

Evaluation of the Mechanical Properties of Clay Stabilized with Sodium Silicate Waste and Lime

Ahmad Yousefi¹, Mohammad Azadi^{2*}, Homayoun Jahanian³, Alireza Tabarsa⁴

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Gorgan, Golestan University, Iran

ABSTRACT

Clay soils pose significant challenges in geotechnical engineering due to their inherently low bearing capacity, pronounced shrink–swell behavior, and high sensitivity to moisture variations. In this study, lime was combined with sodium silicate waste (SSW) to provide a sustainable and cost-effective stabilization technique aimed at improving the engineering performance of clayey soils. The key objectives were to minimize lime usage, enhance mechanical strength, and valorize an industrial byproduct with high pozzolanic reactivity. The SSW employed contained reactive mineral phases such as analcime, gehlenite, anorthite, and calcite, which, under the alkaline environment created by lime hydration, participated in chemical reactions forming cementitious compounds including calcium silicate hydrate (C–S–H) and calcium aluminosilicate hydrate (C–A–S–H). Laboratory investigations—comprising unconfined compressive strength (UCS), Atterberg limits, and compaction tests—demonstrated that incorporating SSW not only synergistically increased soil strength but also reduced plasticity indices and improved compaction behavior. Microstructural observations using scanning electron microscopy (SEM) confirmed the formation of dense gel networks and new cementitious phases at soil particle interfaces, validating the underlying stabilization mechanisms. Beyond technical benefits, the reuse of this industrial waste substantially decreased lime demand and associated CO₂ emissions, offering an environmentally responsible solution for waste management. Overall, the results highlight lime–SSW stabilization as a sustainable, efficient, and practical strategy for treating problematic clay soils in geotechnical applications.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 June 2026

Revise Date: 16 June 2026

Accept Date: 22 June 2026

Keywords:

Soil stabilization

Clay soil

Sodium silicate waste (SSW)

Lime

Pozzolanic reaction

C–S–H

SEM

Sustainable development

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.584879.4004>

*Corresponding author: Mohammad Azadi

Email address: Azadi11@iau.ac.ir.

ارزیابی خواص مکانیکی خاک رسی تثبیت شده با پسماند سیلیکات سدیم و آهک

احمد یوسفی^۱، محمد آزادی^{۲*}، همایون جهانیان^۳، علیرضا طبرسا^۴

۱ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲ - دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳ - استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۴ - دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

خاک های رسی به دلیل ظرفیت باربری پایین ذاتی، رفتار انقباض-انبساط قابل توجه و حساسیت بالا به تغییرات رطوبتی، چالش های مهمی را در مهندسی ژئوتکنیک ایجاد می کنند. در این پژوهش، آهک با پسماند سیلیکات سدیم (SSW) ترکیب شد تا رویکردی پایدار و مقرون به صرفه برای بهسازی و تثبیت خاک های رسی و ارتقای عملکرد مهندسی آن ها ارائه گردد. اهداف اصلی شامل کاهش مصرف آهک، افزایش مقاومت مکانیکی و بهره برداری مجدد از یک محصول جانبی صنعتی با فعالیت پوزولانی بالا بود. پسماند سیلیکات سدیم مورد استفاده حاوی فازهای معدنی واکنش پذیر نظیر آنالسیم، گهلیت، آنورتیت و کلسیت بود که در محیط قلیایی ناشی از هیدراسیون آهک، در واکنش های شیمیایی شرکت کرده و منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی از جمله هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) شدند. نتایج آزمایشگاهی شامل مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، حدود اتیرگ و آزمایش های تراکم نشان داد که افزودن SSW نه تنها به صورت هم افزا موجب افزایش مقاومت خاک می شود، بلکه شاخص خمیری را کاهش داده و رفتار تراکمی را بهبود می بخشد. مشاهدات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تشکیل شبکه های ژلی متراکم و فازهای سیمانی جدید در مرز دانه های خاک را تأیید کرد که بیانگر سازوکارهای تثبیت است. علاوه بر مزایای فنی، استفاده مجدد از این پسماند صنعتی موجب کاهش قابل توجه مصرف آهک و انتشار CO₂ مرتبط شد و راهکاری سازگار با محیط زیست برای مدیریت پسماند ارائه داد. در مجموع، نتایج نشان می دهد که تثبیت خاک با ترکیب آهک و SSW رویکردی پایدار، کارآمد و عملی برای بهسازی خاک های رسی مسئله دار در کاربردهای ژئوتکنیکی است.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک، خاک رسی، پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، آهک، واکنش پوزولانی، هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، توسعه پایدار

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتالی:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	
۱۴۰۵/۰۳/۱۳	۱۴۰۵/۰۳/۲۶	۱۴۰۵/۰۴/۰۱	۱۴۰۵/۰۴/۰۱	۱۴۰۵/۰۶/۳۱		
					https://doi.org/10.22065/jsce.2026.584879.4004	10.22065/jsce.2026.584879.4004
*نویسنده مسئول:					محمد آزادی	
پست الکترونیکی:					Azadi11@iau.ac.ir	

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

خاک‌های رسی به دلیل ظرفیت باربری پایین، حساسیت بالا به رطوبت و رفتار نامطلوب انقباض-انبساط، چالش‌های قابل توجهی را در صنعت ساخت‌وساز ایجاد می‌کنند. در نتیجه، حضور آن‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیکی اغلب منجر به مشکلاتی می‌شود که نیازمند راهکارهای مؤثر بهسازی زمین هستند. در میان روش‌های مختلف توسعه‌یافته برای رفع این مشکلات، تثبیت شیمیایی با استفاده از آهک و سیمان پرتلند به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها مطرح شده است [۱]. خاک‌های رسی نرم به‌ویژه دارای رطوبت بالا، مقاومت برشی پایین و تراکم‌پذیری قابل توجه هستند که آن‌ها را به یکی از دغدغه‌های اصلی در مهندسی تبدیل می‌کند [۲]. علاوه بر این، خاک‌های ضعیف با عملکرد مکانیکی پایین، محدودیت‌های جدی در بهره‌وری و ایمنی ساخت‌وساز ایجاد می‌کنند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش‌هایی مانند پیش‌بارگذاری، تراکم و تثبیت شیمیایی به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در میان آن‌ها، تثبیت با آهک به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها شناخته می‌شود [۳]. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، به‌ویژه آهک، به دلیل توانایی در تغییر قابل توجه پارامترهای ژئومکانیکی از طریق واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در سال‌های اخیر، آهک به یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز برای بهسازی خاک تبدیل شده است [۴]. همچنین، مواد تثبیت‌کننده نه تنها خواص مهندسی خاک را بهبود می‌بخشند، بلکه با افزایش قابلیت اجرا در خاک‌های ضعیف، هزینه‌های پروژه را نیز کاهش می‌دهند [۵].

طائی و همکاران^۱ [۳] تغییرات حدود خمیری خاک‌های رسی تثبیت‌شده با آهک را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش مقدار آهک موجب بهبود خواص مهندسی خاک می‌شود؛ با این حال، عملکرد بهینه در درصد‌های ۳ تا ۵ درصد آهک مشاهده شد. همچنین مشخص شد که زمان عمل‌آوری تأثیر قابل توجهی بر واکنش‌های شیمیایی دارد و نتایج مطلوب‌تر پس از ۲۸ روز حاصل می‌شود. آهک عمدتاً از اکسید کلسیم (CaO) تشکیل شده است که پس از هیدراتاسیون به هیدروکسید کلسیم $[Ca(OH)_2]$ تبدیل می‌شود. این ترکیب سپس با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک واکنش داده و ترکیبات سیمانی مانند هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) را تشکیل می‌دهد که موجب افزایش مقاومت و بهبود ساختار خاک می‌شوند [۶]. با این حال، استفاده گسترده از سیمان و آهک در تثبیت خاک با نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل توجهی همراه است [۷] که شامل مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد [۸]. بنابراین، به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های بالای تولید سیمان و همچنین محدودیت‌ها و کاهش کارایی آهک در برخی شرایط، جستجو برای جایگزین‌های بهینه و مقرون‌به‌صرفه اهمیت بیشتری یافته است [۹]. کاربرد روش‌های تثبیت شیمیایی، به‌ویژه با استفاده از آهک و ترکیبات مبتنی بر سیلیکات سدیم، توجه زیادی را در میان پژوهشگران به عنوان روشی مؤثر برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله‌دار به خود جلب کرده است [۱۰]. در خاک‌های سولفاته، استفاده از پایدارکننده‌های پایه کلسیم (مانند آهک و سیمان) می‌تواند تحت شرایط مرطوب منجر به تشکیل کانی اترینگایت و ایجاد تورم قابل توجه شود. با این حال، در نمونه‌های حاوی سیلیکات سدیم، مصرف سریع یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) برای تشکیل ژل C-S-H باعث کاهش پایدار غلظت Ca^{2+} شده و از تشکیل اترینگایت جلوگیری می‌کند [۱۱]. سیلیکات سدیم یک فعال‌کننده قلیایی مقرون‌به‌صرفه است که واکنش‌های ژئوپلیمری را القا می‌کند [۱۲]. همچنین استفاده از سیلیکات سدیم (SS) و هیدروکسید سدیم (SH) می‌تواند مقاومت خاک را افزایش داده، مدول الاستیسیته را بالا ببرد و تغییر شکل‌پذیری را کاهش دهد [۱۳]. یکی از راهکارهای مهم برای کاهش اثرات زیست‌محیطی سیمان، استفاده از مواد قلیایی فعال‌شده (AAMS) است. یکی از رایج‌ترین فعال‌کننده‌ها در این مواد، سیلیکات سدیم تجاری (CSS) است، اما تولید آن انرژی‌بر بوده و انتشار CO_2 بالایی دارد؛ بنابراین یافتن جایگزین‌های پایدارتر برای آن همچنان یک موضوع مهم تحقیقاتی است [۱۴]. به دلیل خاصیت چسبندگی و توانایی در پر کردن فضاهای خالی بین ذرات خاک، سیلیکات سدیم به‌طور گسترده در تثبیت خاک استفاده می‌شود [۱۵]. این ماده همچنین با تشکیل ژل سیلیسی معدنی، بدون تغییر قابل توجه در ترکیب خاک،

¹ Taebi et al

موجب کاهش فرسایش بادی می‌شود [۱۶]. با این حال، سیلیکات سدیم به تنهایی برای خاک‌های انبساطی مناسب نیست و ترکیب آن با آهک نتایج بهتری از نظر افزایش مقاومت و کاهش تغییرات حجمی ارائه می‌دهد [۱۷].

همچنین به دلیل انحلال پذیری در محیط‌های اشباع، استفاده از آن باید همراه با آهک یا سیمان انجام شود [۱۸]. آهک و سیلیکات سدیم به عنوان افزودنی‌های رایج برای تثبیت خاک‌های ضعیف شناخته می‌شوند. آهک از طریق هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی، ترکیبات سیمانی مانند C-S-H و C-A-H را تشکیل داده و پیوند بین ذرات خاک را تقویت می‌کند. سیلیکات سدیم نیز با تولید ژل‌های سیلیکاتی، ساختار داخلی خاک را بهبود می‌بخشد. ترکیب این دو ماده می‌تواند مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص CBR را افزایش داده و ضریب نفوذپذیری را کاهش دهد [۱۹]. برای مثال، دارینی و همکاران^۲ [۲۰] نشان دادند که ترکیب ۱۰ درصد آهک و ۱۰ درصد سیلیکات سدیم به طور قابل توجهی مقاومت و مقاومت در برابر تورم خاک‌های انبساطی را افزایش می‌دهد. همچنین جیانگ و همکاران^۳ [۲۱] گزارش کردند که افزودن ۶ درصد سیلیکات سدیم به خاک رس موجب بهبود مقاومت می‌شود، اما مقادیر بیش از حد باعث کاهش مقاومت می‌گردد. نعمت الهی و همکاران^۴ [۲۲] نیز نشان دادند که سیلیکات سدیم مصرف آهک را کاهش داده و به کنترل فرسایش در اطراف کارخانه‌های آهک کمک می‌کند. علاوه بر این، پسماند سیلیکات سدیم تولیدشده در فرآیندهای صنعتی، دارای خواص شیمیایی مشابه سیلیکات سدیم تجاری بوده و به عنوان یک عامل تثبیت کننده جایگزین پیشنهاد شده است. وجود کانی‌های پوزولانی مانند آنالسیم، گهلنیت، آنورتیت و کلسیت در این پسماند، موجب تشکیل ژل‌های مقاوم کننده C-S-H و C-A-S-H می‌شود. ژئولیت نیز به عنوان یک سیلیکات آلومینیومی طبیعی می‌تواند در محیط قلیایی واکنش داده و رفتار خاک را بهبود بخشد [۲۳]. ساواس^۵ [۲۴] تأثیر ترکیب ۲ درصد آهک با درصد‌های مختلف ژئولیت طبیعی را بر تراکم پذیری، تورم و واگرایی خاک بررسی کرد و بهبود قابل توجهی گزارش نمود. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که واکنش‌های پوزولانی بین آهک و ذرات خاک موجب افزایش مقاومت و کاهش واگرایی می‌شود [۲۵] و ترکیب خاکستر بادی و آهک نیز نتایج مشابهی دارد [۲۶]. تحقیقات اخیر نشان‌دهنده روند رو به رشد استفاده از پسماندهای صنعتی در تثبیت خاک است [۲۷] و استفاده از ژئوپلیمرها و افزودنی‌های مکمل برای کاهش اثرات زیست محیطی به طور فزاینده‌ای توصیه می‌شود [۲۸].

