

بررسی اثر فعال سازی قلیایی بر مقاومت، دوام و ریز ساختار خاک رسی تثبیت شده با ژئوپلیمر

حسن شرفی^{۱*}، حمیدرضا اکبری^۲، فاطمه رنجبر^۳

- ۱- دانشیار، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه
- ۲- دکترای ژئوتکنیک؛ گروه عمران؛ واحد همدان؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ همدان؛ ایران
- ۳- ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- h_sharafi@razi.ac.ir

۲- h.akbari0000@iaui.ac.ir

۳- f.ranjbar@stu.razi.ac.ir

چکیده:

خاک‌های رسی کائولینیتی به دلیل مقاومت مکانیکی پایین و تراکم‌پذیری زیاد، از چالش‌های مهم پروژه‌های ژئوتکنیکی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، اثر فعال‌سازی قلیایی بر بهبود رفتار مکانیکی و دوام خاک رسی تثبیت‌شده بررسی شد. بدین منظور، نمونه‌هایی با ۵ تا ۱۵ درصد تثبیت‌کننده و ۱۰ تا ۷۰ درصد جایگزینی سیمان با میکروسیلیس تهیه و با محلول‌های هیدروکسید سدیم (۴ تا ۱۰ مولار) و سیلیکات سدیم (۱ تا ۲ درصد) فعال‌سازی شدند. نتایج نشان داد ترکیب حاوی ۱۰ درصد تثبیت‌کننده، ۵۰ درصد میکروسیلیس، ۸ مولار هیدروکسید سدیم و ۱/۵ درصد سیلیکات سدیم عملکرد بهینه‌ای دارد. ارزیابی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، کشش غیرمستقیم، چرخه‌های تر-خشک و تصاویر SEM انجام شد. فعال‌سازی قلیایی مقاومت فشاری را تا ۳۱۴ مگاپاسکال افزایش داد و موجب بهبود مقاومت کششی و دوام نمونه‌ها گردید. همچنین تصاویر SEM تشکیل ساختاری منسجم‌تر را در نمونه‌های فعال‌شده تأیید کردند. نتایج بیانگر کارایی این روش در بهسازی پایدار خاک‌های رسی است.

واژگان کلیدی:

خاک کائولینیت؛ تثبیت خاک؛ میکروسیلیس؛ فعال‌ساز قلیایی؛ ریزساختاری.

* حسن شرفی، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه رازی کرمانشاه

ایمیل: h_sharafi@razi.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Investigation of the Effect of Alkaline Activation on the Strength, Durability, and Microstructure of Geopolymer- Stabilized Clay Soil

Hassan Sharafi^{*1}, Hamidreza Akbari², Fatemeh Ranjbar³

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

3- M.Sc. in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Abstract:

Kaolinitic clay soils are widely encountered in geotechnical engineering projects and often exhibit low mechanical strength, high compressibility, and limited durability under environmental loading conditions. Improving the engineering performance of such soils while reducing cement consumption has therefore become an important research objective. In this study, the effectiveness of alkaline activation in enhancing the mechanical behavior, durability, and microstructural characteristics of chemically stabilized kaolinitic clay was investigated. Soil specimens were prepared using 5%, 10%, and 15% stabilizer contents, while Portland cement was partially replaced with silica fume at replacement levels ranging from 10% to 70%. Alkaline activation was carried out using sodium hydroxide (NaOH) solutions with molarities of 4–10 M and sodium silicate (Na_2SiO_3) dosages of 1–2%.

Based on the preliminary optimization results, the mixture containing 10% total stabilizer with 50% cement replacement by silica fume, activated by 8 M NaOH and 1.5% Na_2SiO_3 , exhibited the most favorable performance and was selected for detailed investigation. The mechanical properties of the optimized mixtures were evaluated through unconfined compressive strength (UCS) and indirect tensile strength (ITS) tests after 28 days of curing. Durability performance was assessed under repeated wetting–drying cycles, while microstructural changes were examined using scanning electron microscopy (SEM).

The results demonstrated that alkaline activation significantly enhanced the strength and durability of the stabilized soil. The optimum mixture achieved a UCS value of 3.14 MPa, corresponding to an increase of approximately 31% compared with the non-activated mixture. Improvements in tensile strength and resistance to environmental degradation were also observed. SEM observations revealed the formation of a denser and more integrated matrix resulting from the development of cementitious and geopolymeric reaction products, leading to reduced pore spaces and improved particle bonding.

The findings indicate that alkaline-activated cement–silica fume stabilization can provide an efficient and environmentally sustainable approach for improving the performance of clayey soils in geotechnical applications exposed to adverse environmental conditions.

Keywords: Kaolinitic clay; Soil stabilization; Silica fume; Alkali activator; Microstructure.

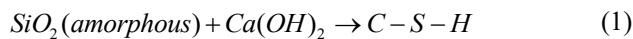
1 - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

رشد شتابان پروژه‌های زیرساختی و عمرانی در سال‌های اخیر، ضرورت استفاده از مصالح پایدار و مقاوم را برای مقابله با چالش‌های ژئوتکنیکی بیش از پیش نمایان ساخته است. در این میان، خاک‌های ریزدانه و ضعیف، به‌ویژه خاک‌های رسی کائولینیتی، به دلیل ساختار فیزیکی ناپایدار، تراکم‌پذیری زیاد و مقاومت مکانیکی محدود، همواره یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شوند [۱،۲]. از این رو، بهسازی و تثبیت این نوع خاک‌ها به منظور ارتقای ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن‌ها، امری ضروری تلقی می‌شود.

سیمان پرتلند متداول‌ترین ماده تثبیت‌کننده در پروژه‌های ژئوتکنیکی به‌شمار می‌رود، زیرا موجب افزایش مقاومت و کاهش تغییرشکل خاک می‌شود. با این حال، مصرف انرژی زیاد و انتشار قابل توجه دی‌اکسید کربن در فرآیند تولید آن، استفاده گسترده از سیمان را با محدودیت‌های زیست‌محیطی مواجه کرده است [۳،۴،۵،۶]. به همین دلیل، در سال‌های اخیر استفاده از مواد پوزولانی و جایگزین‌های معدنی نظیر میکروسیلیس، متاکائولن، زئولیت، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و خاکستر پوسته برنج مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۷،۸]. این مواد می‌توانند ضمن کاهش مصرف سیمان، موجب بهبود مقاومت و دوام خاک‌های تثبیت‌شده شوند.

در میان مواد پوزولانی، میکروسیلیس به دلیل دارا بودن سیلیس آمورف واکنش‌پذیر و سطح ویژه زیاد، نقش مهمی در توسعه واکنش‌های پوزولانی ایفا می‌کند. حضور یون‌های سیلیکات آزادشده از میکروسیلیس، به‌ویژه در محیط‌های قلیایی، موجب تسریع تشکیل فازهای ژلی پایدار و افزایش انسجام ماتریس خاک تثبیت‌شده می‌شود [۹-۱۱، ۵]. ترکیب مواد آلومینوسیلیکاتی با فعال‌کننده‌های قلیایی، زمینه ساز تشکیل ساختارهای ژئوپلیمری با

مقاومت فشاری و دوام بیشتر است [۱۲-۱۵]. واکنش اصلی تشکیل ژل-C-H⁺ سیاه‌عنوان مهم‌ترین فاز مقاومتی، مطابق رابطه (۱) از واکنش سیلیس آمورف با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان ایجاد می‌شود [۱۶-۱۸] (رابطه ۱):



علاوه بر این، یون‌های آلومینیوم آزادشده از کائولینیت در محیط قلیایی، با یون‌های سیلیکات واکنش داده و ژل‌های N-A-S-H⁺ را تشکیل می‌دهند [۱۹،۲۰]. تشکیل محصولات ژلی نظیر C-S-H و N-A-S-H بر اساس شواهد غیرمستقیم حاصل از تغییرات ریزساختاری و بهبود رفتار مکانیکی استنباط گردید. با این حال، تعیین کمی این فازها نیازمند استفاده از آزمون‌های تکمیلی است که می‌تواند در مطالعات آینده انجام شود. در حضور کلسیم حاصل از سیمان نیز فازهای C-A-H و C-A-S-H⁺ ایجاد می‌شوند که نقش مهمی در افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام خاک دارند [۸،۲۱]. تشکیل این ژل‌ها سبب افزایش پیوستگی بین ذرات و بهبود رفتار مکانیکی خاک تثبیت‌شده می‌شود. در این میان مطالعاتی نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس، ضمن کاهش مقدار سیمان موردنیاز، موجب تسریع فرآیند تثبیت و تشکیل محصولات سیمانی بیشتر می‌شود [۵]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک کائولینیتی را در اثر استفاده همزمان از میکروسیلیس و آهک گزارش کردند که نشان داده‌اند میکروسیلیس می‌تواند از طریق واکنش‌های پوزولانی و ایجاد پیوندهای ثانویه، مقاومت و رفتار تغییرشکل خاک‌های تثبیت‌شده را بهبود دهد [۲۲].

