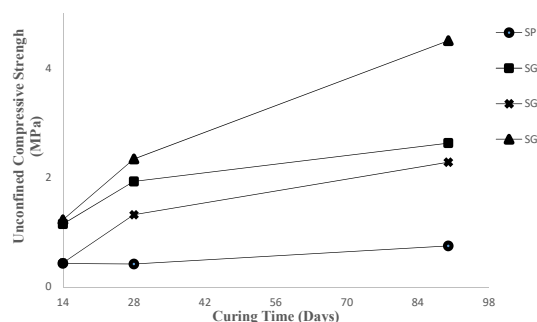


Fig. 4. Elastic Modulus for Stabilized Soil Samples after 14, 28, and 90 Days of Curing

۴-۳- دوام نمونه‌های تثبیت شده

علاوه بر مطالعه رفتار مکانیکی، بررسی پارامترهای دوام نمونه‌ها امر مهمی تلقی می‌شود. بررسی دوام این ترکیبات به مهندسان کمک می‌کند بتوانند ثبات مخلوط خاک و چسباننده را ارزیابی کنند و امکان‌سنجی استفاده از آن‌ها را برای پروژه‌های مربوطه در نظر بگیرند. هدف از آزمایش چرخه‌های ذوب و یخبندان، بررسی پارامترهای تغییرات حجم و افت وزنی خاک تثبیت شده پس از هر بار برس کردن به منظور ارزیابی دوام خاک تثبیت شده با چسباننده‌های پیشنهادی است.

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد نمونه‌های خاک تثبیت شده با چسباننده‌های سیمان پرتلند، Ac_1 و Ac_3 تمامی ۱۲ سیکل را طی نموده ولی نمونه‌های تثبیت شده با چسباننده Ac_2

می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ژل سیمان تشکیل شده توانسته است به صورت تقریباً پراکنده دانه‌های خاک را تثبیت کند.

شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه SOPC

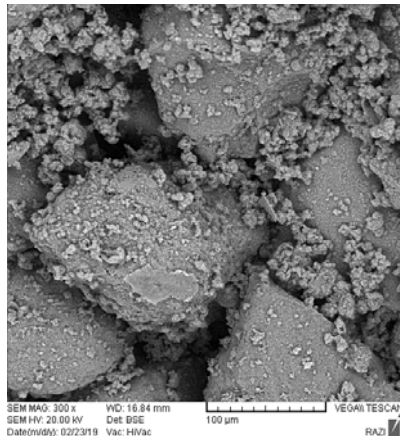


Fig. 7. SEM Image of SOPC in Magnification of 300x

در شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با چسباننده‌های Ac_2 و Ac_3 و با بزرگ‌نمایی ۳۰۰ را نشان داده شده است. این شکل ناحیه انتقالی میان دانه‌های خاک و چسباننده تشکیل شده را نشان می‌دهد. چگونگی عملکرد ژل ایجاد شده برای چسباندن دانه‌های خاک به یکدیگر و در نتیجه تثبیت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی در این بزرگ‌نمایی نشان داده شده است. همان‌گونه که از مورفولوژی سطح نمونه‌ها مشخص است، به نظر می‌رسد پیوستگی میان دانه‌های خاک در اثر وجود چسباننده میان آن‌ها به طور مناسبی فراهم شده است. نقاط A و C نشان‌دهنده دانه‌های خاک و همچنین نقاط B و D نشان‌دهنده چسباننده ایجاد شده در نمونه‌های $SGAc_2$ و $SGAc_3$ تثبیت شده است.

با مقایسه شکل‌های (۷ و ۸) به نظر می‌رسد که دانه‌های خاک در شکل (۸) به صورت متراکم‌تر به یکدیگر چسبیده شده‌اند. در حالی که این دانه‌ها در شکل (۷) و نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند به صورت کاملاً مجزا قابل تشخیص می‌باشند. این نشان می‌دهد که چسباننده‌های پیشنهادی به صورت بهتری توانسته است دانه‌های خاک را به یکدیگر متصل نماید.