هدف اصلی این مطالعه بررسی راهکارهای علمی و عملی برای بهبود تثبیت خاک، کاهش مصرف آهک، استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی و حمایت از توسعه پایدار در مهندسی عمران است. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از آهک و مواد سیلیکاتی پرداخته‌اند، اما اغلب این مطالعات بر استفاده از سیلیکات سدیم تجاری متمرکز بوده‌اند. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از پسماند سیلیکات سدیم به عنوان یک ماده جانبی صنعتی، ضمن بررسی تأثیر آن بر حدود اتربرگ، ویژگی‌های تراکمی، مقاومت فشاری تک‌محوری و ریزساختار خاک، امکان استفاده مجدد از این پسماند و کاهش نسبی مصرف آهک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، معرفی ترکیب‌های بهینه از دیدگاه عملکرد مکانیکی و ملاحظات اقتصادی، از جمله وجوه تمایز و نوآوری پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش، آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به عنوان عوامل اصلی تثبیت کننده مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی آهک مصرفی در آزمایش‌ها در جدول ۱ نتایج آنالیز XRF ارائه شده است.

² Darini et al

³ Jiang et al

⁴ Nematollahi et al

⁵ Savas

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF آهک

ترکیب شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	L.O.I
درصد وزنی (%)	۰/۵۹	۰/۳۶	۱/۱۰	۶۵/۶۵	۰/۲۰	۳۲/۱۰

سیلیکات سدیم یک ترکیب سیلیسی قلیایی، محلول در آب و دارای ساختار پلیمری است که به دلیل دارا بودن سیلیس فعال، در بسیاری از کاربردهای صنعتی و مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد. و معمولاً به صورت کریستالی، شیشه‌ای، پودری یا محلول آبی از طریق واکنش ماسه سیلیسی با کربنات سدیم تولید می شود. این ماده کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله چسب‌ها، سیمان‌ها، خمیر کاغذ، شوینده‌ها، صابون‌ها، افزودنی‌های بتن و مواد تصفیه آب دارد. در فرآیند تولید محلول سیلیکات سدیم، مواد نامحلول و ناخالصی‌ها از طریق فیلتراسیون جدا شده و به صورت رسوب تجمع یافته و پسماند سیلیکات سدیم را تشکیل می دهند. این پسماندها معمولاً دارای نسبت SiO₂ به Na₂O بین ۲/۰ تا ۳/۳ هستند که تقریباً دو برابر مقدار موجود در سیلیکات سدیم قابل استفاده تجاری است و همین امر آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی استاندارد نامناسب می سازد. مطالعات پیشین از سیلیکات سدیم در محدوده‌های صنعتی استفاده کرده‌اند؛ به طوری که وکیلی و همکاران^۶ [۱۵] نسبت‌های ۱/۹ تا ۲/۱ را گزارش کردند، در حالی که ژائو ژانگ و همکاران^۷ [۱۲] از مقدار ۲/۲ استفاده نمودند. در ایران، به دلیل قلیائیت بالا و محدودیت در کاربرد، پسماند سیلیکات سدیم به عنوان پسماند ویژه طبقه‌بندی شده و مطابق مقررات زیست محیطی دفع می شود.

پسماند سیلیکات سدیم مورد استفاده در این تحقیق از شرکت باوند شیمی واقع در شهرک صنعتی لیا، استان قزوین تهیه شد. ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین گردید که در جدول ۲ خلاصه شده است. شرایط نگهداری و نحوه ذخیره‌سازی پسماند سیلیکات سدیم در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲: نتایج آنالیز XRF پسماند سیلیکات سدیم

ترکیب شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	L.O.I
درصد وزنی (%)	۰/۸۶	۵/۱۹	۶۴/۴۱	۱۳/۹۷	۰/۸۴	۵/۳۸	۰/۲۸	۱/۵۷	۷/۵۰

^۶ Vakili et al^۷ Zhao Zhang



شکل ۱: مخازن نگهداری پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

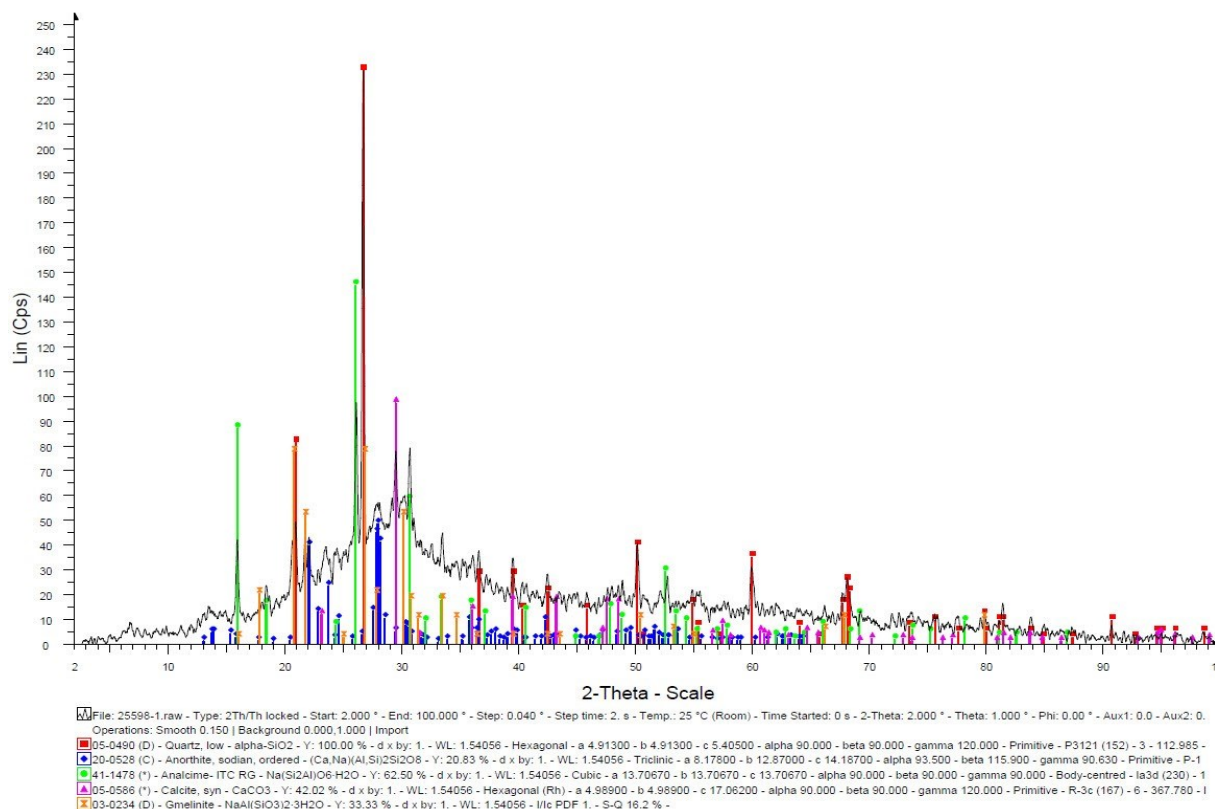
۲-۲- نمونه برداری و مشخصه یابی خاک رسی

نمونه های خاک رسی از منطقه بوئین زهرا (شهر شال)، استان قزوین برداشت شده و به آزمایشگاه جهت انجام آزمون های تکمیلی منتقل شدند. خواص کانی شناسی و شیمیایی نمونه ها با استفاده از روش های پراش اشعه ایکس (XRD) و فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مورد بررسی قرار گرفت.

آنالیز XRD بر روی نمونه پودر شده خاک انجام شد و الگوهای پراش حاصل، فازهای کانی موجود را مشخص نمود (شکل ۲). نتایج نشان داد که ترکیب کانی شناسی خاک عمدتاً شامل کائولینیت، کوارتز و ایلیت است. همچنین غلظت عناصر شیمیایی با استفاده از آزمون XRF تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج آنالیز XRF خاک مورد مطالعه

ترکیب شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	L.O.I
درصد وزنی (%)	۴/۲۶	۱۳/۱۴	۴۴/۴۱	۰/۷	۲/۰۱	۱۵/۱۷	۰/۷۵	۴/۹۶	۱۴/۶۰



شکل ۲: نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) خاک مورد مطالعه

نتایج آنالیز XRF نشان‌دهنده مقدار بالای سیلیس (۴۴/۴۱ درصد) و آلومینا (۱۳/۱۴ درصد) بوده که ماهیت رسی خاک را تأیید می‌کند. همچنین مقدار قابل توجه اکسید کلسیم (۱۵/۱۷ درصد) و افت ناشی از احتراق (L.O.I) معادل ۱۴/۶ درصد، بیانگر حضور فازهای کربناته در خاک است. نتایج آنالیز XRD نیز وجود کانی‌هایی نظیر کوارتز، کلسیت، دولومیت، فلدسپار و کانی‌های رسی را نشان داد که بر این اساس، خاک مورد مطالعه در رده خاک‌های رسی آهکی طبقه‌بندی می‌شود؛ نوعی خاک متداول در محیط‌های رسوبی غنی از کربنات‌ها. حضور کوارتز و فلدسپار نشان‌دهنده منشأ سیلیکاتی خاک و احتمال منشأ آذرین-رسوبی آن است. ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی خاک، به‌ویژه مقدار بالای CaO و L.O.I، بیانگر واکنش‌پذیری مناسب آن با پایدارکننده‌هایی نظیر آهک و مواد پوزولانی است. کانی‌های غالب رسی نیز احتمالاً شامل کائولینیت و ایلیت هستند. خواص فیزیکی خاک رسی شامل وزن مخصوص، درصد رطوبت، حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: خواص فیزیکی و مهندسی خاک رسی

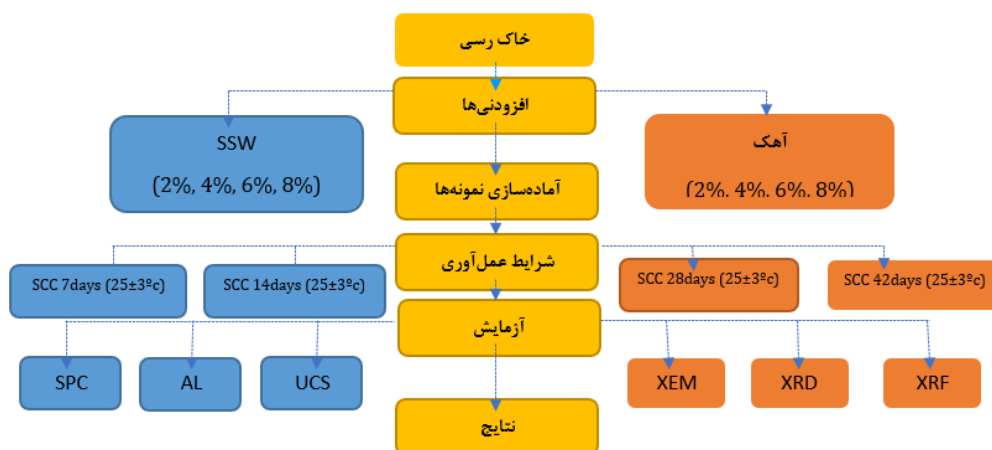
مقدار	خواص
۲/۶۱	وزن مخصوص (Gs)
۴/۳۰	(%) درصد رطوبت طبیعی
۴۱/۴۰	(%) حد روانی
۲۵/۳۰	(%) حد خمیری
۱۶/۱۰	(%) شاخص خمیری
۱/۶۵	(gr/cm ³) حداکثر وزن مخصوص خشک
۱۷/۳۰	(%) درصد رطوبت بهینه

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، تأثیر افزودنی‌ها بر کیفیت تثبیت خاک با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا رطوبت بهینه هر یک از مخلوط‌ها (شامل خاک رسی خالص و خاک رسی حاوی درصد‌های مختلف آهک و پسماند سیلیکات سدیم) بر اساس نتایج آزمایش تراکم تعیین شد. سپس اجزای مخلوط به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی با یکدیگر ترکیب شدند تا مخلوطی یکنواخت و همگن حاصل شود. به منظور اختلاط پسماند سیلیکات سدیم با خاک رسی و جلوگیری از اتلاف انرژی، میزان رطوبت موجود در پسماند محاسبه و از مقدار رطوبت بهینه کسر گردید؛ بدین ترتیب پسماند سیلیکات سدیم به صورت خمیری (پلاستیک) و بدون نیاز به خشک کردن، مستقیماً در مخلوط مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه، مخلوط آماده‌شده به صورت یکنواخت در چهار لایه داخل قالب‌های فلزی استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر متراکم شد. به منظور بهبود پیوستگی بین لایه‌ها، پس از تراکم هر لایه، سطح آن با استفاده از یک جسم نوک‌تیز خراش داده شد. نمونه‌های تهیه‌شده بلافاصله از قالب خارج شده و وزن و ابعاد آن‌ها با دقت اندازه‌گیری گردید. به منظور جلوگیری از تبخیر و اتلاف رطوبت، نمونه‌ها با چند لایه فیلم پلاستیکی پوشانده شده و تا زمان انجام آزمایش تحت همین شرایط نگهداری شدند.