از سوی دیگر، فعال‌سازی قلیایی می‌تواند واکنش‌پذیری فازهای آلومینوسیلیکاتی موجود در خاک و مواد پوزولانی را افزایش دهد. هیدروکسید

Calcium Aluminosilicate Hydrate⁺

Calcium Silicate Hydrate⁺
Sodium Aluminosilicate Hydrate⁺

سدیم با افزایش قلیائیت محیط، انحلال گونه‌های سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی را تسهیل کرده و زمینه تشکیل محصولات ژلی را فراهم می‌کند [۱۷، ۲۳]. سیلیکات سدیم نیز علاوه بر ایجاد محیط قلیایی، منبعی از سیلیس محلول فراهم می‌کند و می‌تواند با تغییر نسبت Si/Al، تشکیل محصولات ژئوپلیمری را تقویت نماید [۱۹، ۲۴]. نتایج مطالعات مربوط به خاک‌های رسی و سیستم‌های ژئوپلیمری نشان داده است که مقدار و نوع فعال‌کننده نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه مقاومت و ریزساختار دارد [۳، ۷، ۱۵، ۱۸]. از این رو، ترکیب سیمان، میکروسیلیس و فعال‌کننده قلیایی می‌تواند با ایجاد هم‌زمان محصولات هیدراتاسیون و ژئوپلیمری، نسبت به استفاده منفرد از سیمان یا ماده پوزولانی، ظرفیت بیشتری برای بهبود رفتار مکانیکی و دوام خاک فراهم کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده هم‌زمان از مواد پوزولانی و فعال‌کننده‌های قلیایی می‌تواند موجب افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و دوام خاک‌های رسی شود [۱۷، ۲۵-۲۹]. این بهبود عملکرد در ارتباط مستقیم با تکامل ریزساختاری و تشکیل پیوندهای سیمانی یا ژئوپلیمری است [۳۰]. در مطالعه‌ی اثر ترکیب میکروسیلیس با ژئوپلیمر و فعال‌ساز قلیایی روی خاک ماسه‌ای بررسی شد [۳۱]، در حالی که در این پژوهش، خاک رسی کائولینیتی با استفاده هم‌زمان از سیمان، میکروسیلیس و محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم تثبیت شده است. ارزیابی عملکرد مکانیکی نمونه‌ها از طریق آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده و کشش غیرمستقیم انجام شده و تغییرات ریزساختاری با بهره‌گیری از آنالیزهای SEM^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اثر چرخه‌های تر-خشک برای بررسی دوام بلندمدت نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۲-۳۵، ۱۵]. هدف این تحقیق، ارائه یک ترکیب ژئوپلیمری بهینه در محدوده شرایط مورد مطالعه و سازگار با محیط زیست برای بهسازی خاک‌های ریزدانه و کاهش

مصرف سیمان در پروژه‌های ژئوتکنیکی و اثر هم‌زمان نسبت جایگزینی میکروسیلیس، نوع و غلظت فعال‌ساز قلیایی و شرایط دوام بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری خاک کائولینیتی است. همچنین تعیین ترکیب بهینه در محدوده شرایط مورد مطالعه، بر اساس رویکرد چندمعیاره شامل حداکثر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مناسب‌ترین رفتار ریزساختاری انجام شد. لازم به ذکر است که معیار مقاومت قابل قبول به نوع کاربرد ژئوتکنیکی وابسته بوده و برای کاربردهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

۲-۱-۱- خاک کائولینیتی

در این پژوهش از خاک رسی کائولینیتی تجاری موسوم به «کائولینیت ژئوس تبریز» استفاده شده است که به دلیل رفتار فیزیکی-شیمیایی پایدار و خلوص بیشتر، در مطالعات ژئوتکنیکی کاربرد گسترده‌ای دارد [۳۶-۳۹، ۲۲، ۸، ۷، ۵]. ویژگی‌های مهندسی خاک براساس استاندارد های ASTM [۴۰] و مطابق با دستورالعمل EPA (۱۹۸۳) تعیین گردید. ترکیب اصلی خاک شامل سیلیکات آلومینیوم هیدراته $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ است که به واسطه ساختار لایه‌ای و ظرفیت جذب آب زیاد، رفتار پلاستیک و تحکیم‌پذیری قابل توجهی نشان می‌دهد [۴۱، ۴۲]. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک کائولینیت طبیعی برابر با 0.191 MPa به دست آمد. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان متعارف $F.S=3$ ، مقاومت مجاز متناظر با استفاده از رابطه $q_a = q_u / F.S$ برابر با 0.064 MPa (64 kPa) محاسبه شد [۴۳]. این مقدار نشان‌دهنده ظرفیت مقاومتی نسبتاً محدود خاک طبیعی برای کاربردهای مهندسی بوده و ضرورت بررسی

^۱ Scanning Electron Microscopy

روش‌های مناسب بهسازی و تثبیت را نشان می‌دهد. مشخصات ژئوتکنیکی و ترکیب شیمیایی خاک در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲-۱-۲- سیمان پرتلند

سیمان مصرفی از نوع پرتلند (Type II) بوده که دارای فازهای C_3S , C_2S می‌باشد [۵,۶,۲۵,۴۴]. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

۲-۱-۳- میکروسیلیس

میکروسیلیس (سیلیکافوم) به عنوان یک ماده معدنی پوزولانی با ذرات بسیار ریز از شرکت «توما مواد معدنی اصفهان» تهیه شد. این ماده که محصول جانبی تولید فروسیلیکون است، عمدتاً از SiO_2 آمورف تشکیل شده و با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل $C-S-H$ تولید می‌کند [۱۴,۲۴,۴۵]. ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۱-۴- فعال کننده های قلیایی

فعال کننده های قلیایی شامل هیدروکسید سدیم ($NaOH^1$) و سیلیکات سدیم ($Na_2SiO_3^2$) بودند که به ترتیب موجب افزایش pH و تشدید واکنش‌های پوزولانی می‌شوند [۱۴,۲۳,۲۴,۲۶,۳۴,۴۶]. محلول‌های قلیایی به صورت پودری از شرکت Merck خریداری و با آب مقطر تا رسیدن به غلظت‌های مورد نظر حل شدند [۴۷,۴۸]. خصوصیات این محلول‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان، میکروسیلیس و محلول‌های قلیایی بر اساس برگه‌های مشخصات فنی (Technical Data Sheet) ارائه شده توسط شرکت‌های تولیدکننده استخراج شده است. همچنین بخشی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی و شیمیایی خاک بر اساس نتایج آزمایشگاهی انجام شده مطابق استانداردهای ASTM و مطالعات مرجع تعیین گردید. تمامی

آزمایش‌های مکانیکی، دوام و ریزساختاری ارائه شده در این پژوهش توسط نگرانگان انجام شده است.

جدول ۱: خواص ژئوتکنیکی خاک نرم (رس کائولینیت) مورد

استفاده در تحقیق حاضر

Soil properties		
Hendershot and Duquette(1986)	11.8	Cation exchange capacity (CEC), (cmol/kg)
Eltantawy and Arnold (1973)	25	Specific surface area (SSA), (m ² /g)
ASTM D422	68	Clay fraction, (%)
ASTM D4318	39.1	Liquid Limit, (%)
ASTM D4318	20.8	Plasticity Index, (%)
ASTM D854	2.67	Specific gravity, G _s
ASTM D698	1561	Maximum dry density, (kg/m ³)
ASTM D698	25.1	Optimum moisture content, (%)
ASTM D2487	CL	Soil classification
ASTM D2166	0.191	Unconfined compressive strength, (MPa)
Ouhadi et al. (2006)	8.61	pH
EPA manual (1983)	0.189	Electrical conductivity (EC), (mS/cm)

Sodium Silicate^۲

Sodium Hydroxide^۱

Na ₂ SiO ₃	NaOH	Chemical formula
122.06	39.997	Molecular weight(g/mol)
2.61	2.13	Density(g/cm ³)
1089	318	Melting point(°C)
22.2(20°C)	111	Solubility in water(g/100ml)
160.6(80°C)	(20°C)	

۲-۲- آماده سازی و روش ساخت نمونه ها

برای تعیین رطوبت بهینه (OMC) و دانسیته خشک حداکثر (MDD)، آزمایش مینی پروکتور مطابق ASTM D۶۹۸ انجام شد [۲۵]. قالب مورد استفاده دارای قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر بود و فرآیند تراکم نمونه ها بر اساس اصول ASTM D۶۹۸ و با اعمال تراکم در سه لایه با ۳۶ ضربه در هر لایه توسط چکش ۱ کیلوگرمی متراکم شدند. این روش ضمن صرفه جویی در مصالح، امکان دستیابی به تراکم مناسب را فراهم می کرد. نمونه های استوانه ای با قطر ۳۷ میلی متر و ارتفاع ۷۴ میلی متر مطابق استاندارد ASTM D2166 تهیه شدند. مطالعات مختلف نشان داده اند که استفاده از میکروسیلیس در محدوده های متوسط جایگزینی می تواند از طریق افزایش واکنش های پوزولانی و تشکیل محصولات سیمانی، موجب بهبود مقاومت خاک های رسی شود [۱،۵،۲۲،۴۹،۵۰]. همچنین نشان دادند که ترکیب سیمان و میکروسیلیس می تواند عملکرد مکانیکی خاک رسی را بهبود دهد و افزایش مقدار میکروسیلیس تا یک محدوده بهینه، موجب توسعه بیشتر محصولات واکنشی می شود [۵]. در مطالعه ای دیگر، بهبود خواص خاک کائولینیتی تثبیت شده با ترکیب میکروسیلیس و آهک را گزارش کردند [۲۲]. بر این اساس، در پژوهش حاضر جایگزینی سیمان با میکروسیلیس در محدوده ۱۰ تا ۷۰ درصد در نظر گرفته شد تا هم محدوده های پایین و متوسط و هم مقادیر بالاتر جایگزینی از نظر عملکرد مکانیکی بررسی شوند.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی خاک کائولینیت، سیمان پرتلند نوع II و

میکروسیلیس مورد استفاده در پژوهش

kaolinite	cement	Silica Fume	Oxide
63±1	20.7	75~98	SiO ₂
24±1	5.10	1.0±0.2	Al ₂ O ₃
0.55±0.1	4.38	0.9±0.3	Fe ₂ O ₃
0.55±0.06	1.95	0.7±0.1	MgO
	64.90		CaO
1.2±0.2	1.35	0.3±0.1	CaO(free)
9±1	0.85	0.3-0.5	(heat loss) LOI
-	2.10	-	SO ₃
0.04±0.1	-	1.3±0.2	Na ₂ O
0.3±0.1	-	-	K ₂ O
0.04±0.01	-	-	TiO ₂
-	60.39	-	C ₃ S
-	13.79	-	C ₂ S
-	6.11	-	C ₃ A
-	13.33	-	C ₄ AF

جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند نوع II مورد

استفاده در پژوهش

Density (g/cm ³)	Special Blaine Level (cm ² /g)	Initial setting time (min)	Final setting time (min)	Physical composition
3.10-3.15	3400	150	255	cement

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول های قلیایی مورد

استفاده در فعال سازی نمونه ها

از سوی دیگر، مطالعات مربوط به فعال سازی قلیایی نشان داده اند که عملکرد سیستم های آلومینوسیلیکاتی به نوع و غلظت فعال کننده وابسته است [۱۷]. اثر غلظت های مختلف NaOH را بر ژئوپلیمر پایه کائولن بررسی کرده و نشان دادند که افزایش مولاریته NaOH تا یک مقدار بهینه موجب افزایش واکنش پذیری و مقاومت می شود، در حالی که افزایش بیش از حد غلظت قلیا می تواند عملکرد را کاهش دهد. همچنین، در مطالعه ای دیگر، نشان دادند که مولاریته NaOH و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ از پارامترهای مؤثر بر تشکیل محصولات ژئوپلیمری و مقاومت هستند [۱۷]. مطالعات انجام شده بر تثبیت خاک با فعال کننده های قلیایی نیز بر وجود یک محدوده بهینه برای غلظت فعال کننده تأکید کرده اند [۳، ۷، ۱۸].