که W_0 برابر وزن اولیه نمونه شماره ۲ و W_i برابر وزن نمونه شماره ۲ پس از هر بار برس کردن در هر سیکل است.

شکل ۵. تغییرات حجم نمونه‌های (الف) SOPC، (ب) $SGAc_1$ ، (پ) $SGAc_2$ ، و (ت) $SGAc_3$ در آزمایش چرخه‌های ذوب و یخبندان

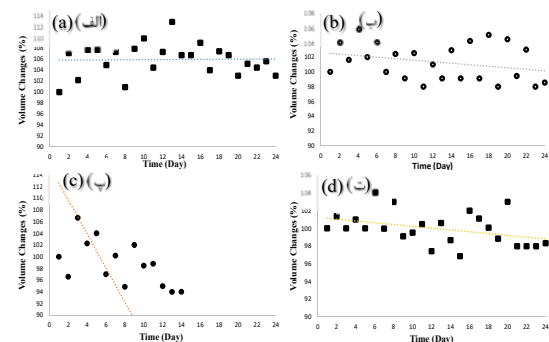


Fig. 5. Volume Changes for (a) SOPC, (b) $SGAc_1$, (c) $SGAc_2$, (d) $SGAc_3$ Samples During Freezing-Thawing Cycles

در شکل (۶) تغییرات افت وزنی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند، و چسباننده‌های Ac_1 ، Ac_2 ، و Ac_3 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری پس از هر سیکل مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند افت وزنی خاک تثبیت‌شده برای نمونه‌های $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ ، و $SGAc_3$ مشابه نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند است. بیشترین افت وزنی خاک تثبیت‌شده پس از برس کردن نمونه برای SOPC برابر ۵۲/۱۱ درصد است. این مقدار برای نمونه‌های $SGAc_1$ و $SGAc_3$ به ترتیب برابر ۶۱/۹۷، ۷۶/۸۸ درصد است.

شکل ۶. درصد تغییرات از دست رفتن خاک نمونه‌های خاک تثبیت شده

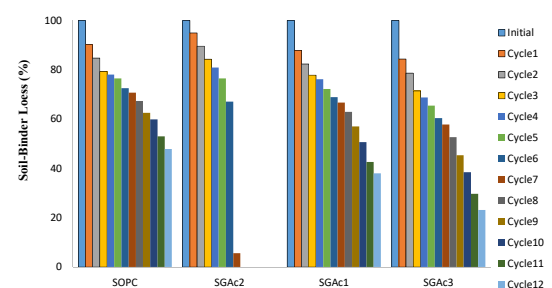


Fig. 6. Soil-Cement Losses for Stabilized Soil Samples During Freezing-Thawing Cycles

۴-۴- مورفولوژی نمونه‌های تثبیت شده

شکل (۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند (SOPC) را با بزرگ‌نمایی ۳۰۰ نشان

شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های الف) $SGAc_2$ و ب) $SGAc_3$ در بزرگنمایی ۳۰۰ برابر