پس از آماده‌سازی، نمونه‌های مخلوط‌شده برای دوره‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دمای آزمایشگاه و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه نگهداری شدند. فلوچارت مراحل اجرای برنامه آزمایشگاهی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: فلوچارت برنامه آزمایشگاهی این پژوهش

۴- نتایج

۴-۱- تأثیر آهک و پسماند سیلیکات سدیم بر حدود اتربرگ

به منظور ارزیابی تأثیر آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر ویژگی‌های خمیری خاک، وزن مخصوص ذرات خاک (Gs) با استفاده از آزمایش پیکنومتر و مطابق با استاندارد ASTM D854 [۲۹] تعیین شد. این آزمایش سه بار تکرار گردید و نتایج حاصل، میانگین وزن مخصوص ۲/۶۱ را برای خاک مورد مطالعه نشان داد.

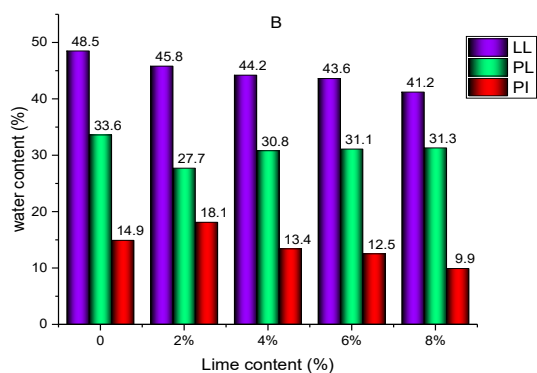
علاوه بر این، حد خمیری (PL)، حد روانی (LL) و شاخص خمیری (PI) خاک‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده بر اساس استاندارد ASTM D4318 [۳۰] اندازه‌گیری شدند. حدود اتربرگ از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین‌کننده قوام و کارپذیری خاک به شمار می‌روند و به‌طور مستقیم تأثیر افزودنی‌ها بر رفتار خاک را منعکس می‌کنند. نمایی از انجام آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های خاک در شکل ۴ ارائه شده است.



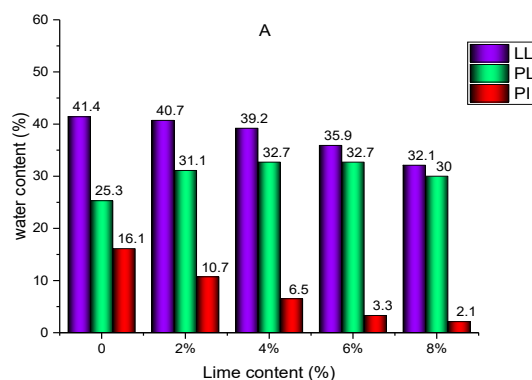
شکل ۴: آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش‌های حد خمیری و حد روانی بر روی نمونه‌های خاک رسی، در حالت تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، بر مبنای وزن خشک خاک انجام شد. به منظور اطمینان از صحت و قابلیت اعتماد نتایج، هر یک از این آزمایش‌ها سه بار تکرار گردید و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده مورد استفاده قرار گرفت. تأثیر مقادیر مختلف آهک و پسماند سیلیکات سدیم بر حدود اتربرگ خاک به‌صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفت.

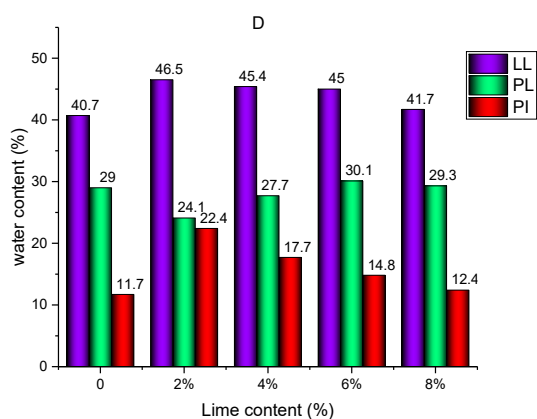
شکل ۵ تغییرات حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) را بر حسب درصد آهک و پسماند سیلیکات سدیم افزوده‌شده به خاک نشان می‌دهد. نتایج به‌وضوح بیانگر آن است که افزودن آهک و پسماند سیلیکات سدیم موجب تغییر در ویژگی‌های خمیری خاک می‌شود. به‌ویژه کاهش محسوس شاخص خمیری نشان‌دهنده بهبود کارپذیری خاک و کاهش حساسیت آن نسبت به تغییرات رطوبتی پس از تثبیت است.



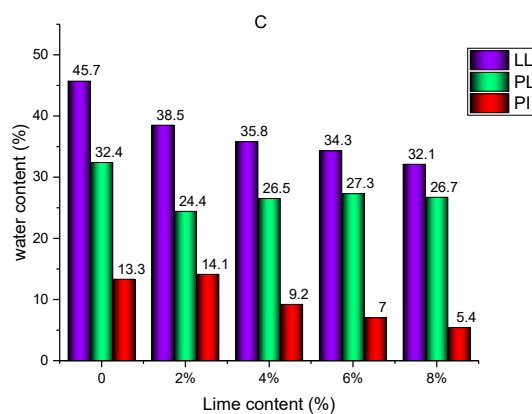
(ب)



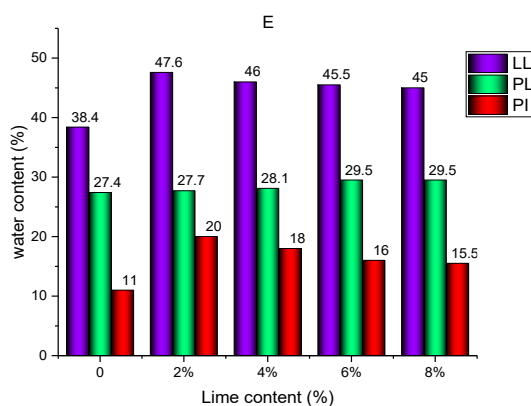
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۵: تاثیرات آهک و پسماند سیلیکات سدیم بر حدود اتربرگ، (الف) آهک، (ب) آهک + ۲ درصد پسماند سیلیکات سدیم، (پ) آهک + ۴

درصد پسماند سیلیکات سدیم، (ت) آهک + ۶ درصد پسماند سیلیکات سدیم و (ث) آهک + ۸ درصد پسماند سیلیکات سدیم

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن آهک در محدوده ۰ تا ۸ درصد تأثیر قابل توجهی بر حدود اتربرگ خاک داشته است (شکل ۵). با افزایش درصد آهک، حد روانی (LL) از حدود ۴۱ درصد به ۳۲ درصد کاهش یافت، در حالی که حد خمیری (PL) از ۲۵ درصد به ۳۲ درصد افزایش پیدا کرد. در نتیجه، شاخص خمیری (PI) از حدود ۱۶ درصد به نزدیک ۲ درصد کاهش یافت که بیانگر بهبود قابل توجه رفتار خمیری خاک است.

با این حال، زمانی که پسماند سیلیکات سدیم (SSW) همراه با آهک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵)، اثر مثبت آهک در کاهش شاخص خمیری تا حد زیادی تضعیف شد. به عنوان مثال، در مخلوط حاوی ۸ درصد آهک و ۴ درصد پسماند سیلیکات سدیم، مقدار PI تقریباً دو برابر شد و در نمونه حاوی ۸ درصد آهک و ۸ درصد پسماند سیلیکات سدیم، شاخص خمیری حدود ۷/۵ برابر افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن مقادیر زیاد پسماند سیلیکات سدیم می‌تواند اثرات مطلوب تثبیت با آهک بر کاهش خمیریت خاک را کاهش داده و حتی در برخی موارد معکوس نماید.

۴-۲- تحلیل تغییرات شاخص خمیری (PI) ناشی از افزودن آهک و پسماند سیلیکات سدیم

به منظور تبیین دقیق‌تر رفتار خمیری خاک‌های تثبیت‌شده، مقادیر شاخص خمیری (PI) متناظر با ترکیب‌های مختلف آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در جدول ۵ ارائه شده است. این مجموعه داده مقایسه‌ای، امکان ارزیابی کمی کارایی هر یک از روش‌های تثبیت را فراهم کرده و میزان تأثیر آهک به تنهایی یا در ترکیب با پسماند سیلیکات سدیم بر کاهش شاخص خمیری خاک را به‌طور روشن نشان می‌دهد.

جدول ۵: نتایج شاخص خمیری (PI) در نمونه‌های مختلف

ترکیب افزودنی‌ها	(PI) بدون آهک	(PI) در مخلوط حاوی ۸ درصد آهک	(PI) درصد کاهش شاخص خمیری
Control Sample	۱۶/۰۹	۲/۱۱	~ ۸٪
Lime + SSW ۲٪	۱۴/۸۷	۹/۸۹	~ ۴/۵٪
Lime + SSW ۴٪	۱۳/۳۲	۵/۴۲	~ ۲/۴۶٪

نتایج آزمایش‌ها (شکل ۵) نشان می‌دهد که افزودن آهک در محدوده ۰ تا ۸ درصد موجب تغییرات قابل توجهی در حدود اتربرگ خاک می‌شود. با افزایش مقدار آهک، حد روانی (LL) از حدود ۴۱ درصد به حدود ۳۲ درصد کاهش یافت، در حالی که حد خمیری (PL) از حدود ۲۵ درصد به نزدیک ۳۲ درصد افزایش پیدا کرد. در نتیجه، شاخص خمیری (PI) کاهش چشمگیری را تجربه کرده و از حدود ۱۶ درصد به نزدیک ۲ درصد رسید. این نتایج بیانگر تأثیر مثبت آهک در کاهش خمیریت و بهبود رفتار مهندسی خاک است.

نتایج حاصل از نمونه‌های تثبیت‌شده با ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) نشان داد که افزودن SSW موجب کاهش کارایی آهک در کاهش شاخص خمیری (PI) می‌شود. (جدول ۵) به‌طور مشخص، در مخلوط حاوی ۸ درصد آهک و ۴ درصد پسماند سیلیکات سدیم، مقدار PI تقریباً دو برابر شد و در مخلوط حاوی ۸ درصد آهک و ۸ درصد پسماند سیلیکات سدیم، این شاخص حدود ۷/۵ برابر افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده بیش از حد از پسماند سیلیکات سدیم نه تنها می‌تواند اثرات مثبت آهک بر کاهش خمیریت خاک را تضعیف کند، بلکه در مقادیر بالا ممکن است موجب معکوس شدن این اثرات و افزایش مجدد خمیریت خاک شود.

۴-۲-۱- مقایسه کمی تغییرات شاخص خمیری (PI)

به منظور درک دقیق‌تر رفتار خمیری در تمامی مخلوط‌ها، مقادیر شاخص خمیری حاصل از ترکیب‌های مختلف آهک و پسماند

سیلیکات سدیم در جدول ۵ ارائه شده است. این تحلیل مقایسه‌ای امکان ارزیابی کمی عملکرد نسبی هر روش تثبیت را در کاهش خمیریت خاک فراهم می‌سازد.

۴-۲-۲- بیشینه کاهش PI و تفسیر مکانیزمی

بیشترین کاهش شاخص خمیری در شرایطی مشاهده شد که پسماند سیلیکات سدیم در مقادیر متوسط تا نسبتاً بالا، به‌ویژه در محدوده ۲ تا ۴ درصد، به مخلوط اضافه گردید. این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالای ترکیب آهک SSW-در بهبود رفتار خمیری خاک‌های رسی است و بیانگر وجود یک مقدار بهینه از SSW می‌باشد، به‌طوری‌که فراتر از آن، اثرات مثبت ممکن است کاهش یافته یا حتی معکوس شوند؛ که این پدیده را می‌توان به تغییر در نحوه اندرکنش بین ذرات خاک و مواد تثبیت‌کننده نسبت داد.