بنابراین، با توجه به نتایج مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر سه سطح تثبیت کننده شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و درصدهای جایگزینی میکروسیلیس شامل ۱۰ تا ۷۰ درصد انتخاب شد. همچنین، برای بررسی اثر شدت فعال سازی، محلول NaOH در غلظت های ۸، ۶، ۴، ۰ و ۱۰ مولار و Na_2SiO_3 در مقادیر ۱، ۱.۵ و ۲ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب این محدوده ها با هدف پوشش دادن شرایط کم، متوسط و زیاد فعال سازی و بررسی تغییرات نسبت های Ca/Si و Si/Al در اثر تغییر مقدار سیمان، میکروسیلیس و فعال کننده انجام شد. بدین ترتیب، امکان تعیین محدوده بهینه طرح اختلاط بر اساس عملکرد مکانیکی و ریزساختاری فراهم گردید. مواد خشک و محلول های قلیایی به مدت حداقل ۱۵ دقیقه روی سطح صاف مخلوط گردیدند تا یکنواختی رنگ و توزیع ذرات به صورت بصری تأیید شود [۵۱]. لازم به ذکر است که در ساخت نمونه های فعال شده، آب مورد نیاز مخلوط به صورت محلول فعال کننده قلیایی تأمین شد و از افزودن آب جداگانه به نمونه های حاوی فعال کننده خودداری گردید. مخلوط در قالب استوانه ای ریخته شده و با جک هیدرولیکی تحت

فشار استاتیک فشرده شد تا حداکثر دانسیته خشک ($\text{MDD}^1 = ۱.۵۷ \text{ gr/cm}^3$) رطوبت بهینه ($\text{OMC}^2 = ۱۹\%$) حاصل شود. نمونه ها پس از خروج از قالب وزن شده و در کیسه های پلاستیکی درزگیری شده قرار گرفتند. عمل آوری با دمای 20°C و رطوبت نسبی ۸۵ درصد به مدت ۲۸ روز انجام شد [۵۱]. آزمایش UCS مطابق ASTM D۲۱۶۶ و آزمایش ITS^۳ مطابق ASTM D۶۹۳۱ انجام شد [۵۲-۵۵، ۳۹، ۳۷، ۲۴، ۳، ۲]. برای بررسی دوام، آزمون چرخه های تر و خشک مطابق ASTM D559 روی نمونه های حاوی فعال ساز قلیایی انجام شد. نمونه ها ابتدا ۲۴ ساعت در آب مقطر یا آب نمک غوطه ور شدند و سپس ۴۲ ساعت در اوون با دمای $71 \pm 2^\circ \text{C}$ قرار گرفتند. پس از هر چرخه، مقاومت فشاری (UCS^4) اندازه گیری شد [۷، ۱۴، ۲۱، ۳۳، ۴۰، ۵۶، ۵۷] (شکل ۱).

در آزمایش ITS نمونه ها به صورت افقی بین فک های دستگاه قرار گرفته و تحت بارگذاری تدریجی تا شکست قرار گرفتند. مقاومت غیرمستقیم با رابطه (۲) محاسبه شد:

$$ITS = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (2)$$

که در آن ITS مقاومت کشش غیر مستقیم، $P_{\max}$ حداکثر بار اعمال شده، D و L به ترتیب قطر و ارتفاع نمونه هستند.

ریزساختار نمونه های تثبیت شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر در دستگاه TESCAN^۳ VEGA-بررسی شد. این آزمایش جهت ارزیابی تشکیل ژل ها، تراکم ساختار و توزیع حفرات بکار رفت [۲۰، ۲۴، ۴۹، ۵۱، ۵۴، ۵۸].

Indirect Tensile Strength^{*}
Unconfined Compressive Strength^{*}

Maximum Dry Density^۱
Optimum Moisture Content^۲

که افزایش مولاریته NaOH تا یک مقدار بهینه می‌تواند واکنش‌پذیری مواد آلومینوسیلیکاتی و مقاومت را افزایش دهد، در حالی که غلظت‌های بالاتر لزوماً عملکرد مطلوب‌تری ایجاد نمی‌کنند [۱۹،۵۹]. همچنین، مطالعات انجام‌شده بر تثبیت خاک با سامانه‌های فعال‌شده قلیایی، وابستگی عملکرد مکانیکی به نوع و مقدار فعال‌کننده را نشان داده‌اند [۳،۷،۱۸].

پس از تعیین ترکیب‌های دارای عملکرد مناسب، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) برای نمونه‌های منتخب و در شرایط بدون فعال‌کننده و با مقادیر بهینه فعال‌کننده انجام شد. در ادامه، نمونه‌های منتخب تحت چرخه‌های تر-خشک در آب مقطر و آب‌نمک قرار گرفتند تا اثر شرایط محیطی بر دوام آن‌ها بررسی شود. در نهایت، برای تفسیر تغییرات ریزساختاری، تصاویر SEM از نمونه خاک کائولینیته اولیه، نمونه تثبیت‌شده با سیمان، نمونه حاوی میکروسیلیس و نمونه‌های فعال‌شده با NaOH و Na_2SiO_3 تهیه و مقایسه شدند.

خلاصه برنامه آزمایشگاهی و متغیرهای مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شده است.

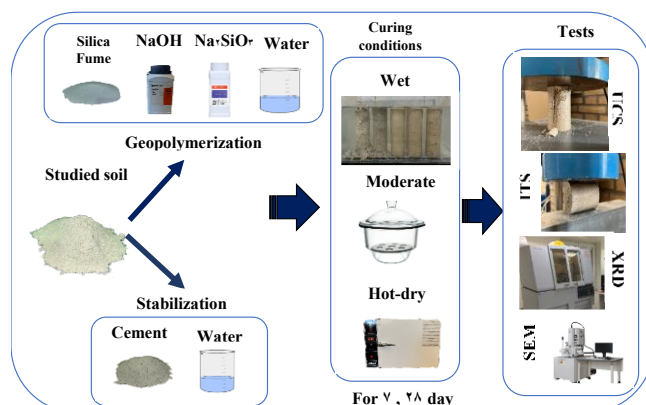
جدول ۵: برنامه آزمایشگاهی و طرح کلی آزمایش‌های انجام شده

Stabilizer (%)	0,5,10,15
Silica Fume (% of Stabilizer)	0,10,20,30,40,50,60,70
NaOH (Molar)	0,4,6,8,10
Na_2SiO_3 (%)	0,1,1.5,2
Curing (days)	7,28
Number of Wet-Dry Cycles	0,1,2,3,4,5
Tests	UCS,ITS,SEM,Durability

۳- نتایج و بحث‌ها

۳-۱- تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری (UCS) تک‌محوری

شکل ۲ نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد که افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا سطح معینی منجر به بهبود قابل‌توجه مقاومت شده است، اما در غلظت‌های بیشتر روند کاهشی مشاهده می‌شود [۱۴،۱۷،۲۴،۲۵،۵۹]. این رفتار در هر سه سطح



شکل ۱: نمودار شماتیک روش تحقیق شامل مواد مورد استفاده، طرح اختلاط، فرآیند ساخت نمونه‌ها، شرایط عمل‌آوری و آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط

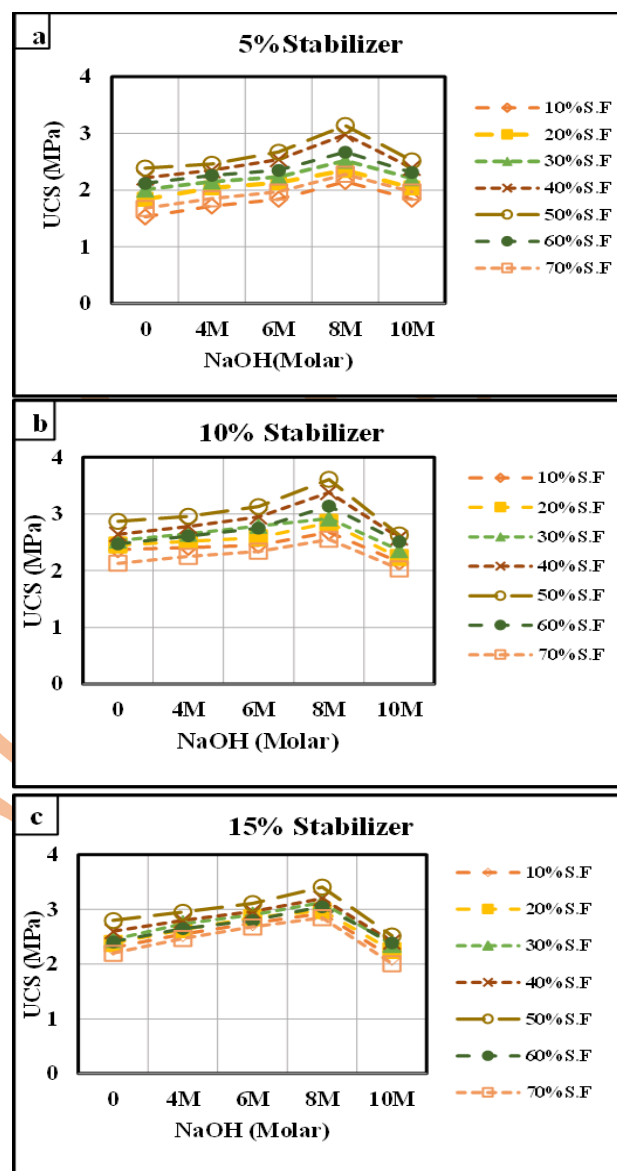
به‌منظور بررسی اثر متغیرهای اصلی بر رفتار مکانیکی، دوام و ریزساختار خاک کائولینیته تثبیت‌شده، برنامه آزمایشگاهی در چند مرحله طراحی شد. در مرحله نخست، اثر مقدار تثبیت‌کننده و میزان جایگزینی سیمان با میکروسیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری بررسی شد. بر این اساس، مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تثبیت‌کننده و درصد‌های جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد میکروسیلیس در نظر گرفته شد. انتخاب این محدوده بر اساس مطالعات پیشین در زمینه تثبیت خاک‌های رسی با سیمان و میکروسیلیس انجام شد [۱،۵،۲۲]. همچنین، نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد جایگزینی میکروسیلیس، به دلیل کاهش مقدار ماده سیمانی فعال، الزاماً به افزایش بیشتر مقاومت منجر نمی‌شود. بنابراین، بازه ۱۰ تا ۷۰ درصد برای شناسایی محدوده بهینه جایگزینی انتخاب شد.