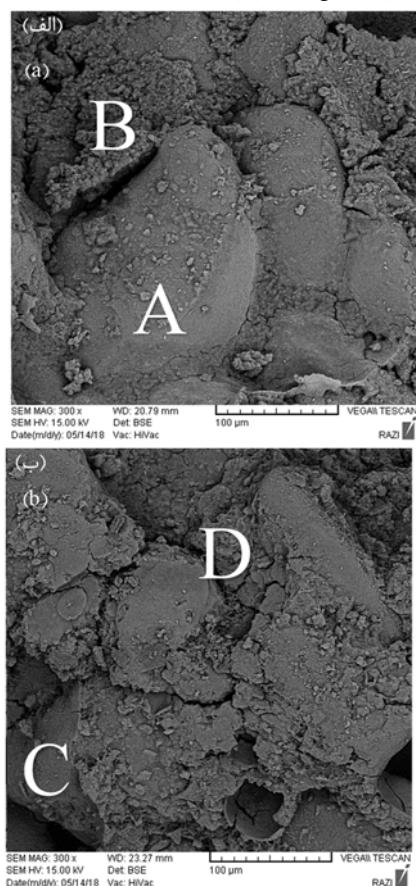


Fig. 8. SEM Images of (a) $SGAc_2$ and (b) $SGAc_3$ in Magnification of 300x

- نمونه‌های SOPC، $SGAc_1$ ، و $SGAc_3$ توانستند ۱۲ سیکل و نمونه $SGAc_3$ توانست ۷ سیکل را در آزمایش چرخه‌های ذوب و یخبندان طی کنند. نمونه‌های $SGAc_1$ و $SGAc_3$ ثبات حجمی مناسبی را نشان دادند. تغییرات حجمی نمونه‌های SOPC، $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ ، و $SGAc_3$ به ترتیب برابر ۱۲/۸۲، ۵/۹۳، ۶/۶۵، و ۴/۱۴ درصد بوده است. ثبات حجمی مناسب در چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌تواند باعث عدم تخریب خاک تثبیت شده بر اثر تغییرات آب و هوایی در گذر زمان در مناطق مختلف شود.
- مطالعات ریزساختار و تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های خاک تثبیت شده با چسباننده‌های پیشنهادی و مقایسه آن با تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه تثبیت

۵- نتیجه‌گیری

بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته در این پژوهش نشان داد که بهسازی خاک ماسه با استفاده از سرباره فعال‌شده با فعال‌کننده‌های Ac_1 ، Ac_2 ، و Ac_3 امکان‌پذیر است. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- تثبیت خاک ماسه بد دانه‌بندی شده با استفاده از چسباننده‌های Ac_1 ، Ac_2 ، و Ac_3 مقاومت فشاری بیشتری نسبت به تثبیت این خاک با سیمان پرتلند نشان می‌دهد. این مقادیر برای نمونه‌های $SGAc_1$ ، $SGAc_2$ ، و $SGAc_3$ پس از ۹۰ روز عمل‌آوری به ترتیب برابر با ۲/۶۳، ۲/۲۸، و ۴/۵ مگاپاسکال است، در حالی که برای نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند این مقدار برابر ۰/۷۵ مگاپاسکال است. به نظر می‌رسد که مقدار زمان لازم برای رسیدن مقاومت نهایی نمونه‌های تثبیت‌شده با سرباره فعال‌شده با فعال‌کننده Ac_2 نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. این نمونه‌ها در کوتاه مدت (۱۴ و ۲۸ روز) مقاومت کمتری نشان می‌دهند اما در ۹۰ روز به مقاومت قابل توجهی دست یافته‌اند. دلیل این مسئله می‌تواند به واکنش‌پذیری کمتر سدیم کربنات (Na_2CO_3) به دلیل بازی بودن کمتر و زمان‌بر بودن تشکیل واکنش‌های شیمیایی در این نمونه‌ها بازگردد.
- علت افزایش مقاومت نمونه‌ها در اثر گذشت زمان عمل‌آوری ممکن است ناشی از اثر سیمان‌تاسیون باشد، بدین‌گونه که در کوتاه‌مدت تبادل یونی و هیدراتاسیون، و در بلندمدت واکنش‌های پوزولانی روی افزایش مقاومت خاک تاثیر می‌گذارد. وجود آهک در فعال‌کننده پیشنهادی می‌تواند سبب افزایش قلیایی محیط تثبیت‌کننده در کوتاه مدت شده و این امر سبب تسریع روند واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه تثبیت بهتر و مقاومت بالاتر نمونه‌های خاک می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نمونه‌های $SGAc_2$ بیشترین تغییرات مقاومتی در طول زمان عمل‌آوری و نمونه‌های $SGAc_3$ کمترین تغییرات مقاومتی را در طول زمان عمل‌آوری داشته است.

- Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Journal of Cement and Concrete Composites*. 34(1):25–33.
- [8] Ghadir P, Ranjbar N. 2018 Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Journal of Construction and Building Materials* 188:361–71.
- [9] Allahverdi A, Najafi Kani E. 2009 Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *International Journal of Civil Engineering*. 7(3):154–60.
- [10] Alsafi S, Farzadnia N, Asadi A, Kim B. 2017 Collapsibility potential of gypseous soil stabilized with fly ash geopolymer; characterization and assessment. *Journal of Construction and Building Materials*, 137:390–409.
- [11] Liu Z, SM, Cai CS, F, Liu F, 2014 Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash – Based Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*;1–8.
- [12] Sargent P, Hughes PN, Rouainia M, White ML. 2013 The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Journal of Engineering Geology*;152(1):96–108.
- [13] Yi Y, Li C, Liu S, Asce M. 2010 Alkali-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag for Stabilization of Marine Soft Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 11(4):246–50.
- [14] Yi Y, Gu L, Liu S. 2015 Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. *Journal of Applied Clay Science*;103:71–6.
- [15] Yi Y, Asce SM, Liska M, Al-tabbaa A. 2014 Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS , MgO , Lime , and PC. 267–74. *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [16] Du Y, Yu B, Liu K, Jiang N, Asce SM, Liu MD. 2015 Physical , Hydraulic , and Mechanical Properties of Clayey Soil Stabilized by Lightweight Alkali-Activated Slag Geopolymer. *Journal of Materials in*
- شده با سیمان پرتلند دلایل احتمالی بالا بودن مقاومت فشاری نمونه $SGAc_3$ را مشخص می‌کند. موفولوژی این نمونه نشان می‌دهد چسباننده Ac_3 به طور موثرتری دانه‌های خاک را به هم چسبانده است.
- با توجه به مقاومت‌های بالای چسباننده‌های پیشنهادی، برای دستیابی به مقاومت مشخص در پروژه‌های ژئوتکنیک ممکن است بتوان از درصد‌های کمتری از این مواد استفاده کرد و این امر در اقتصادی شدن مصالح جایگزین می‌تواند موثر باشد. همچنین در صورت انجام آزمایش‌های تکمیلی، از چسباننده‌های پیشنهادی می‌توان علاوه بر تثبیت سطحی خاک، به عنوان ماده تزریقی در گروتینگ و اختلاط عمیق استفاده کرد.
- ## ۶-مراجع
- [1] McLellan BC, Williams RP, Lay J, van Riessen A, Corder GD. 2011 Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 19(9–10):1080–90.
- [2] Li N, Shi C, Wang Q, Zhang Z, Ou Z. 2017 Composition design and performance of alkali-activated cements. *Journal of Materials and Structures*. 50(3):1–11.
- [3] Mehdizadeh H, Najafi Kani E. 2018 Rheology and apparent activation energy of alkali activated phosphorous slag. *Journal of Construction and Building Materials*;171:197–204.
- [4] Hausmann MR. 1989 Engineering principles of ground modification. McGraw-Hill College.
- [5] Rafiean AH, M, Kani EN, Haddad A. 2020 Mechanical and Durability Properties of Poorly Graded Sandy Soil Stabilized with Activated Slag. *Journal of Materials in Civil Engineering* ;32(1):1–14.
- [6] Changizi F, Haddad A. 2014 Stabilization of Subgrade Soil for Highway by Recycled Polyester Fiber. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*; 2(1):93–105.
- [7] Najafi Kani E, Allahverdi A, Provis JL. 2012

- 2009 Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: Remnant fly ash particles. Journal of materials science. 44(2):608–19.
- [19] Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT. 2012 Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. Journal of Construction and Building Materials. 29:167–74.
- Civil Engineering 1–10.
- [17] Yu B-W, Du Y-J, Jin F, Liu C-Y. 2016 Multiscale Study of Sodium Sulfate Soaking Durability of Low Plastic Clay Stabilized by Reactive Magnesia-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(6):04016016.
- [18] Lloyd RR, Provis JL, Van Deventer JSJ.