۴-۲-۳- تحلیل مکانیزم‌های حاکم

کاهش حدود اتربرگ در خاک‌های تثبیت‌شده با آهک و پسماند سیلیکات سدیم را می‌توان به چندین مکانیزم مرتبط نسبت داد. نخست، پر شدن فضاهای خالی خاک توسط ترکیبات سیمانی و ژل‌های سیلیکاتی موجب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت جذب آب شده و در نتیجه حد روانی کاهش می‌یابد. دوم، واکنش‌های پوزولانی و سیمانی باعث تجمع و پیوند ذرات ریز شده و تشکیل ساختار متراکم‌تر و مقاوم‌تر را در ماتریس خاک ایجاد می‌کند. سوم، گرچه به‌کارگیری پسماند سیلیکات سدیم منجر به بهبود قابل توجه خواص مهندسی خاک گردیده است، اما اثرات احتمالی حضور یون‌های سدیم در شرایط اشباع و بازه‌های زمانی بلندمدت باید مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، ارزیابی‌های اولیه‌ای در مورد پدیده پراکندگی^۸ انجام شد که نشان داد حضور این پسماند با تقویت پیوستگی ذرات، تا حد زیادی از متلاشی شدن ساختار خاک در شرایط اشباع جلوگیری می‌کند. با این حال، احتمال شسته شدن یون‌ها در بلندمدت و تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، موضوعی است که می‌تواند بر پایداری ساختاری اثرگذار باشد. از آنجایی که تحلیل کمی نرخ آبشویی و آزمایش‌های جامع دوام در محدوده اهداف فعلی این پژوهش نبوده است، انجام این بررسی‌ها برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد بلندمدت مخلوط‌های تثبیت‌شده در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

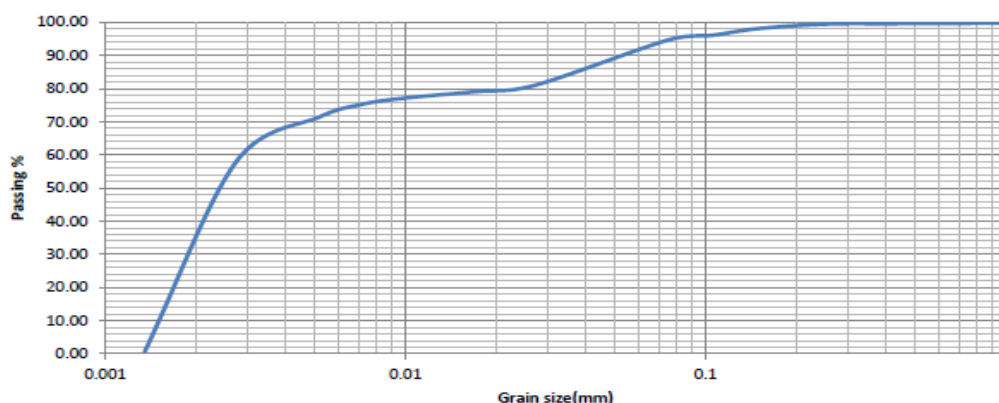
مجموع این سازوکارها، رفتار بهبودیافته خاک تثبیت‌شده با ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را تبیین کرده و با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نیز همخوانی مناسبی دارد.

۴-۳- جمع‌بندی، پیامدهای کاربردی و دانه‌بندی خاک

ترکیب ۸ درصد آهک با ۲ تا ۴ درصد پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به عنوان مؤثرترین حالت در کاهش شاخص خمیری (PI) شناسایی شد که تا حدود ۸ برابر کاهش را به همراه داشت. این روش تثبیت، به عنوان یک رویکرد جایگزین مؤثر برای بهبود رفتار خاک‌های رسی انبساطی، پتانسیل بالایی دارد. علاوه بر این، استفاده مجدد از پسماند صنعتی سیلیکات سدیم نه تنها موجب کاهش هزینه‌های مصالح می‌شود، بلکه با کاهش دفع پسماندهای صنعتی، به پایداری محیط‌زیست و توسعه ساخت‌وساز سبز کمک می‌کند.

۴-۳-۱- توزیع دانه بندی خاک

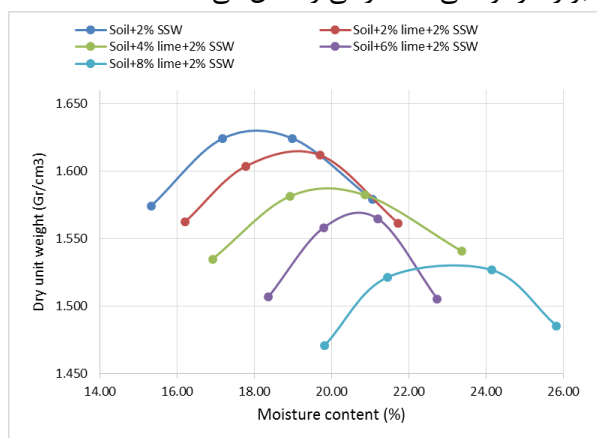
توزیع دانه بندی خاک با استفاده از آزمایش هیدرومتری و مطابق با استاندارد ASTM D422 [۳۱] تعیین شد. نتایج نشان داد که ۹۴/۶۷ درصد از ذرات خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده اند که بیانگر ریزدانه بودن خاک است. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، بخش عمده ذرات (بیش از ۹۴/۶۷ درصد) دارای اندازه های کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی متر هستند که بیانگر غالب بودن ذرات رسی در نمونه مورد مطالعه می باشد.



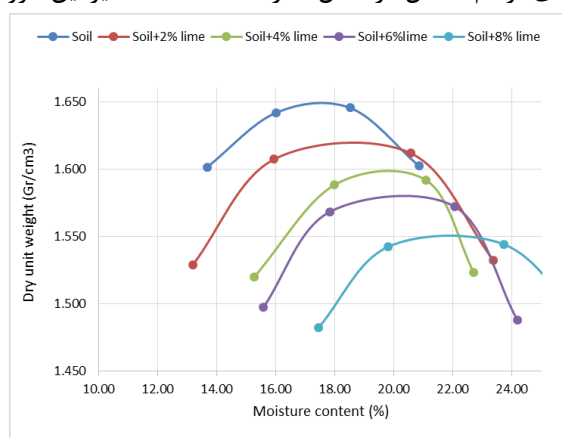
شکل ۶: منحنی توزیع دانه بندی خاک رسی

۴-۳-۲- تعیین رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک

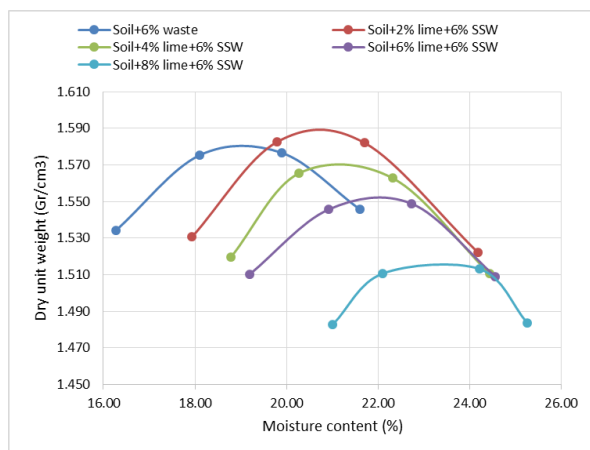
رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) خاک و مخلوط های تثبیت شده با استفاده از آزمایش تراکم استاندارد پروکتور و مطابق با استاندارد ASTM D698 [۳۲] تعیین گردید. این آزمایش ها بر روی نمونه های خاک طبیعی و همچنین مخلوط های خاک تثبیت شده با درصد های مختلف (۲، ۴، ۶ و ۸ درصد) از آهک، پسماند سیلیکات سدیم و ترکیبات آن ها انجام شد. منحنی های تراکم حاصل در شکل ۷ ارائه شده اند که تأثیر این افزودنی ها بر رفتار تراکمی خاک رسی را نشان می دهند.



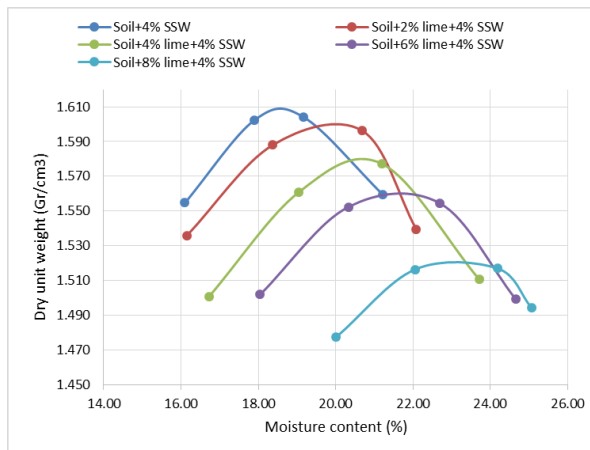
(ب)



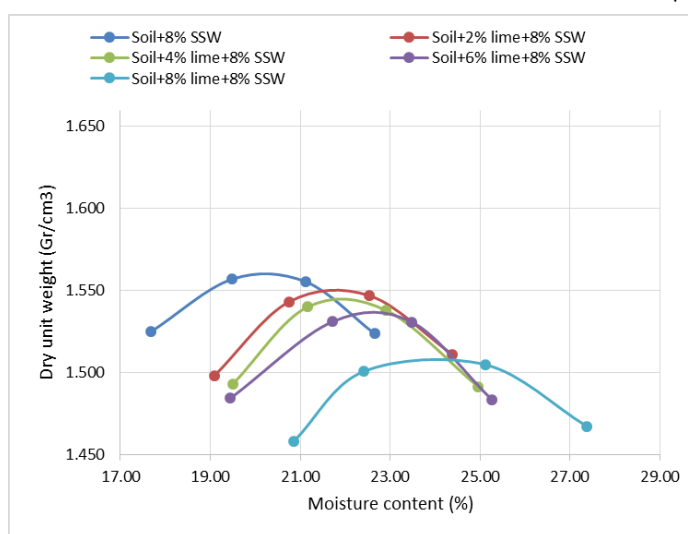
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۷: نتایج آزمایش پروکتر استاندارد برای مخلوط خاک و آهک و پسماند سیلیکات سدیم، (الف) آهک، (ب) آهک + ۲ درصد پسماند سیلیکات سدیم، (پ) آهک + ۴ درصد پسماند سیلیکات سدیم، (ت) آهک + ۶ درصد پسماند سیلیکات سدیم و (ث) آهک + ۸ درصد پسماند سیلیکات سدیم

بر اساس نتایج آزمایش تراکم (شکل ۷)، افزودن آهک در محدوده ۰ تا ۸ درصد تأثیر قابل توجهی بر رفتار تراکمی خاک داشته است. حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) از حدود ۱/۶۵ به ۱/۵۲ گرم بر سانتی متر مکعب کاهش یافت، در حالی که رطوبت بهینه (OMC) از حدود ۱۷ درصد به ۲۴ درصد افزایش پیدا کرد. این روند را می توان به چندین مکانیزم نسبت داد. نخست، آزاد شدن یون های Ca^{2+} از آهک موجب فلوکولاسیون و تجمع ذرات ریز شده و ساختاری درشت تر و متخلخل تر در خاک ایجاد می کند؛ در نتیجه، حجم حفرات افزایش یافته و دستیابی به بیشترین وزن مخصوص خشک کاهش می یابد. دوم، چگالی ذاتی مخلوط تثبیت شده با آهک اندکی کمتر از خاک طبیعی است که این موضوع نیز در کاهش MDD مؤثر است. در نهایت، واکنش های هیدراتاسیون و پوزولانی ناشی از آهک نیاز به آب بیشتری دارند و در نتیجه موجب افزایش OMC می شوند.

همچنین لازم به ذکر است که این تغییرات عمدتاً در مراحل اولیه اختلاط مشاهده می شوند، در حالی که در مراحل عمل آوری بعدی، واکنش های پوزولانی به تدریج موجب بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت خاک می گردند، اگرچه مقدار MDD همچنان کمتر از خاک تثبیت نشده باقی می ماند. در عمل، کاهش MDD لزوماً به معنای کاهش عملکرد مهندسی نیست، زیرا تیمار با آهک می تواند به طور قابل توجهی کارپذیری را بهبود داده، تورم را کنترل کرده و مقاومت بلندمدت را افزایش دهد.