در مرحله دوم، اثر فعال‌سازی قلیایی بر نمونه‌های منتخب بررسی گردید. برای NaOH، غلظت‌های مختلف در محدوده ۴ تا ۱۰ مولار و برای Na_2SiO_3 مقادیر ۱، ۱.۵ و ۲ درصد وزنی در نظر گرفته شد [۱۷]. محققان نشان دادند

سیمان (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) تقریباً الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های حاوی ۵ درصد سیمان (شکل a ۲)، مقاومت فشاری در حالت بدون فعال‌ساز در محدوده ۱۵۳ تا ۲۳۹ مگاپاسکال قرار داشت. با افزایش مولاریته به ۴ و ۶ مولار، افزایش تدریجی مقاومت مشاهده شد و در ۸ مولار بیشترین مقدار مقاومت حاصل گردید؛ به‌طوری‌که در ترکیب حاوی ۵۰ درصد میکروسیلیس، مقاومت از ۲۳۹ مگاپاسکال (۰M) به ۳۱۴ مگاپاسکال (۸M) افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد حدود ۳۱ درصدی است. با این حال، در غلظت ۱۰ مولار کاهش مقاومت مشاهده شد که بیانگر وجود یک غلظت بهینه برای فعال‌سازی واکنش‌های ژئوپلیمری است. روند مشابهی در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد سیمان مشاهده گردید (شکل b ۲). به‌طوری‌که بیشترین مقاومت برابر با ۳۶۱ مگاپاسکال در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس و ۸ مولار NaOH حاصل شد، این مقدار در مقایسه با حالت بدون فعال‌ساز (۲۸۷ مگاپاسکال) افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این بهبود مقاومت را می‌توان به افزایش انحلال سیلیس و آلومینا در محیط قلیایی و در نتیجه، تشکیل ژل‌های C-S-H و فازهای ژئوپلیمری مترکم‌تر نسبت داد [۵، ۱۵، ۱۸]. در نمونه‌های دارای ۱۵ درصد سیمان نیز بیشینه مقاومت در ۸ مولار بدست آمد (۳۴۱ مگاپاسکال در ۵۰ درصد میکروسیلیس) (شکل c ۲). اگرچه افزایش سیمان از ۵ به ۱۵ درصد به‌طور کلی موجب افزایش مقاومت پایه شده است، اما تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان مشاهده نشد. این یافته می‌تواند بیانگر آن باشد که در حضور فعال‌ساز قلیایی و میکروسیلیس، سیستم به سطح اشباعی از محصولات هیدراتاسیون و ژئوپلیمری رسیده و افزایش بیشتر سیمان تأثیر افزایشی چشمگیری در بهبود مقاومت ندارد. افت مقاومت مشاهده شده در غلظت ۱۰ مولار در هر سه سطح سیمان، قابل توجه است. این کاهش را می‌توان به عوامل متعددی از جمله: افزایش بیش از حد قلیائیت محیط که می‌تواند با تشدید واکنش‌ها، افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن و ایجاد ریزترک‌های داخلی همراه باشد، تشکیل ساختارهای

متخلخل‌تر و کاهش یکپارچگی ماتریس، تسریع نامناسب واکنش‌ها و احتمالاً ناپایداری برخی ژل‌های قلیایی در غلظت‌های بسیار بیشتر نسبت داد. این عوامل در مجموع باعث تضعیف شبکه ژل و افت مقاومت فشاری می‌گردند. در تمامی سطوح سیمان و مولاریته‌ها، افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس تا حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد منجر به افزایش مقاومت شد. اما در درصد‌های بیشتر (۶۰ و ۷۰ درصد) روند کاهشی مشاهده گردید. این رفتار اولیه با نقش پوزولانی میکروسیلیس و خاصیت پرکنندگی ذرات ریز آن توجیه می‌شود که منجر به بهبود توزیع دانه‌بندی، کاهش فضای خالی و افزایش تشکیل ژل C-S-H می‌گردد [۱، ۵، ۲۲]. با این حال، در درصد‌های جایگزینی بیشتر، کاهش مقدار سیمان منجر به کاهش تشکیل محصولات مقاوم‌تری و افت مقاومت فشاری می‌شود. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری تک محوری در سن ۲۸ روز، شامل ۱۰ درصد سیمان، ۵۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس و ۸ مولار هیدروکسید سدیم است که موجب افزایش حدود ۲۵-۳۵ درصد مقاومت فشاری شد. این یافته‌ها بر اهمیت تعادل میان پارامترهای کلیدی (میزان سیمان، درصد میکروسیلیس و غلظت فعال‌ساز قلیایی) در دستیابی به عملکرد مکانیکی مطلوب در سیستم‌های تثبیت شده تأکید دارد [۵، ۴۵، ۵۹].

گرفت [۵، ۱۰، ۴۸]. مطابق با شکل ۳، نتایج نشان می‌دهد که در هر سه سطح استفاده از تثبیت‌کننده (سیمان) (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد)، تغییرات مقاومت فشاری، تابعی از نسبت جایگزینی میکروسیلیس و میزان فعال‌ساز قلیایی بوده و رفتار غیرخطی اما منظم مشاهده می‌شود [۵۹]. در سطح ۵ درصد تثبیت‌کننده (شکل ۳a)، بیشترین مقادیر مقاومت عمدتاً در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درصد میکروسیلیس حاصل شد و کاربرد ۱۵ درصد سیلیکات سدیم نسبت به نمونه‌های فاقد محلول، افزایش محسوسی در مقاومت ایجاد نمود، به گونه‌ای که در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس مقاومت از ۲.۳۹ به ۲.۷۷ مگاپاسکال افزایش یافت. این افزایش را می‌توان ناشی از فعال‌سازی مؤثرتر واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل‌های C-S-H و C-A-S-H متراکم‌تر دانست [۱۸-۲۲]. در مقابل، افزایش میزان محلول به ۲ درصد در اغلب ترکیبات موجب افت نسبی مقاومت گردید که می‌تواند به دلیل افزایش بیش از حد قلیائیت محیط، برهم‌خوردن تعادل نسبت‌های Ca/Si و Si/Al باشد؛ این رفتار با یافته‌های پیشین در خصوص وجود مقدار بهینه برای فعال‌سازهای قلیایی همخوانی دارد. در سطح ۱۰ درصد تثبیت‌کننده (شکل ۳b)، مقادیر مقاومت فشاری به‌طور کلی افزایش یافته و بیشینه مقاومت برابر با ۳.۴۳ مگاپاسکال در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس و ۱.۵ درصد سیلیکات سدیم حاصل شد. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش مقدار ماده سیمانی، بستر مناسب‌تری برای واکنش‌های پوزولانی و ژئوپلیمری فراهم شده و در حضور مقدار بهینه فعال‌ساز، ریزساختار متراکم‌تری شکل می‌گیرد. با این حال، افزایش محلول به ۲ درصد در برخی طرح‌ها کاهش مقاومت را در پی داشته که می‌توان به غلظت قلیا و لزوم کنترل دقیق آن نسبت داده شود. در سطح ۱۵ درصد تثبیت‌کننده نیز روند مشابهی مشاهده شد و محدوده ۴۰ تا ۵۰ درصد میکروسیلیس همچنان عملکرد بهینه را نشان داد (شکل ۳c). به‌طوری‌که بیشینه مقاومت ۳.۲۲ مگاپاسکال در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس و ۱.۵ درصد سیلیکات سدیم ثبت گردید. این نتایج از آن است که افزایش بیش از حد محلول قلیایی منجر به بهبود بیشتر



شکل ۲: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی هیدروکسید سدیم الف) ۵٪،

ب) ۱۰٪، ج) ۱۵٪

۳-۲- تأثیر غلظت سیلیکات سدیم بر مقاومت

فشاری تک‌محوری (UCS)

در این پژوهش اثر محلول سیلیکات سدیم بر رفتار مقاومتی خاک تثبیت‌شده حاوی سیمان و میکروسیلیس در سن عمل‌آوری ۲۸ روزه مورد بررسی قرار

شکل ۳: تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی سیلیکات سدیم (الف) ۵٪،