Performance Evaluation of Novel Chemical Activators for Soil Stabilization by Activated Slag

Amir Hossein Rafiean¹, Abdolhosein Haddad², Ebrahim Najafi Kani³

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

2- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

3- Assistant Professor, Faculty of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Semnan University

Haddad@semnan.ac.ir

Abstract

Poorly graded sandy soil could cause numerous geotechnical problems in large areas across the world. Weak soils have the insufficient bearing capacity and this may be the cause of many issues in road infrastructures, embankments, buildings foundation, and other geotechnical projects. Stabilizing the soil by chemical stabilizers like ordinary Portland cement (OPC) is one of the most conventional methods for enhancing the engineering proprieties of soil, usually by different percentages of binder/soil ratio. Some environmental and economical issues of utilizing OPC as a binder are the serious concern of researches during few decades. Alkali-activated materials (AAM), with a lower destructive impact on the environment and more economical profits, have been one of the attractive materials as a new generation of binders recently. These materials can be utilized in different geotechnical applications such as : soil stabilizing, different kinds of mixing methods, and grouting. The current study has aimed to evaluate the mechanical and durability properties of stabilized sandy soil by AAM, the used slag for AAM binder is Ground Granulated Blast furnace Slag (GGBS) and the slag is activated by different kinds of novel alkali activators. The activators are a combination of Na_2SiO_3 and NaOH , Na_2CO_3 and Ca(OH)_2 , and Na_2SO_4 and Ca(OH)_2 ; namely, Ac_1 , Ac_2 , and Ac_3 , respectively. In order to evaluate mechanical properties of stabilized soil samples, unconfined compressive strength (UCS) test, and to investigate the durability properties of stabilized soil samples, freezing-thawing cycles are applied to specimens. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) tests are implemented on Ac_2 - and Ac_3 -based stabilized samples to investigate the morphological aspects of stabilized soil. Studied parameters of this study are the effect of curing time on the mechanical behavior of stabilized soil samples, and the effect of types of activator on mechanical and durability properties (volume changes and soil-cement losses) of stabilized soil samples. Curing time of 14, 28, and 90 days are considered for the UCS test, and 28 days are considered for freezing-thawing cycles durability tests. The amount of binder for soil stabilization is considered in a constant value of 5 wt.% of dry soil for UCS and freezing-thawing tests. The 90-day UCS value for OPC-based stabilized sample is 0.75 MPa, for As_1 -based stabilized sample is 2.63 MPa, for As_2 -based stabilized sample is 2.28 MPa, and for As_3 -based stabilized sample is 4.5 MPa. As seen, AAM-based stabilized soil samples show greater UCS value in the same binder/soil ratio and curing time. As_3 showed the most effective activator with higher UCS value as a soil stabilizer. In the test of freezing-thawing, except As_2 -based stabilized sample, other samples survived all 12 cycles. As_2 -based soil stabilized sample only survived 7 cycles of freezing and thawing. The most amount of volume changes for OPC-based stabilized soil is 12.82% for 12 cycles, while this amount is 6.65% for As_2 -based stabilized soil for 7 cycles. As_1 - and As_3 -based stabilized soil have shown fairly stable volume changes; i.e. with the most amounts of volume changes of 5.93% and 4.17% for 12 cycles. These results show AAM-based stabilized samples are more soundness than OPC-based stabilized samples and are more stable during volume changes.

Keywords: Soil Stabilization; Ordinary Portland Cement; Alkali-Activated Materials; Alkali Activator; Mechanical Properties; Durability