روند مشابهی توسط مین و همکاران [۲] نیز گزارش شده است که در مطالعه خود بر روی تثبیت خاک رس نرم با استفاده از

ژئوپلیمر تک جزئی فعال شده با سیلیکات سدیم جامد، کاهش مشابهی در MDD و افزایش OMC مشاهده کردند. آن‌ها این رفتار را به بازآرایی ساختاری و تشکیل ژل در طی فرآیند تثبیت نسبت دادند. هم‌خوانی نتایج این پژوهش با یافته‌های مین و همکاران^۸ [۲] نشان‌دهنده اعتبار کلی این پدیده در خاک‌های ریزدانه تثبیت‌شده شیمیایی است.

۴-۳-۳- تأثیر ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر خواص تراکمی

زمانی که مقدار SSW در ۲ درصد ثابت نگه داشته شد و میزان آهک از ۲ تا ۸ درصد افزایش یافت، تغییرات پارامترهای تراکمی مطابق جدول ۶ ثبت گردید. افزودن آهک منجر به کاهش ۴٫۳ درصدی در MDD و افزایش ۱۸ درصدی در OMC شد.

جدول ۶: تغییرات MDD و OMC در حضور ۲٪ ثابت پسماند سیلیکات سدیم با افزایش مقدار آهک

Composition	MDD (g/cm ³)	OMC (%)
Clay + 2% lime	۱/۶۲	۱۸/۹
Clay + 8% lime	۱/۵۵	۲۲/۳

در سری آزمایش‌های بعدی، مقدار آهک در سطح ثابت ۸ درصد نگه داشته شد، در حالی که مقدار پسماند سیلیکات سدیم از ۰ تا ۶ درصد تغییر داده شد. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، افزایش غلظت SSW منجر به کاهش تدریجی حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و افزایش قابل توجه رطوبت بهینه (OMC) گردید. این نتایج نشان می‌دهد که حضور SSW به دلیل ویژگی‌های ژل‌ساز و قابلیت جذب آب، نیاز آبی مخلوط‌های خاک و آهک، SSW را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش OMC می‌شود. هم‌زمان، کاهش MDD را می‌توان به وزن مخصوص پایین‌تر و ساختار متخلخل محصولات واکنشی تشکیل‌شده در حضور SSW نسبت داد. جزئیات تغییرات عددی مربوط به MDD و OMC در مقادیر مختلف SSW در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷: تغییرات MDD و OMC در حضور ۸٪ ثابت آهک با افزایش مقدار پسماند سیلیکات سدیم

Composition	MDD (g/cm ³)	OMC (%)
2% SSW + 8% lime	۱/۵۳	۲۳
8% SSW + 8% lime	۱/۵۸	۲۴/۲

افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در کنار آهک موجب حفظ و در برخی موارد تقویت روند بهبود رفتار تراکمی خاک می‌شود. به طور کلی، حضور هم‌زمان این دو ماده باعث کاهش تراکم‌پذیری و بهبود پاسخ خاک تحت بارگذاری می‌گردد که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی بین آهک و SSW است. این رفتار را می‌توان به تغییر ساختار خاک، تشکیل محصولات واکنشی و بهبود پیوستگی بین ذرات نسبت داد، در حالی که استفاده از SSW امکان بهینه‌سازی مصرف آهک را نیز فراهم می‌سازد.

۴-۳-۴- ترکیب بهینه از نظر عملکرد و هزینه

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، ترکیب‌های مختلف آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) از نظر عملکرد تراکمی و صرفه اقتصادی ارزیابی شدند. مطابق جدول ۸، مخلوط حاوی ۸٪ آهک و ۴٪ SSW بیشترین کارایی تراکمی را نشان داد. از دیدگاه کاربردی و اقتصادی، استفاده از SSW این قابلیت را ایجاد می‌کند که بخشی از نیاز به آهک در فرآیند تثبیت کاهش یابد، بدون آنکه افت قابل توجهی در عملکرد تراکمی ایجاد شود. بنابراین، ترکیب ۶٪ آهک و ۸٪ SSW به‌عنوان گزینه‌ای با تعادل مناسب بین عملکرد و کاهش مصرف آهک

⁸ Min

قابل معرفی است و می‌تواند به عنوان یک راهکار بهینه در تثبیت خاک‌های رسی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۸: ترکیب بهینه بر اساس عملکرد مکانیکی و صرفه جویی اقتصادی

مزیت کلیدی	OMC (%)	MDD (g/cm ³)	Composition
بیشترین تراکم	۲۳/۲۹	۱/۵۲۱	4% SSW + 8% lime
تبادل عملکرد و هزینه	۲۲/۲۰	۱/۵۵۲	8% SSW + 6% lime

بنابراین در بهینه‌سازی تثبیت خاک، استفاده از آهک همراه با پسماند سیلیکات سدیم (SSW) می‌تواند به طور مؤثری از تورم و جمع‌شدگی بیش از حد در خاک‌های رسی تحت شرایط رطوبتی متغیر جلوگیری کرده و در نتیجه پایداری حجمی و دوام بلندمدت خاک را بهبود بخشد.

۴-۴-آآماده‌سازی نمونه، آزمایش مقاومت و تحلیل SEM

۴-۴-۱-آآماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) برای ارزیابی اثر افزودنی‌ها بر کیفیت خاک رسی تثبیت‌شده استفاده شد. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا رطوبت بهینه هر مخلوط شامل خاک رسی طبیعی و مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر اساس نتایج آزمایش تراکم تعیین گردید. سپس مقدار آب مورد نیاز به هر مخلوط اضافه شده و نمونه‌ها به صورت دستی به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند تا یکنواختی کامل حاصل شود. برای استفاده از SSW در حالت خمیری و جلوگیری از عدم تعادل رطوبتی، مقدار آب موجود در پسماند محاسبه و از رطوبت بهینه کسر گردید؛ به این ترتیب SSW به صورت مستقیم و در حالت نیمه جامد در مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از قالب‌های فلزی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و به روش تراکم چهار لایه‌ای تهیه شدند. به منظور بهبود پیوستگی بین لایه‌ها، سطح هر لایه پس از تراکم با یک جسم نوک‌تیز به آرامی خراش داده شد.

نمونه‌های آماده‌شده بلافاصله از قالب خارج شده و وزن و ابعاد آن‌ها با دقت اندازه‌گیری شد. برای جلوگیری از اتلاف رطوبت، نمونه‌ها با چند لایه فیلم پلاستیکی پوشانده شده و تا زمان آزمایش تحت این شرایط نگهداری شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه و با حفظ رطوبت اولیه به مدت‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نمایی از نمونه‌های آماده‌شده برای آزمایش UCS در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

۴-۲-۴-۲-۴: آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

به منظور ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) استفاده شد. پس از پایان دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها به دقت از پوشش چندلایه پلاستیکی خارج شده، وزن‌کشی شدند و مشخصات فیزیکی آن‌ها پیش از انجام آزمایش ثبت گردید.

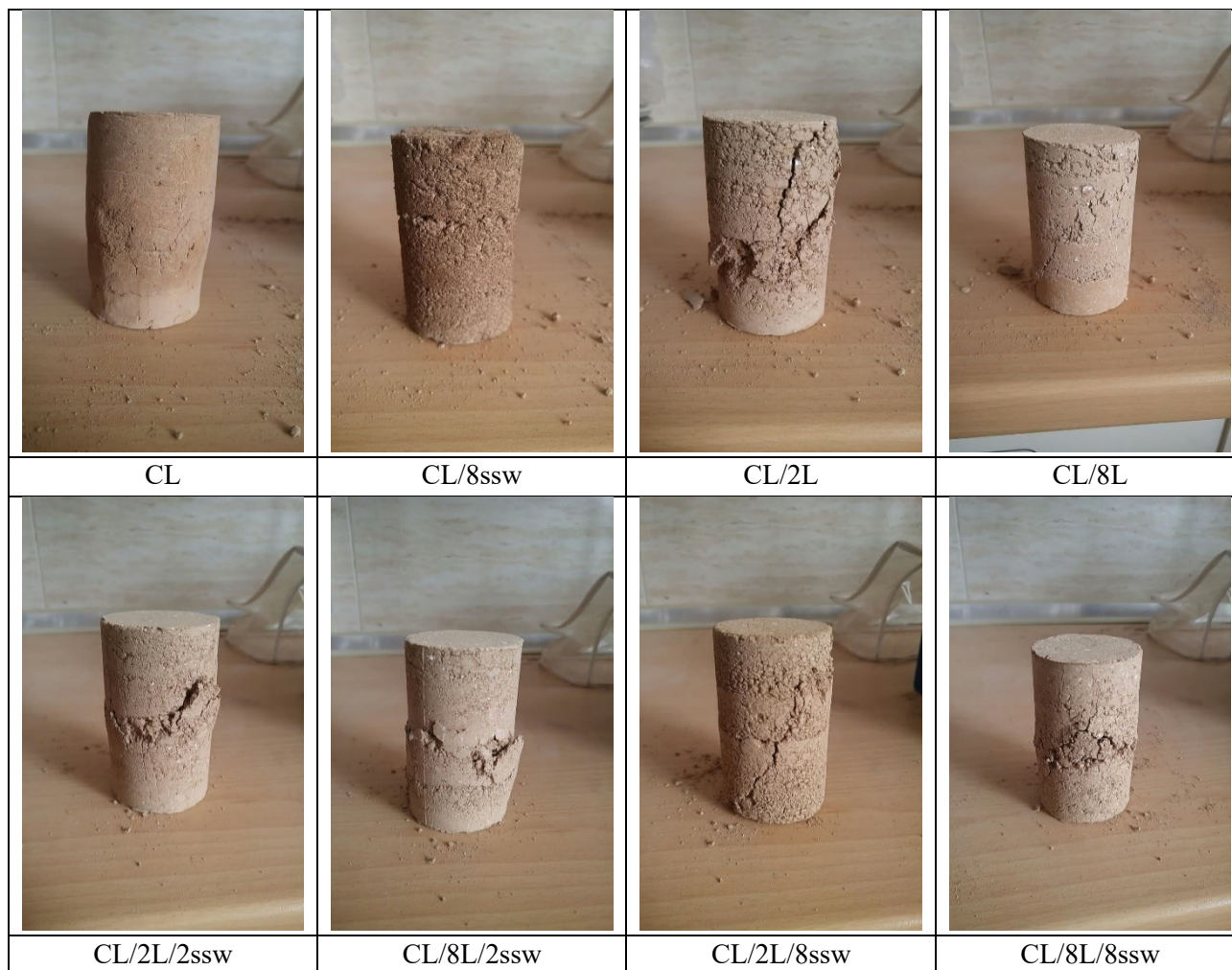
آزمایش تحت شرایط کنترل کرنش و با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه و مطابق با استاندارد [۳۳] ASTM D2166-98 انجام شد. نمایی از دستگاه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹: آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نمونه خاک رس خالص (CL) رفتار گسیختگی شکل‌پذیر و خمیری از خود نشان داد و با سطوح شکست نامنظم و تغییرشکل‌های قابل توجه همراه بود که بیانگر ضعف پیوند بین ذرات و خمیریت بالای خاک است. در مقابل، نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک $CL/2L$ و $CL/8L$ دارای سطوح شکست نسبتاً صاف‌تر و رفتار تردتری بودند و میزان تغییرشکل پلاستیک در آن‌ها کاهش یافت. این رفتار را می‌توان به تشکیل محصولات پوزولانی نظیر ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) نسبت داد که موجب افزایش پیوند بین ذرات و سختی خاک شده‌اند.

نمونه تثبیت‌شده تنها با پسماند سیلیکات سدیم ($CL/8SSW$) دارای ترک‌های ریز و گسیختگی نسبتاً ترد بود که نشان‌دهنده پر شدن فضاهای خالی و ایجاد پیوندهای سیلیکاتی در ساختار خاک است؛ فرآیندی که ضمن افزایش مقاومت، از شکل‌پذیری خاک می‌کاهد. همچنین، مخلوط‌های حاوی ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم $CL/2L/2SSW$ ، $CL/8L/2SSW$ ، $CL/2L/8SSW$ و $CL/8L/8SSW$ رفتار نیمه‌ترد، سطوح شکست یکنواخت‌تر و تغییرشکل کمتری را نشان دادند که بیانگر اثر هم‌افزایی آهک و SSW در متراکم‌سازی ماتریس خاک و بهبود عملکرد مکانیکی آن است. در میان ترکیب‌های مورد بررسی، مخلوط‌هایی با نسبت‌های متعادل آهک و پسماند سیلیکات سدیم، به‌ویژه نمونه $CL/2L/2SSW$ ، مطلوب‌ترین رفتار را از خود نشان دادند؛ به‌طوری‌که در مقایسه با سایر ترکیب‌ها، از مقاومت بیشتر و پایداری بالاتری برخوردار بودند.