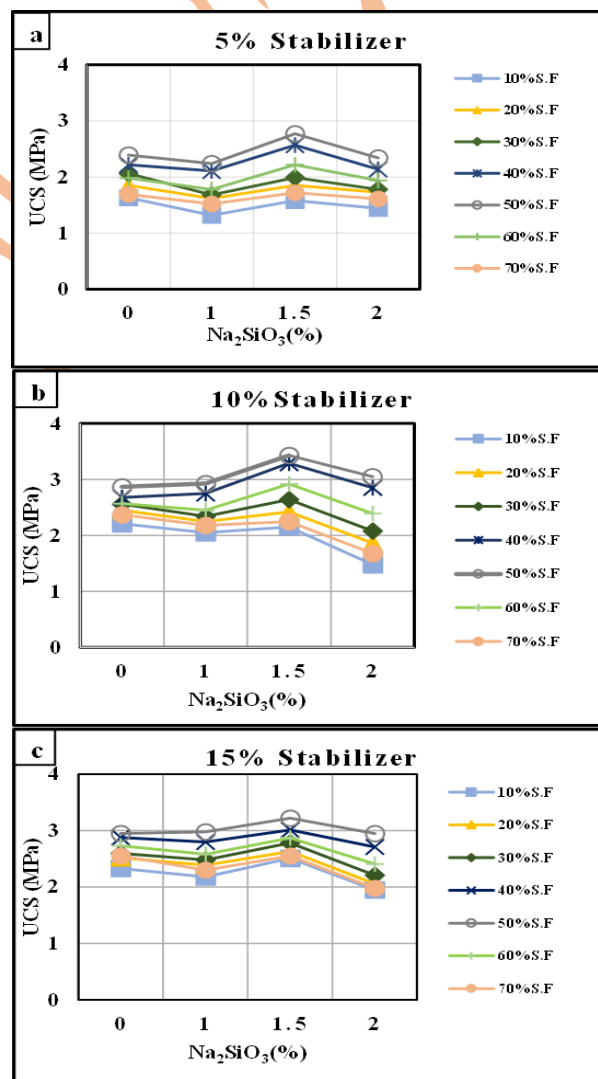
(ب) ۱۰٪، (ج) ۱۵٪

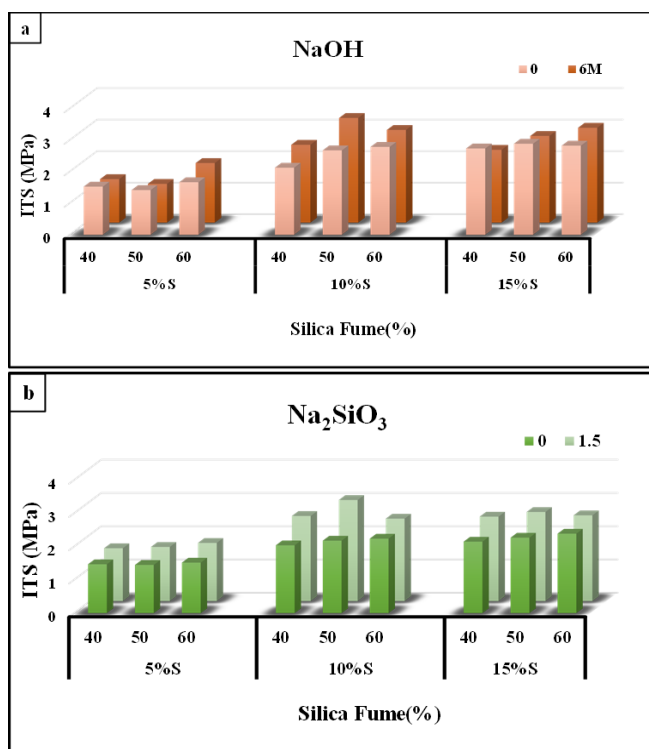
به طور کلی، مقایسه نتایج نشان می دهد که NaOH به دلیل قدرت بیشتر در انحلال و فعال سازی اولیه، نقش غالبی در تسریع تشکیل ژل و افزایش مقاومت کوتاه مدت ایفا می کند، در حالی که Na_2SiO_3 در مقادیر بهینه، با تأمین سیلیکات فعال و بهبود نسبت Si/Al، موجب تشکیل ساختارهای ژلی متراکم تر و پایدارتر شده و توسعه مقاومت بلندمدت را تقویت می نماید. این تفاوت رفتاری نشان می دهد که انتخاب نوع فعال کننده قلیایی باید متناسب با هدف عملکردی سیستم، اعم از دستیابی به مقاومت اولیه بیشتر یا بهبود رشد مقاومتی و دوام بلندمدت، انجام شود. بهبود مقاومت مکانیکی را می توان به انحلال بیشتر فازهای آلومینوسیلیکاتی در محیط قلیایی و تشکیل محصولات ژلی نسبت داد. این محصولات با پر کردن فضاهای خالی و ایجاد پیوندهای پایدار بین ذرات خاک، موجب افزایش چگالی ساختار و کاهش تمرکز تنش می شوند.

۳-۳- تأثیر غلظت محلول های قلیایی بر مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS)

در این بخش بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) نمونه ها با قطر ۳۷ میلی متر و ارتفاع ۷۴ میلی متر (در سن ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفته است) [۱۴، ۲۴]. مقاومت کششی غیرمستقیم به دلیل ارتباط مستقیم با مقاومت در برابر شروع و گسترش ترک در پروژه های ژئوتکنیکی نظیر لایه های روسازی، بستر راه، خاک های تثبیت شده و پوشش های مهندسی اهمیت دارد. شکل ۴ نتایج این آزمون ها را در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تثبیت کننده و سطوح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد جایگزینی میکروسلیس نشان می دهد. در این بررسی، مقایسه ها با حالت فاقد محلول قلیایی و تنها با استفاده از مقادیر بهینه فعال سازها (۶ مولار هیدروکسید سدیم و ۱۵ درصد سیلیکات سدیم) انجام شده است.

مقاومت نمی شود و عملکرد مکانیکی را کاهش می دهد. به طور کلی، در سن ۲۸ روزه، ترکیب ۴۰ تا ۵۰ درصد میکروسلیس همراه با ۱۵ درصد سیلیکات سدیم در هر سه سطح تثبیت کننده بهترین عملکرد مقاومتی را ارائه داده است. این امر نشان می دهد که دستیابی به نسبت بهینه بین منبع کلسیم و سیلیس فعال و همچنین تنظیم دقیق میزان فعال ساز قلیایی، نقش تعیین کننده ای در بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت فشاری دارد [۵۹]. نتایج حاضر ضمن تأیید یافته های مطالعات پیشین در زمینه تثبیت خاک کائولینیت با مواد پوزولانی و فعال سازهای قلیایی، بر ضرورت تعیین مقدار بهینه محلول سیلیکات سدیم در طراحی طرح اختلاط تأکید می کند [۵، ۳۴].





شکل ۴: تغییرات مقاومت کششی نمونه های تثبیت شده با محلول های قلیایی

(الف) هیدروکسید سدیم، (ب) سیلیکات سدیم

به طور کلی، مقایسه نتایج حاصل از دو نوع فعال کننده قلیایی نشان می دهد که هرچند هیدروکسید سدیم در برخی ترکیبات خاص (به ویژه ۱۰ درصد تثبیت کننده و ۵۰ درصد میکروسیلیس) بیشترین مقدار مقاومت کششی را ایجاد کرده است، اما سیلیکات سدیم رفتار پایدارتر و یکنواخت تری در بهبود مقاومت برزلی نشان می دهد. علاوه بر این، همخوانی نقاط بهینه در مقاومت فشاری و کششی (به ویژه در ۱۰ درصد تثبیت کننده و ۵۰ درصد میکروسیلیس) مؤید آن است که بهبود ریزساختار کلی، نقش اصلی را در افزایش همزمان مقاومت فشاری و کششی ایفا می کند. این یافته ها بر اهمیت تنظیم دقیق نسبت مواد اولیه و انتخاب نوع و غلظت مناسب فعال ساز قلیایی برای دستیابی به حداکثر عملکرد مکانیکی تأکید دارد.

در سیستم حاوی هیدروکسید سدیم (شکل ۴a)، در سطح ۵ درصد تثبیت کننده اثر محلول وابسته به میزان میکروسیلیس بوده است؛ به طوری که در ۶۰ درصد جایگزینی، مقاومت از ۱.۶۷ به ۱.۸۹ مگاپاسکال افزایش یافته، اما در سطوح ۴۰ و ۵۰ درصد کاهش نسبی مشاهده می شود. در سطح ۱۰ درصد تثبیت کننده، حضور محلول ۶ مولار موجب بهبود محسوس مقاومت کششی شده و بیشینه مقدار ۳.۳۲ مگاپاسکال در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس ثبت گردیده است که همسو با نتایج مقاومت فشاری، نشان دهنده شکل گیری ریزساختار مترکم تر در این نسبت بهینه است. در سطح ۱۵ درصد تثبیت کننده نیز رفتار وابسته به نسبت اختلاط بوده و افزایش مقاومت عمدتاً در ۶۰ درصد میکروسیلیس مشاهده شده است (۳.۰۱ مگاپاسکال)، در حالی که در سایر ترکیبات تغییرات محدود یا کاهشی بوده است. این نتایج بیانگر آن است که هیدروکسید سدیم عمدتاً از طریق فعال سازی فاز آلومینوسیلیکاتی عمل کرده و کارایی آن به تعادل بین قلیا و سیلیس وابسته است [۲۳].

در سیستم حاوی سیلیکات سدیم (شکل ۴b)، روند افزایشی منظم تری مشاهده شد. در سطح ۵ درصد تثبیت کننده، افزودن ۱.۵ درصد محلول در هر سه سطح جایگزینی (۴۰ و ۵۰ و ۶۰ درصد) منجر به افزایش مقاومت گردید و بیشینه مقدار ۱.۷۵ مگاپاسکال در ۶۰ درصد میکروسیلیس حاصل شد. در سطح ۱۰ درصد تثبیت کننده، بیشترین مقاومت برابر با ۳.۰۴ مگاپاسکال در ترکیب ۵۰ درصد میکروسیلیس ثبت شد که تطابق کامل با نقطه بهینه مقاومت فشاری دارد. در سطح ۱۵ درصد تثبیت کننده نیز حضور سیلیکات سدیم در تمامی ترکیبات نسبت به نمونه های بدون محلول، بهبود در مقاومت کششی را نشان داد، هرچند اختلاف مقادیر در این سطح نسبت به سطح ۱۰ درصد کمتر بود. این رفتار منظم تر را می توان ناشی از تأمین همزمان یون های سیلیکات محلول و قلیائیت کنترل شده دانست که به تشکیل شبکه ژلی پیوسته تر و افزایش پیوستگی بین کمک می کند [۲۴].

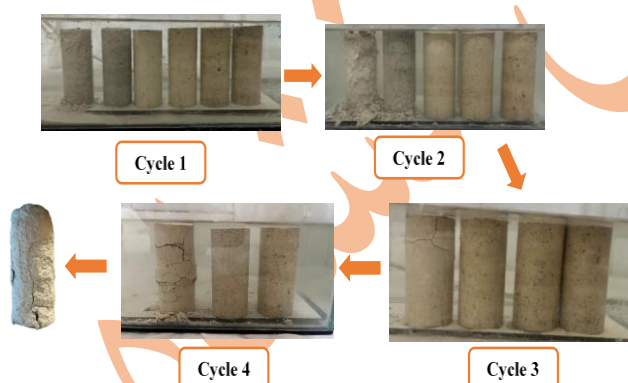
۴-۳- تأثیر شرایط محیطی بر دوام نمونه‌های

تثبیت‌شده

به منظور بررسی رفتار دوام و پایداری نمونه‌های تثبیت‌شده در شرایط محیطی متناوب، نمونه‌های بهینه (شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تثبیت‌کننده با ۵۰ درصد جایگزینی سیمان با میکروسیس) در دو محیط آب مقطر و محلول کلرید سدیم (آب نمک) عمل‌آوری شدند (شکل ۵) [۵۱، ۵۲، ۴۸، ۳۵، ۱۰، ۵۰]. در این بررسی، از مقادیر بهینه فعال سازهای قلیایی، یعنی محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار و سیلیکات سدیم ۱.۵ درصد استفاده گردید. طبق شکل ۶ نمونه‌ها در محلول اول تحت ۵ چرخه و در محلول دوم تحت ۳ چرخه خیس و خشک قرار گرفتند و مقاومت فشاری محصورنشده پس از هر چرخه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که حضور آب مقطر اثر تخریبی قابل توجهی بر نمونه‌های تثبیت‌شده با هر دو فعال‌ساز دارد. در سیستم ۶M NaOH در محیط آب‌نمک (شکل ۶a)، کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی ۵٪ تثبیت‌کننده از ۲.۳۹ به ۰.۸۶ مگاپاسکال پس از ۴ چرخه مشاهده شد، در حالی که نمونه‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ تثبیت‌کننده با کاهش کمتر مقاومت، به ترتیب به ۱.۲ و ۰.۸۶ مگاپاسکال رسیدند. این روند نشان می‌دهد که افزایش درصد تثبیت‌کننده موجب بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلر و تخریب ناشی از سیکل‌های تر و خشک می‌شود. در مقابل، در آب مقطر (شکل ۶b)، کاهش مقاومت‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد، به طوری که نمونه‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ تثبیت‌کننده پس از ۴ چرخه مقاومت خود را از دست می‌دهند، که بیانگر اثر محافظت‌کننده محیط غیرمهاجم و نقش واکنش‌های پوزولانی فعال‌شده توسط NaOH در ایجاد ژل C-S-H پایدار است [۵۱، ۵۲، ۵۰]. نمونه‌های تثبیت‌شده با سیلیکات سدیم ۱.۵٪ نیز رفتار مشابهی نشان دادند. همانطور که در شکل (شکل ۶c) نشان داده شده است، نمونه‌های ۵٪ تثبیت‌کننده پس از چرخه اول کاملاً تخریب شدند و نمونه‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ پس از چرخه سوم مقاومت خود

را از دست دادند. این تفاوت با ۶M NaOH می‌تواند به دلیل نفوذ پذیری بیشتر و شکل‌گیری کمتر ژل‌های C-S-H پایدار در حضور سیلیکات سدیم باشد، که کاهش چسبندگی ذرات خاک را به همراه دارد [۱۴، ۲۴]. در آب مقطر (شکل ۶d)، نمونه‌های سیلیکات سدیم ۱۰٪ و ۱۵٪ تثبیت‌کننده توانستند تا چرخه دوم مقاومت خود را حفظ کنند، اما نمونه‌های ۵٪ پس از چرخه اول به حداقل مقاومت رسیدند.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که، افزایش درصد تثبیت‌کننده (۱۰-۱۵٪) باعث افزایش دوام نمونه‌ها در برابر چرخه‌های تر و خشک می‌شود. هیدروکسید سدیم ۶M نسبت به سیلیکات سدیم ۱.۵٪ در ایجاد مقاومت پایدارتر و بهبود دوام در محیط‌های مهاجم مؤثرتر است. همچنین رفتار نسبتاً پایدارتر نمونه‌ها در آب‌نمک را می‌توان به کاهش شدت آبشویی یون‌ها، تبادل یونی محدودتر و تشکیل لایه‌های نمکی موقت در منافذ نسبت داد که به‌طور نسبی نقش محافظ داشته و نفوذپذیری مؤثر آب را کاهش می‌دهد. با این حال، تبلور نمک در چرخه‌های مکرر تر-خشک می‌تواند در بلندمدت منجر به ایجاد ترک‌های ریز و افت تدریجی مقاومت شود [۴۸، ۱۰].



شکل ۵: نمونه‌های تثبیت‌شده تحت فرآیند سیکل تر و خشک

شکل ۶: تغییرات مقاومت فشاری تحت چرخه های تر و خشک

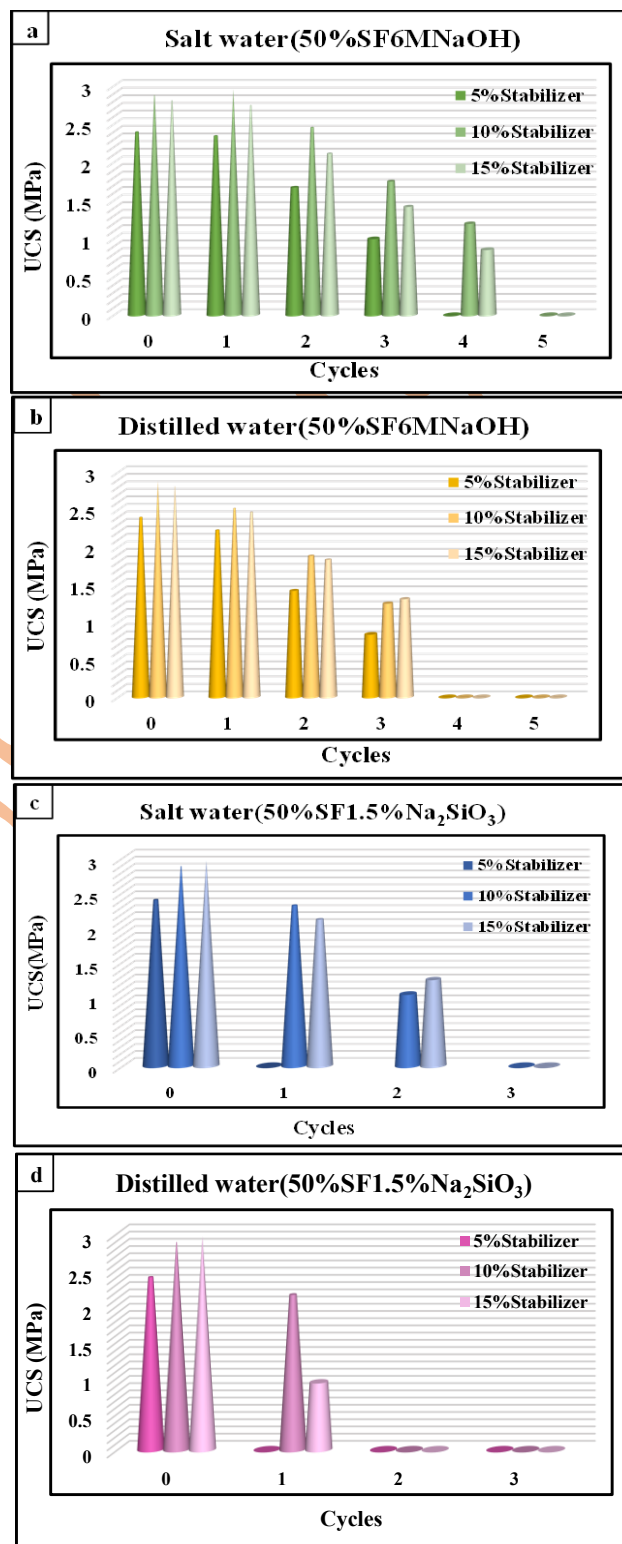
الف) هیدروکسید سدیم در آب نمک، ب) هیدروکسید سدیم در آب مقطر،

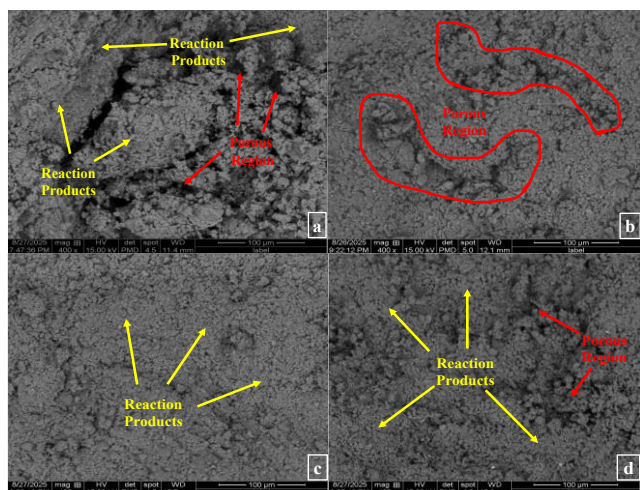
ج) سیلیکات سدیم در آب نمک، د) سیلیکات سدیم در آب مقطر

این تحلیل با داده های حاصل از آزمایش های UCS و ITS همخوانی دارد و نشان می دهد که انتخاب فعال ساز قلیایی و درصد تثبیت کننده بهینه در محدوده شرایط مورد مطالعه، نقش کلیدی در بهبود عملکرد مکانیکی و تضمین دوام بلند مدت خاک تثبیت شده در شرایط محیطی چالش برانگیز ایفا می کند.