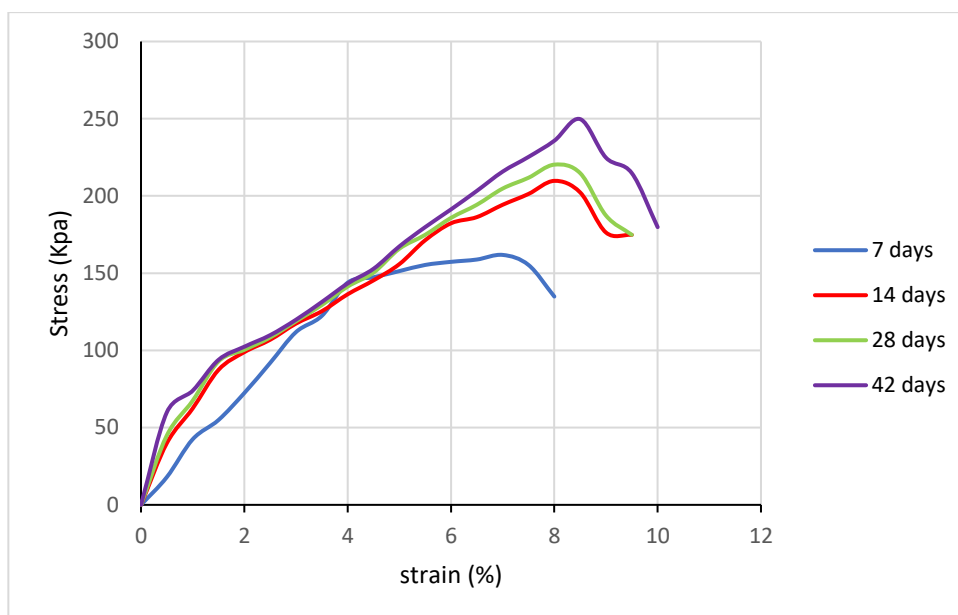


شکل ۱۰: نمایی از نمونه‌ها پس از گسیختگی در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

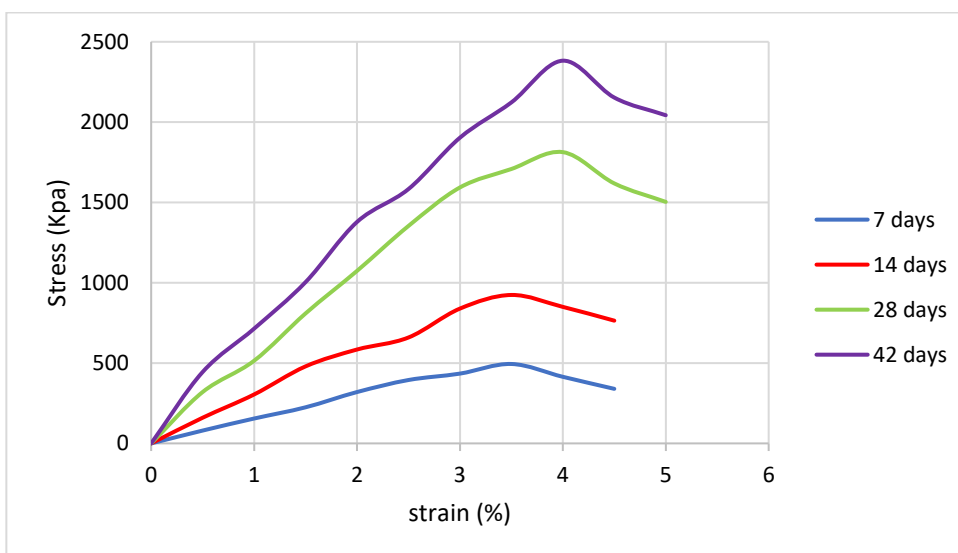
همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها تأثیر متمایز آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را بر رفتار مکانیکی خاک رسی در دوره‌های مختلف عمل‌آوری (۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز) نشان می‌دهند. نمونه شاهد (A) رفتار شکل‌پذیر همراه با تنش اوج پایین و کرنش‌های نسبتاً زیاد را از خود نشان داد که بیانگر ضعف پیوندهای ساختاری و مقاومت کم خاک طبیعی است. در مقابل، نمونه تثبیت‌شده با ۴٪ آهک (B) افزایش محسوسی در تنش اوج و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک را تجربه کرد که این امر به تشکیل محصولات حاصل از واکنش‌های پوزولانی و بهبود پیوند بین ذرات خاک نسبت داده می‌شود.

افزایش قابل‌توجه مقاومت در نمونه حاوی ۴٪ آهک و ۲٪ پسماند سیلیکات سدیم (C) مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که این نمونه دارای تنش اوج و سختی بیشتری نسبت به سایر ترکیب‌ها بود. این رفتار بیانگر اثر هم‌افزایی آهک و SSW در متراکم‌سازی ماتریس خاک و تشکیل ترکیبات سیمانی پایدار است. همچنین نمونه حاوی ۸٪ آهک و ۸٪ SSW (D) نیز نسبت به نمونه‌های حاوی تنها آهک، مقاومت بیشتری از خود نشان داد، اما بیشترین عملکرد مکانیکی مربوط به ترکیب متعادل (C) بود که پس از ۴۲ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری آن تا حدود ده برابر نسبت به خاک طبیعی افزایش یافت.

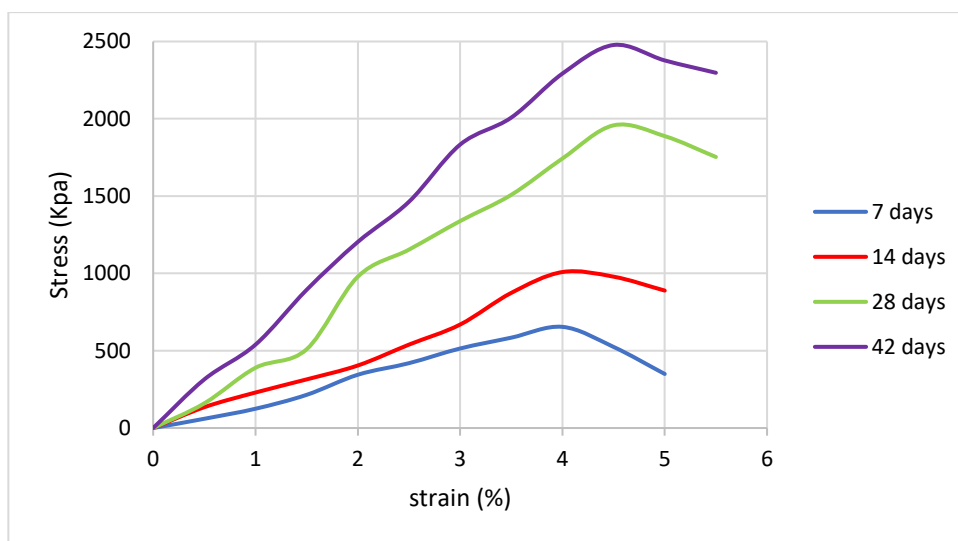
به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب آهک با مقادیر متعادل پسماند سیلیکات سدیم، در مقایسه با استفاده منفرد از هر یک از این مواد، عملکرد مکانیکی برتری را فراهم می‌کند. این بهبود ناشی از تشکیل بیشتر ژل‌های سیمانی نظیر C-S-H و C-A-S-H و افزایش پیوستگی بین ذرات خاک است که در نهایت به افزایش مقاومت و سختی نمونه‌های تثبیت‌شده منجر می‌شود.



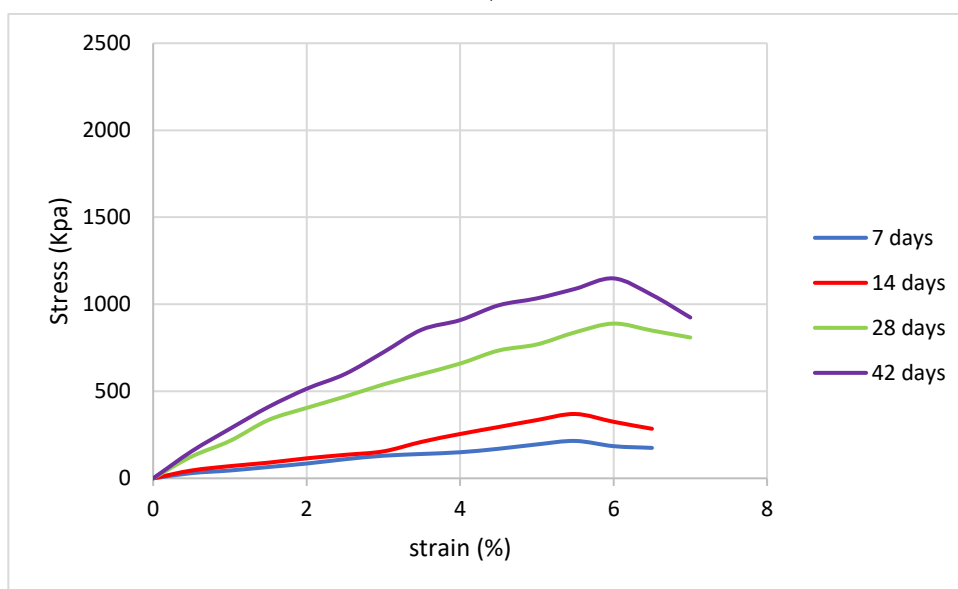
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۱. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز عمل‌آوری. (الف) (خاک طبیعی)، (ب) (خاک + ۴٪ آهک)، (پ) (خاک + ۴٪ آهک + ۲٪ پسماند سیلیکات سدیم (SSW))، (ت) (خاک + ۸٪ آهک + ۰.۸٪ پسماند سیلیکات سدیم (SSW))

نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، آهک و خاک رس موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه‌های تثبیت‌شده گردید.

ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در مقایسه با استفاده از آهک به تنهایی، موجب افزایش بیشتری در مقاومت فشاری تک‌محوری شد. همان‌گونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت مربوط به مخلوط حاوی ۴٪ آهک و ۲٪ SSW بود که در مقایسه با خاک طبیعی، افزایش چشمگیری در مقاومت فشاری از خود نشان داد. این نتایج بیانگر نقش مؤثر SSW در ارتقای عملکرد تثبیت‌کنندگی آهک و بهبود خواص مکانیکی خاک است.

افزودن SSW موجب افزایش کرنش متناظر با گسیختگی در نمونه‌های تثبیت‌شده شد. در حالی که نمونه‌های حاوی آهک به تنهایی رفتار نسبتاً تردی از خود نشان دادند، حضور SSW سبب افزایش ظرفیت تغییر شکل و حرکت رفتار خاک به سمت حالت نیمه

شکل‌پذیر گردید. این ویژگی از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک حائز اهمیت است، زیرا امکان جذب انرژی بیشتر و تحمل تغییرشکل‌های بزرگ‌تر را پیش از وقوع گسیختگی فراهم می‌سازد.

بهبود عملکرد مکانیکی نمونه‌ها را می‌توان به تشکیل محصولات سیمانی حاصل از واکنش‌های پوزولانی، به‌ویژه ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته (C-A-S-H)، نسبت داد. این محصولات با پر کردن فضای خالی بین ذرات و تقویت پیوندهای بین‌دانه‌ای، موجب افزایش مقاومت و سختی خاک می‌شوند. علاوه بر این، کاهش شاخص خمیری و بهبود ساختار داخلی خاک در نمونه‌های حاوی آهک و SSW، شرایط مناسب‌تری را برای تشکیل یک ماتریس پایدار و متراکم فراهم می‌کند.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از آهک و SSW علاوه بر افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، موجب بهبود ظرفیت تغییرشکل و پایداری بلندمدت خاک نیز می‌شود. در میان ترکیب‌های مورد بررسی، مخلوط حاوی ۴٪ آهک و ۲٪ SSW مناسب‌ترین تعادل را میان مقاومت، شکل‌پذیری و کاهش مصرف آهک فراهم کرد و به‌عنوان ترکیب بهینه برای تثبیت خاک رسی قابل معرفی است.