۵-۳- تفسیر تصاویر SEM

بر اساس تصاویر حاصل از آزمون SEM، ریزساختار خاک کائولینیتی تثبیت شده به طور محسوسی تحت تأثیر نوع و ترکیب تثبیت کننده قرار گرفته است؛ موضوعی که با نتایج مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد [۱،۵۱،۶۰،۶۱]. تصاویر SEM امکان ارزیابی مستقیم نحوه توزیع محصولات هیدراتاسیون و ژئوپلیمری، میزان تراکم ماتریس و پیوستگی بین ذرات خاک را فراهم می کنند. در شکل ۷a (K90C10) که نمونه با ۱۰٪ تثبیت کننده ساخته شده است، ریزساختار نمونه شامل تجمعات نامنظم ذرات و یک ماتریس نسبتاً ناهمگن است. فضاهای خالی و حفرات با کنتراست تیره در بین تجمعات ذرات، به ویژه در بخش مرکزی و سمت چپ تصویر، قابل مشاهده هستند (فلش قرمز). وجود این نواحی خالی بیانگر آن است که در این نمونه هنوز پیوستگی کامل و یکنواختی در ساختار ایجاد نشده است. همچنین، مرز میان برخی تجمعات ذرات همچنان قابل تشخیص است که نشان دهنده ساختار نسبتاً ناپیوسته نمونه است. در شکل ۷b (K9۰C۵SF۵) پس از جایگزینی ۵۰٪ سیمان با میکروسیلیس، ساختار نسبت به نمونه اولیه پیوستگی بیشتری نشان می دهد و نواحی ریزدانه و محصولات واکنشی در بین ذرات قابل مشاهده است. با این حال، در برخی نواحی همچنان فضاهای خالی و ناپیوستگی موضعی در ماتریس مشاهده می شود. (خطوط قرمز) با افزودن محلول ۶ مولار هیدروکسید سدیم





شکل ۷: میکروگرافهای SEM برای خاک کائولینیت نمونه‌های (a) K90C10،

(b) K90C5SF5، (c) K90C5SF5+6MNaOH و

(d) K90C5SF5+1.5%Na₂SiO₃

۴- نتیجه گیری

۱. افزودن ۵۰٪ میکروسیلیس به مخلوط تثبیت‌کننده، همراه با ۱۰٪ تثبیت‌کننده کل، منجر به بهبود چشمگیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مقاومت فشاری (UCS) خاک شد. این بهبود عمدتاً ناشی از واکنش‌های پوزولانی ثانویه است.

۲. فعال‌سازی قلیایی نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه ریزساختار و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی ایفا کرد. نمونه‌های حاوی هیدروکسید سدیم ۶ مولار (NaOH) متراکم‌ترین ریزساختار، کمترین فضای خالی و گسترده‌ترین تشکیل ژل‌های C-S-H و N-A-S-H را نشان دادند. این مشاهدات مستقیماً با نتایج مکانیکی در این نمونه‌ها همبستگی داشت.

۳. مقایسه بین فعال‌سازها نشان داد که NaOH عملکرد مؤثرتری نسبت به سیلیکات سدیم (Na₂SiO₃) در ایجاد ماتریس پیوسته و متراکم داشت. این موضوع، توان بیشتر NaOH را در حل‌سازی فازهای آلومینوسیلیکاتی و تسريع واکنش‌های ژئوپلیمری تأیید می‌کند.

به نمونه دوم یعنی شکل ۷c (K₉₀C₅SF₅+۵MNaOH)، تغییر محسوسی در مورفولوژی ریزساختار مشاهده می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های پیشین، ماتریس ریزساختاری یکنواخت‌تر و متراکم‌تر به نظر می‌رسد و میزان فضاهای خالی قابل مشاهده در بین تجمعات ذرات کاهش یافته است. همچنین، پیوستگی بیشتری میان ذرات و فاز زمینه مشاهده می‌شود و مرز بین برخی تجمعات ذرات کمتر مشخص است. این تغییرات را می‌توان به افزایش واکنش‌پذیری اجزای آلومینوسیلیکاتی در محیط قلیایی و تشکیل محصولات واکنش‌دهنده نسبت داد (فلش زرد). با این حال، افزایش پیوستگی ماتریس با تشکیل و تجمع محصولات واکنش سازگار است. این ویژگی‌های ریزساختاری با افزایش مقاومت فشاری نمونه فعال‌شده با NaOH نسبت به نمونه‌های بدون فعال‌کننده و همچنین نتایج مکانیکی حاصل از پژوهش حاضر همخوانی دارد.

در شکل ۷d (K₉₀C₅SF₅+۱.۵٪Na₂SiO₃) که محلول ۱.۵٪ سیلیکات سدیم به نمونه ی دوم اضافه شد نیز تغییرات محسوسی در ساختار ریزمقیاس نسبت به نمونه حاوی سیمان و میکروسیلیس مشاهده می‌شود. ریزساختار نسبتاً متراکم‌تر شده و در برخی نواحی، پیوستگی بیشتری میان تجمعات ذرات ایجاد شده است (فلش زرد)؛ با این حال، همچنان فضاهای خالی و نواحی ناپیوسته در ماتریس قابل مشاهده هستند (فلش قرمز). در مقایسه با نمونه فعال‌شده با NaOH، یکنواختی و پیوستگی ماتریس در این نمونه کمتر به نظر می‌رسد. این تفاوت می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت در میزان و نحوه پیشرفت واکنش‌های قلیایی و تشکیل محصولات واکنش در دو سیستم فعال‌کننده باشد. کاهش نسبی پیوستگی و افزایش موضعی فضاهای خالی در مقایسه با نمونه NaOH نیز با عملکرد مکانیکی پایین‌تر این سیستم در نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر سازگاری دارد.

۱- مراجع

1. Goodarzi, A.R., Goodarzi, S.H., Akbari, H.R., 2015. Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 39(C2), pp. 333–350. <https://doi.org/10.22099/IJSTC.2015.313>.
2. Zamanian, M., Salimi, M., Payan, M., Noorzad, A., Hassanvandian, M., 2023. Development of high-strength rammed earth walls with alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and waste tire textile fiber (WTTF) as a step towards low-carbon building materials. *Construction and Building Materials*, 394(132180). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132180>.
3. Komnitsas, K., Vathi, D., Steiakakis, E., Bartzas, G., Perdikatsis, V., 2023. Insights on stabilization of marly soils through alkali activation with the use of slag and metakaolin as additives. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8(100400). <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100400>.
4. Lin, J., Zhang, Y., Yang, Z., 2023. A Review of Recent Advances in Alkali-activated Materials from Silica-rich Wastes Derived Sodium Silicate Activators. *Journal of Advanced Concrete Technology*. <https://doi.org/10.3151/jact.21.189>.
5. Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., Salimi M., 2016. Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Appl Clay Sci*, 132, pp. 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>.
6. Rivera, J.F., Orobiob, A., Mejía, d.e., Gutiérrez, R., Cristelo N., 2020. Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.07519>.
7. 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*
۴. در مواجهه با چرخه‌های تر-خشک، سیستم تثبیت‌شده با NaOH دوام بیشتری را نشان داد و مقاومت خود را بهتر حفظ کرد، در حالی که سیستم Na_2SiO_3 افت سریع‌تر مقاومت و شکست زود هنگام را تجربه کرد. این یافته بر اهمیت انتخاب صحیح فعال‌ساز قلیایی در تضمین پایداری طولانی‌مدت تأکید دارد.
۵. همبستگی مستقیم و قوی بین نتایج مکانیکی (UCS و ITS) و مشاهدات ریزساختاری (SEM) تأیید می‌کند که تراکم ریزساختاری، پیوستگی ماتریس و توسعه مؤثر ژل‌های واکنشی، عوامل اصلی بهبود رفتار مهندسی و دوام خاک تثبیت‌شده هستند. ارتباط مستقیم میان توسعه ریزساختار و رفتار مکانیکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش است.
۶. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از میکروسیلیس با جایگزینی زیاد (۵۰٪) و فعال‌سازی قلیایی کنترل‌شده (به‌ویژه با NaOH)، می‌تواند راهکاری مؤثر و پایداری از نظر زیست‌محیطی برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های رسی باشد. این رویکرد پتانسیل بالایی برای کاهش مصرف سیمان و کاربردهای عملی در پروژه‌های ژئوتکنیکی دارد.
- تاییدهای اخلاقی:** تعارض منافع: این مطالعه نیازی به تایید کمیته اخلاق انسانی یا حیوانی نداشته است. نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافع شخصی یا مالی مرتبط با این پژوهش وجود ندارد.
- سهم نویسندگان:** حسن شرفی: ایده پرداز، بازبینی، اعتبار سنجی، ویرایش، نظارت.
- حمیدرضا اکبری: مدیریت پروژه، ایده پرداز، روش شناسی، تحلیل داده‌ها، پژوهش، نگارش اولیه، بازبینی و نگارش.
- فاطمه رنجبر: جمع‌آوری و سازماندهی داده‌ها، نگارش اولیه، اعتبار سنجی و ویرایش.
- منابع مالی:** این پژوهش بدون تامین مالی خارجی یا استفاده از منابع مالی مستقل انجام شده است.

- industrial based precursors in the stabilization of weak soils with geopolymer: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 16(e00886). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00886>.
15. T V, K., Bhasi, A., 2026. Strength development in high plasticity clayey soil using alkali-activated rice husk ash geopolymer. *International Journal of Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19386362.2026.2638377>.
16. Medvey, B., Dobszay, G., 2020. Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Review. *Geotech Geol Eng*, 38, pp. 2403–2425. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6>.
17. Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa, A.I., Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., 2013. Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0729-0>.
18. Odeh, N.A., Al-Rkaby, A.H.J., 2022. Strength, durability, and microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil. *Case Studies in Construction Materials*, 16(e00988). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00988>.
19. Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B. K., and Mohanty, A. N., 2016. Effect of the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratio and NaOH Molarity on the Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *In Geo-Chicago*. <https://doi.org/10.1061/9780784480151.034>.
20. Yao, J., Qiu, H., He, H., Chen, X., and Hao, G., 2023. Application of a Soft Soil Stabilized by Composite Geopolymer. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001586](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001586).
- and *Geotechnical Engineering*, 14, pp. 576–591 . <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.08.012>.
8. Zaini, M.S.I., Hasan, M., Almuaythir, S., Hyodo, M., 2024. Experimental investigations on physico-mechanical properties of kaolinite clay soil stabilized at optimum silica fume content using clamshell ash and lime. *Scientific Reports*, 14(10995). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61854-1>.
9. Ghadir, P., Zamanian, M., Mahbubi-Motlagh, N., Saberian, M., Li, J., Ranjbar, N., 2021. Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study. *Transportation Geotechnics*, 31(100639). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100639>.
10. Shi, X., Xu, L., Huang, K., Cheng, F., Zha, Q., Zhao, M., Xie, Y., Fang, Z., Pan, Y., Sun, Y., 2025. Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Soil Stabilized with Alkali-Activated Slag–Steel Slag–Silica Fume. *Journal of Testing and Evaluation*. <https://doi.org/10.1520/JTE20240254>.
11. Rafiean, A. H., Haddad, A., & Najafi Kani, E. 2023. Performance evaluation of novel chemical activators for soil stabilization by activated slag. *Journal of Modares Civil Engineering*, 20(2). pp 41-54. [IN Persian]
12. Arun, E., Arumairaj, P.D., Janaki, Raman.S., 2019. Application of Geopolymer in Stabilization of Soft Clay. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, pp. 2277–3878 .
13. Wu, J., Min, Y., Li, B., Zheng, X., 2021. Stiffness and strength development of soft clay stabilized by one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading. *Soils and Foundations*, 61, pp. 974–988. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.001>.
14. Parthiban, D., Vijayan, D.S., Koda, E., Vaverkova, M.D., Piechowicz, K., Osinski, P., Duc, B.V., 2022. Role of

<https://doi.org/10.22034/25.3.1> .

28. Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L., 2019. Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soil and Foundations*, 59, pp. 1906–1920.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.005>

29. Hatefi, M.H., Arabani, M., Payan, M., Zanganeh Ranjbar, P., 2024. The influence of volcanic ash (VA) on the mechanical properties and freeze–thaw durability of lime kiln dust (LKD)-stabilized kaolin clayey soil. *Results in Engineering*, 24(103077).

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103077> .

30. Jafari Kermanipour, M., Bagheripour, M.H., Yaghoubi, E., 2024. Mechanical and Microstructural Characterization of a Nano-stabilized Sandy Soil. *Geotech Geol Eng*, 42, pp. 6131–6146. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02890-6> .

31. Kurdi, A, M., Tofigh, V. 2018. Stabilization of sandy soil using copper slag geopolymer and a geopolymer composed of copper slag and microsilica. *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/J30.2018.1999.2057>.

32. Luo, Z., Luo, B., Zhao, Y., Li, X., Su, Y., Huang, H., Wang, Q., 2022. Experimental Investigation of Unconfined Compression Strength and Microstructure Characteristics of Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Stabilized Riverside Soft Soil. *Polymers*, 14(307). <https://doi.org/10.3390/polym14020307> .

33. Hamid, W., Alnuaim, A., 2023. Evaluation of the durability and strength of stabilized sabkha soil with geopolymer. *Case Studies in Construction Materials*, 18(e02051). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02051> .

34. Razeghi, H.R., Safae, F., Geranghadr, A., Ghadir, P., Javadi, A., 2024. Investigating accelerated carbonation for alkali activated slag stabilized sandy soil. *Geotech Geol Eng*,

21. Karozou, A., Konopisi, S., Pavlidou, E., Stefanidou, M., 2020. Long-term behavior and durability of alkali-activated clay mortars. *Materials*, 13(3790). <https://doi.org/10.3390/ma13173790> .

22. Alrubaye, A.J., Hasan, M., Fattah, M.Y., 2016. Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1), pp. 90–96. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1187884>

23. Aldabsheh, I., Khoury, H., Wastiels, J., Rahier, H., 2015. Dissolution behavior of Jordanian clay-rich materials in alkaline solutions for alkali activation purpose. Part I. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.004> .

24. Efe, M., Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2024. Effect of Na 2SiO3/NaOH rate and natural zeolite content on basalt fiber reinforced eco-efficient slag-based geopolymer mortar synthesis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24(215). <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01021-5> .

25. Akbari, H.R., Sharafi, H., Goodarzi, A.R., 2021. Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.06.001> .

26. Manjarrez, L., Nikvar-Hassani, A., Shadnia, R., and Zhang, L., 2021. Experimental Study of Geopolymer Binder Synthesized with Copper Mine Tailings and Low-Calcium Copper Slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002808](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002808) .

27. Shahidi, S., Bayat, M., & Zarei, S. A. 2025. Experimental study of compressive strength and shear strength parameters of treated sand with nanomaterial, basalt fiber and polymer. *Journal of Modares Civil Engineering*, 25(3), 2025, pp. 19-32

42. Sun, Y., Pan, A., Ma, Y., Zhang, J., Chang, J., Wang, Z., 2024. Kinetics of kaolinite dissolution and hydrosodalite precipitation during alkali leaching of diasporic bauxite. *Applied Clay Science*, 107537. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107537>.
43. Das, B.M., Sobhan, K., 2018. Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning, Boston, MA.
44. Pathak, G. K., & Hayano, K., 2025. Effective Use of Waste Basalt Rock Powder for Stabilizing Kasaoka Clay: Insights and Environmental Value. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(6). <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03222-y>.
45. Poyraz, S., 2026. Mechanical properties of stabilized clay with lime, silica fume, and basalt fiber: A RSM approach. *Applied clay science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2026.108227>.
46. Riyadh Hayder, M., Ziari, H., Shaban, A.M., 2025. Strength and microstructural characteristics of sand soils stabilized with paper sludge AshBased geopolymer. *Scientific Reports*, 15(8752). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92813-z>.
47. Shi, X., Zha, Q., Li, S., Cai, G., Wu, D., Zhai, C., 2022. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer-modified clay. *Molecules*, 27(4805). <https://doi.org/10.3390/molecules27154805>.
48. Kamiloğlu, H.A., Kurucu, K., Akbaş, D., 2024. Investigating the effect of polypropylene fiber on mechanical features of a geopolymer-stabilized silty soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(2), pp. 628–643. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0488-z>.
49. Akbari, H.R., Sharafi, H., 2025. Enhanced stabilization of weak materials derived from highly weathered slate rock under harsh climatic conditions. *Bulletin of Engineering* 42, pp. 575–592. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02590-7>.
35. Maheepala, M., Nasvi, M., Robert, D., Kurukulasuriya, L., Gunasekara, C., Nimesha, K., 2026. Durability performance of geopolymer stabilised expansive soil incorporating novel rice husk ash-based waste derived alkaline activator. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2026.2642959>.
36. Ayeldeen, M., Kitazume, M., 2017. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), pp. 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.005>.
37. Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., 2019. Impact of lime-slugs combination on the hydro-mechanical behavior of clayey soils. *J Civ Environ Eng*, 49(1), pp. 97–108. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2019.8960>.
38. Zimar, Z., Robert, D., Giustozzi, F., Zhou, A., Setunge, S., Kodikara, J. 2024. Use of industrial wastes for stabilizing expansive clays in pavement applications: durability and microlevel investigation. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02298-9>.
39. Soltaninejad, S. Hamidi, S. Marandi, M. 2018. Effect of the amount, type, and percentage of clay minerals on the properties of lime-stabilized clay soils. *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/J30.2018.2226.2139>.
40. ASTM. 2006. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
41. Xiao, C., Chai, Z., Li, T., Yan, K., Liu, X., Shen, Y., Xin, Z., 2023. Mechanical properties of defective kaolinite in tension and compression: A molecular dynamics study. *Applied Clay Science*, 107164. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107164>.

- Resilience and Sustainability of Infrastructure*. ASCE, pp. 234–243. <https://doi.org/10.1061/9780784482032.025>.
57. Kumar, P., Puppala, A.J., Biswas, N., Congress, S.S.C., Tingle, J.S., Little, D.N., 2024. Assessment of durability of chemically stabilized soils using different moisture-susceptible methods. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/03611981241244795>.
58. Hu, W., Li, K., Yin, W., Zhang, H., Xue, Y., Han, Y., Liu, P., 2024. Effects of wetting–drying cycles on the macro and micro properties of the cement-stabilized soil with curing agent. *Buildings*, 14(1716). <https://doi.org/10.3390/buildings14061716>.
59. Jinyu Ge., Fei Xu., Yunhong Zhan., Xuesong Han., Xingyu Meng., Pengfei Zhu., Wenxun Qian., 2026. Strength and permeability evolution in low-cement NaOH-activated kaolinite soils: Thermodynamic simulation and multi-technique validation. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115871>.
60. Luo, H., Han, F., Feng, R., Liu, F., Wang, Sh., Fuerhaiti, A., Li, J. 2026. Effects of dry-wet-freeze-thaw cycles on the strength properties and microscopic mechanism of metakaolin-based geopolymer-solidified soil. *Research in Cold and Arid Regions*. <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2026.04.004>.
61. Ural, N. 2020. The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *DE GRUYTER*. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0145>.
- EPA. 1983. Process Design Manual: Land Application of Municipal Sludge. EPA-625/1-83-016. Municipal Environmental Research Laboratory.
- Hendershot, W.H., Duquette, M., 1986. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), pp. 605–608.
- Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04458-x>.
50. Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., 2014. Assessing the anion type effect on the hydro-mechanical properties of smectite from macro and micro-structure aspects. *Geomech Eng*, 7(2), pp. 183–200. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.2.183>.
51. Akbari, H.R., Sharafi, H., Goodarzi, A.R., 2020. Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02028-x>.
52. Goodarzi, A.R., Sahab-Roshan, M., Akbari, H.R., 2016. Assessing the effect of cement and nano-clay mixture on the stabilization of heavy metal contaminated soil. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 18(4). [In Persian].
53. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Sedighi, M., 2006. Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite. *Applied Clay Science*, 32(3–4), pp. 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.02.003>.
54. Pourakbar, S., Maneshmoaveni, A., Moazami, D., Moretti, L., Yousefi, A., Cristelo, N., 2025. Stabilization of clay soil using alkali-activated sewage sludge. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17, pp. 3213–3224. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.09.029>.
55. Afarani, F., khat, V. 2022. Laboratory Investigation of Changes in Strength Behavior and Microstructure of Oil-Contaminated Clay (A Case Study). *Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE)*. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/J30.2022.60763.3123>.
56. Shekhawat, P., Shrivastava, N., Shrivastava, S., 2018. Experimental investigation on durability of soil reinforced with sustainable fibers subjected to wet-dry cycles. In: *Urbanization Challenges in Emerging Economies*:

ویدئو استای نشده