جدول ۹: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و کرنش گسیختگی مخلوط‌های تثبیت شده در زمان‌های مختلف عمل آوری

Composition	Days	7	14	28	42
soil	Stress (KPa)	161.8	209.8	220.3	249.7
	Strain (%)	7	8	8	8.5
soil+2% lime	Stress (KPa)	464.3	619.3	932.8	2187.7
	Strain (%)	3.5	3.5	4	4
soil+4% lime	Stress (KPa)	494.5	924	1813	2382.5
	Strain (%)	3.5	3.5	4	4
soil+6% lime	Stress (KPa)	414.6	594.4	1538.4	1952.9
	Strain (%)	3.5	3.5	4	4
soil+8% lime	Stress (KPa)	344.6	514.5	954	1538.3
	Strain (%)	3.5	3.5	4	4
soil+2% lime+2% SSW	Stress (KPa)	474.5	824	1548.3	2237.6
	Strain (%)	4	4	4.5	4.5
soil+4% lime+2% SSW	Stress (KPa)	654.3	1008.9	1957.9	2477.4
	Strain (%)	4	4	4.5	4.5
soil+6% lime+2% SSW	Stress (KPa)	624.3	734.2	1833	2122.7
	Strain (%)	4	4	4.5	4.5
soil+8% lime+2% SSW	Stress (KPa)	584.4	654.3	1708.2	1908
	Strain (%)	4	4	4.5	4.5
soil+2% lime+4% SSW	Stress (KPa)	459.5	719.2	1848	2032.8
	Strain (%)	4.5	4.5	5	5
soil+4% lime+4% SSW	Stress (KPa)	579.4	809.1	1773.1	2297.5
	Strain (%)	4.5	4.5	5	5
soil+6% lime+4% SSW	Stress (KPa)	499.5	659.3	1598.3	2102.8
	Strain (%)	4.5	4.5	5	5
soil+8% lime+4% SSW	Stress (KPa)	464.5	564.4	1448.5	1678.2
	Strain (%)	4.5	4.5	5	5
soil+2% lime+6% SSW	Stress (KPa)	299.7	544.4	1398.5	1803
	Strain (%)	5	5	5.5	5.5
soil+4% lime+6% SSW	Stress (KPa)	404.6	624.3	1608.3	2047.8
	Strain (%)	5	5	5.5	5.5
soil+6% lime+6% SSW	Stress (KPa)	354.6	494.5	1473.4	1888
	Strain (%)	5	5	5.5	5.5
soil+8% lime+6% SSW	Stress (KPa)	314.7	449.5	1098.8	1348.6
	Strain (%)	5	5	5.5	5.5
soil+2% lime+8% SSW	Stress (KPa)	234.8	389.6	909	1178.7
	Strain (%)	5.5	5.5	6	6
soil+4% lime+8% SSW	Stress (KPa)	289.7	454.5	979	1273.6
	Strain (%)	5.5	5.5	6	6
soil+6% lime+8% SSW	Stress (KPa)	249.7	404.6	929	1213.7
	Strain (%)	5.5	5.5	6	6
soil+8% lime+8% SSW	Stress (KPa)	214.8	369.6	889	1148.8

۴-۲-۱- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

افزایش مدت زمان عمل آوری از ۷ تا ۴۲ روز موجب بهبود قابل توجه مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و افزایش سختی نمونه‌ها در تمامی مخلوط‌های تثبیت شده گردید؛ به گونه‌ای که شیب منحنی‌های تنش-کرنش با گذشت زمان افزایش یافت (جدول ۱۰). این روند را می‌توان به پیشرفت واکنش‌های پوزولانی و تشکیل تدریجی محصولات سیمانی نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) نسبت داد. تشکیل این ترکیبات موجب پر شدن فضاهای خالی، افزایش پیوندهای بین ذره‌ای و ایجاد ساختاری متراکم‌تر در خاک شده و در نهایت به افزایش مقاومت و سختی نمونه‌های تثبیت شده منجر می‌شود.

جدول ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری (UCS) نمونه‌های حاوی آهک پس از ۴۲ روز عمل آوری

متغیرها	Clay	Clay + 2% lime	Clay + 8% lime
UCS (kPa) مقاومت فشاری تک محوری	۲۵۰	۲۱۸۵	۱۵۳۸
(%) کرنش گسیختگی	۹	۴	۴

افزایش درصد آهک موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک محوری (UCS) در مقایسه با خاک طبیعی شد، به طوری که مقاومت نمونه‌های تثبیت شده تا حدود شش برابر افزایش یافت. در مقابل، کاهش ۴۴/۴ درصدی کرنش گسیختگی نشان می‌دهد که با افزایش میزان آهک، سختی نمونه‌ها افزایش یافته و رفتار آن‌ها به سمت تردی بیشتر سوق پیدا کرده است.

استفاده هم‌زمان از آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک محوری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده تنها با آهک گردید. نتایج نشان داد که مخلوط حاوی ۴٪ آهک و ۲٪ SSW بهترین عملکرد را داشته و بیشترین مقاومت فشاری را در میان ترکیب‌های مورد بررسی ایجاد کرده است. در مقابل، افزایش بیش از حد مقدار SSW (برای مثال ۸٪) با کاهش مقاومت همراه بود که می‌تواند ناشی از برهم خوردن نسبت بهینه مواد واکنش دهنده، تشکیل ناقص محصولات سیمانی در ساختار خاک باشد. نتایج مقایسه‌ای این بخش در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱: میزان افزایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS) در مخلوط‌های حاوی آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با آهک

8% lime	۱۵۳۸	Base
2% SSW+ 4% lime	۲۴۸۰	+ ۶۱/۲ درصد
8% SSW+ 4% lime	۱۲۷۵	- ۱۷/۱ درصد

علاوه بر افزایش مقاومت، استفاده از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) موجب افزایش کرنش گسیختگی نمونه‌ها شد؛ به طوری که مقدار کرنش در زمان گسیختگی از حدود ۱٪ به حدود ۲٪ افزایش یافت. این موضوع نشان دهنده بهبود شکل پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های تثبیت شده است. چنین رفتاری برای سازه‌ها و لایه‌های خاکی که در معرض بارهای دینامیکی، ارتعاشات یا نشست‌های نامتقارن قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا امکان تحمل تغییر شکل‌های بیشتر پیش از گسیختگی را فراهم می‌کند.

به منظور مقایسه نسبی کارایی فنی و اقتصادی مخلوط‌های منتخب، نسبت مقاومت فشاری تک محوری به میزان آهک مصرفی به عنوان یک شاخص مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه آهک بخش اصلی ماده تثبیت کننده و عامل اصلی هزینه در این پژوهش محسوب می‌شود و پسماند سیلیکات سدیم به عنوان یک ماده جانبی صنعتی با هزینه ناچیز در نظر گرفته می‌شود، شاخص

مقاومت به مصرف آهک برای مخلوط‌های منتخب محاسبه و نتایج آن در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. مقایسه نسبی کارایی مکانیکی و اقتصادی مخلوط‌های منتخب (مقاومت به ازای هزینه)

شاخص مقاومت به مصرف آهک	درصد آهک مصرفی	UCS (kPa)	ترکیب مخلوط
۶۲۰	۲	۲۴۸۰	2% SSW+ 4% lime
۵۷۵	۴	۲۳۰۰	4% SSW+ 4% lime
۱۱۱۷	۴	۲۲۳۵	2% SSW+ 2% lime

با در نظر گرفتن هم‌زمان مقاومت فشاری تک‌محوری و ویژگی‌های تغییرشکلی، ترکیب‌های مختلف از نظر عملکرد مهندسی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد (جدول ۱۳) که مخلوط حاوی ۴٪ آهک و ۲٪ پسماند سیلیکات سدیم با ارائه رفتار نیمه‌شکل‌پذیر همراه با مقاومت بالا، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی نظیر طراحی و بهسازی بستر پی محسوب می‌شود. همچنین، مخلوط حاوی ۲٪ آهک و ۲٪ SSW با وجود مقاومت کمتر، به دلیل کاهش مصرف آهک و عملکرد قابل قبول، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی برای پروژه‌هایی با محدودیت منابع و هزینه مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱۳. بهینه‌سازی ترکیب‌های تثبیت‌کننده بر اساس مقاومت و رفتار مکانیکی

کاربرد پیشنهادی	رفتار مکانیکی	UCS (kPa)	ترکیب مخلوط
احداث پی بر روی خاک‌های سست (ترکیب بهینه از دیدگاه مکانیکی)	نیمه‌شکل‌پذیر	۲۴۸۰	2% SSW+ 4% lime
پروژه‌های عمرانی با ملاحظات اقتصادی (ترکیب پیشنهادی برای ملاحظات اقتصادی)	نیمه‌شکل‌پذیر	۲۲۳۵	2% SSW+ 2% lime

۴-۲-۲- نتیجه‌گیری و توصیه‌های فنی

دوام بلندمدت: مخلوط‌های حاوی پسماند سیلیکات سدیم افزایش قابل‌توجهی در مقاومت از ۲۸ تا ۴۲ روز نشان دادند که این موضوع آن‌ها را برای کاربردهایی با نیاز به عمر بهره‌برداری طولانی مناسب می‌سازد.

کنترل تغییرشکل: رفتار نیمه‌شکل‌پذیر خاک‌های تثبیت‌شده موجب افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی تحت بارگذاری شده و در نتیجه پایداری سازه‌ای را بهبود می‌بخشد.

صرفه‌جویی اقتصادی و زیست‌محیطی: مخلوط حاوی ۲٪ آهک و ۲٪ پسماند سیلیکات سدیم با نشان دادن ۴۵/۳ درصد مقاومت بیشتر نسبت به مخلوط متداول ۸٪ آهک، به‌عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه و پایدار از نظر زیست‌محیطی قابل معرفی است.

۴-۳-۴- تحلیل ریزساختاری مشاهدات (SEM)

به منظور بررسی سازوکارهای فیزیکوشیمیایی مؤثر بر بهبود رفتار مکانیکی و تغییرشکل حجمی خاک تثبیت‌شده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای سه نمونه شاخص شامل: (الف) خاک رس طبیعی، (ب) خاک رس حاوی ۸٪ آهک و (ج) خاک رس حاوی ۸٪ آهک و ۸٪ پسماند سیلیکات سدیم (SSW) تهیه شد. تصاویر مربوطه در شکل ۱۲ با بزرگنمایی‌های ۵ و ۲ میکرون ارائه شده‌اند.

۴-۳-۱- خاک رس طبیعی

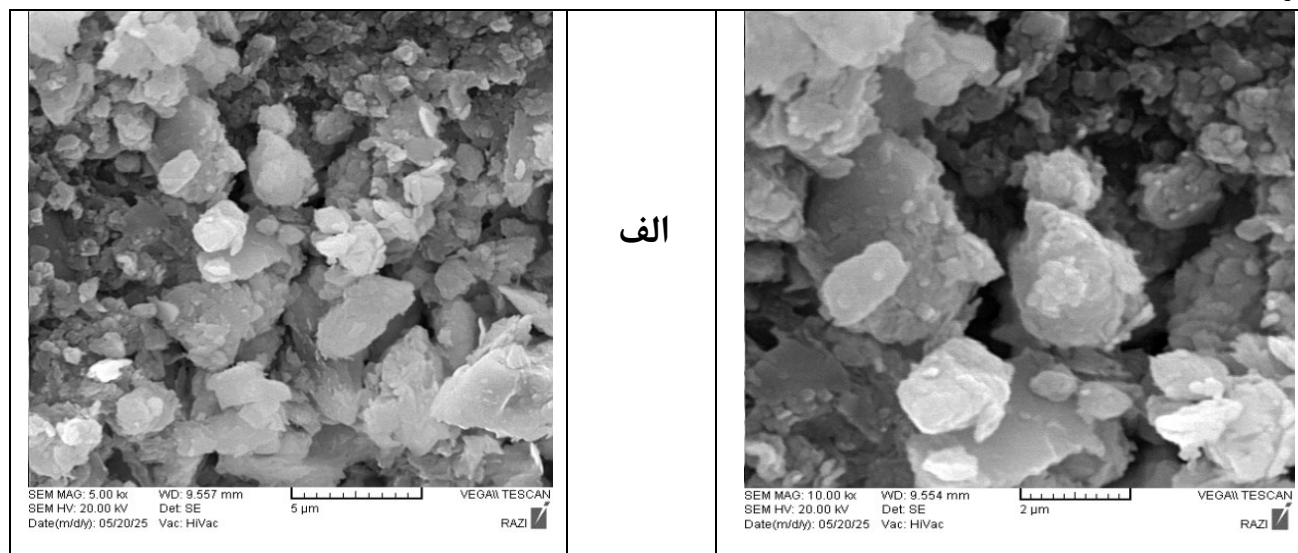
تصویر SEM نمونه خاک طبیعی (شکل ۱۲-الف) ساختاری بسیار متخلخل و نامنظم را نشان می‌دهد که در آن ذرات ریز به صورت سست و فاقد آرایش منسجم تجمع یافته‌اند. عدم وجود محصولات سیمانی و حضور گسترده فضاهای خالی بیانگر ضعف پیوند بین ذرات است که با مقاومت کم و تغییر شکل پذیری بالای این نوع خاک همخوانی دارد. در این ساختار، هیچ گونه پیوستگی ماتریسی یا اتصال بین دانه‌ای قابل توجهی مشاهده نمی‌شود که این امر دلیل عملکرد مکانیکی ضعیف نمونه در بخش‌های قبلی است.

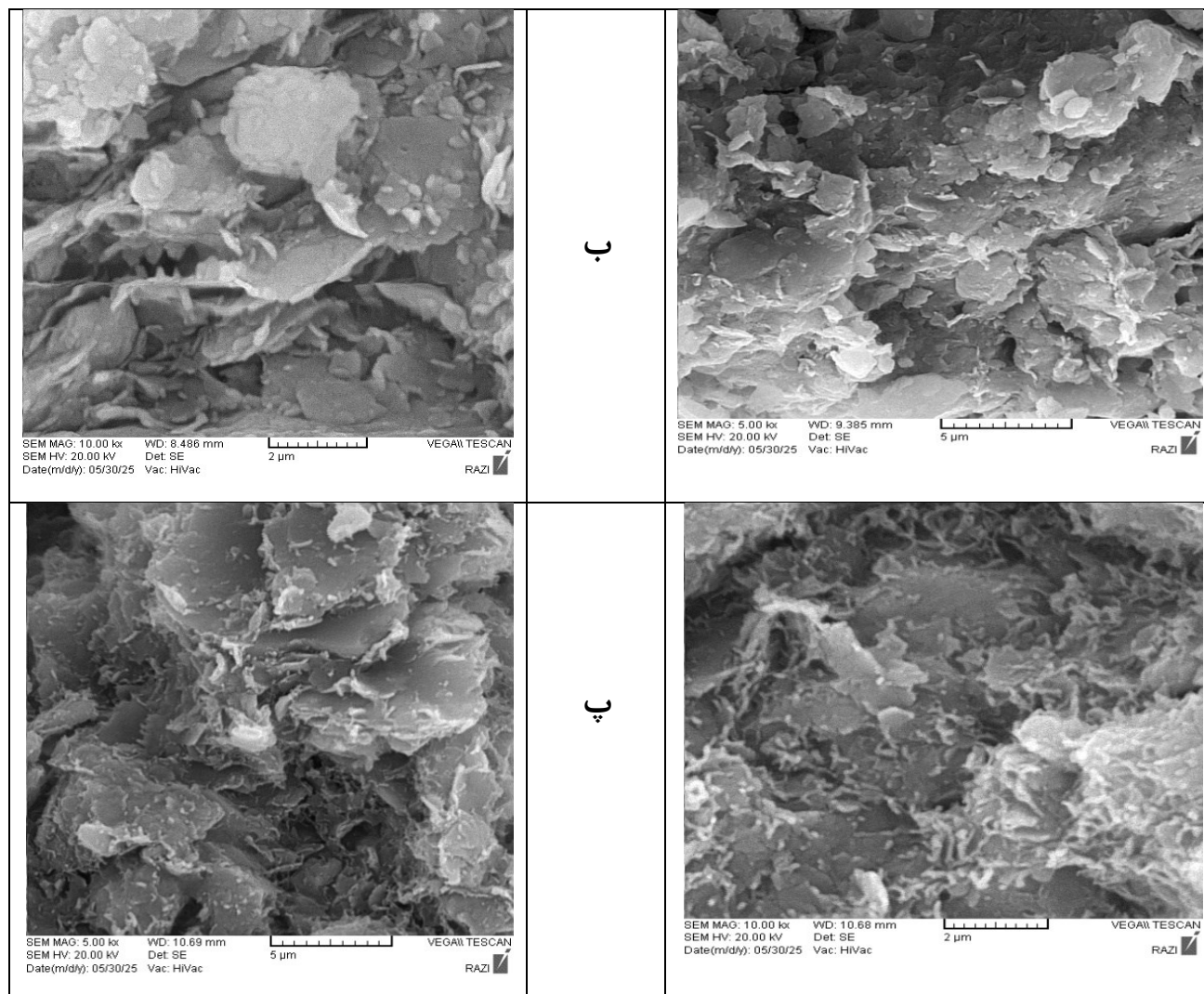
۴-۳-۲- خاک + ۸٪ آهک

با افزودن ۸٪ آهک (شکل ۱۲-ب)، تغییرات قابل توجهی در ریزساختار خاک مشاهده می‌شود. آرایش متراکم‌تر ذرات و ایجاد پیوندهای اولیه ناشی از تشکیل محصولات سیمانی نظیر هیدروکسید کلسیم (CH) و ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) قابل استنباط است. این واکنش‌های پوزولانی اولیه موجب کاهش تخلخل، افزایش قفل‌شدگی بین ذرات و در نتیجه بهبود مقاومت فشاری و کاهش ناپایداری حجمی شده‌اند؛ همان گونه که در نتایج UCS و آزمون‌های تورم نیز مشاهده گردید.

۴-۳-۳- خاک + ۸٪ آهک + ۸٪ SSW

بیشترین بهبود ریزساختاری در نمونه حاوی ترکیب آهک و پسماند سیلیکات سدیم (شکل ۱۲-ج) مشاهده می‌شود. این تصویر یک ماتریس متراکم و پیوسته را نشان می‌دهد که در آن فضاهای خالی به طور مؤثر توسط فازهای ژلی پر شده‌اند و ذرات خاک توسط این محصولات به یکدیگر متصل شده‌اند. این ژل‌ها احتمالاً حاصل تشدید واکنش‌های پوزولانی بین یون‌های کلسیم حاصل از آهک و سیلیس موجود در SSW بوده و منجر به تشکیل گسترده C-S-H و ترکیبات مشابه شده‌اند. در نتیجه، ساختار کلی نمونه متراکم، همبسته و یکپارچه بوده که با بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری و حداقل تغییرات حجمی مشاهده شده در نتایج آزمایشگاهی همخوانی کامل دارد.





شکل ۱۲: تصاویر ریزساختاری نمونه‌ها با بزرگنمایی ۵ و ۲ میکرون: (الف) خاک رس، (ب) خاک رس + ۸٪ آهک، (پ) خاک رس + ۸٪ آهک + ۸٪ پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

مشاهدات حاصل از تصاویر SEM تأیید می‌کند که استفاده هم‌زمان از آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) منجر به تشکیل یک ریزساختار متراکم و غنی از فازهای ژلی می‌شود که در آن ذرات خاک توسط فازهای سیمانی تازه تشکیل شده به‌طور مؤثری به یکدیگر متصل می‌گردند. در فرآیند هیدراتاسیون، آهک موجب تولید هیدروکسید کلسیم $[Ca(OH)_2]$ شده که این ترکیب با سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) فعال موجود در SSW وارد واکنش شده و ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهد.

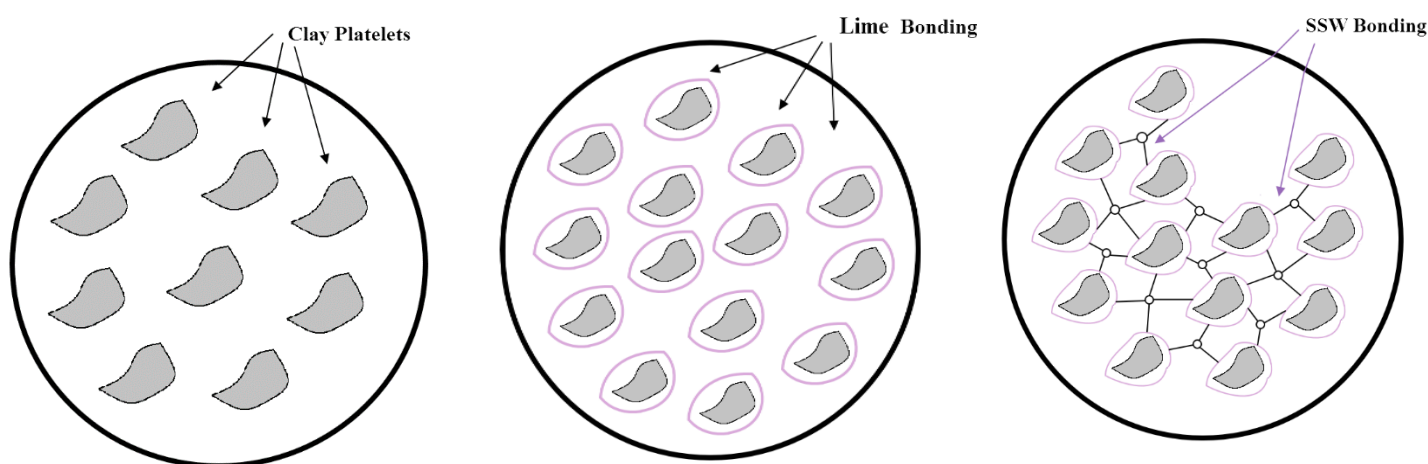
این محصولات هیدراتاسیون به تدریج فضاهای خالی میان ذرات رس را پر کرده و یک ماتریس پیوسته ایجاد می‌کنند که منجر به کاهش نسبت تخلخل و محدود شدن حرکت آب درون ساختار خاک می‌شود. در نتیجه، پیوندهای بین‌ذره‌ای تقویت شده و انتقال بار از طریق پل‌های سیمانی بین ذرات مجاور بهبود می‌یابد. هم‌زمان، کاهش تخلخل باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر نرم‌شدگی ناشی از رطوبت می‌گردد.

افزون بر این، حضور SSW موجب تسریع واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فازهای ثانویه سیمانی نظیر کلسیت و برخی محصولات شبه‌ژئولیتی می‌شود که در توسعه یک شبکه ژلی متراکم‌تر و افزایش دوام بلندمدت خاک نقش دارند. در مخلوط بهینه (۸٪ آهک + ۸٪ SSW)، این اثرات به حداکثر مقدار خود می‌رسند؛ به‌طوری‌که تأمین یون‌های کلسیم توسط آهک و تأمین سیلیس و آلومینا فعال توسط

SSW، شرایط مناسبی برای تداوم تشکیل ژل در طول دوره عمل آوری فراهم می‌سازد. در نتیجه، خاک تثبیت شده دارای مقاومت فشاری بالاتر، خمیریت کمتر و پایداری حجمی بیشتر نسبت به سیستم‌های تک‌افزوده می‌باشد. بنابراین، شواهد ریزساختاری حاصل از SEM به‌طور مستقیم از نتایج ماکروسکوپی آزمایش‌های UCS، حدود ات‌برگ و تراکم پشتیبانی می‌کند و مکانیزم پیشنهادی تثبیت را تأیید می‌نماید. مشاهده تشکیل شبکه ژلی متراکم و آرایش فشرده ذرات، کارایی ترکیب دوتایی آهک SSW را به‌عنوان یک راهکار پایدار و مؤثر برای بهسازی خاک‌های رسی تقویت می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، مدل مفهومی ارائه شده نقش آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را در اصلاح ریزساختار و پیوندهای خاک‌های رسی تبیین می‌کند. در حالت طبیعی (a)، ذرات رس عمدتاً به‌صورت صفحات پراکنده با پیوندهای ضعیف بین‌ذره‌ای وجود دارند که منجر به مقاومت کم و حالت خمیری خاک زیاد می‌شود.

با افزودن آهک (b)، واکنش‌های پوزولانی بین آهک و کانی‌های رسی موجب تشکیل ترکیبات سیمانی نظیر ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) می‌گردد که به‌صورت لایه‌های تجمع‌یافته ظاهر شده و پیوند بین ذرات را تقویت کرده و خمیریت را کاهش می‌دهند.

در مرحله بعد، با افزودن SSW (c)، ذرات غنی از سیلیس نقش عامل اتصال‌دهنده را ایفا کرده و این لایه‌های حاصل از واکنش آهک را به یکدیگر متصل می‌سازند. این فرآیند با پر کردن فضاهای خالی و ایجاد ماتریس متراکم‌تر، موجب شکل‌گیری ساختاری پایداری در خاک می‌شود. این سازوکار دوگانه‌آهک به‌عنوان آغازگر واکنش‌های پوزولانی و SSW به‌عنوان تقویت‌کننده محصولات حاصل، نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی این دو افزودنی در بهبود چشمگیر رفتار مکانیکی و پایداری بلندمدت خاک‌های رسی است.



شکل ۱۳: مدل مفهومی عملکرد آهک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در بافت خاک رسی و نحوه پیوند ذرات: (الف) صفحات رسی بدون افزودنی، (ب) تشکیل لایه‌های ASH در اثر افزودن آهک، و (ج) اتصال لایه‌های ASH توسط ذرات SSW

۵- نتیجه‌گیری

(۱) این پژوهش به‌صورت نظام‌مند به بررسی تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از آهک در ترکیب با پسماند سیلیکات سدیم (SSW) از طریق آزمون‌های مکانیکی، فیزیکی و ریزساختاری پرداخت. نتایج نشان داد که سیستم آهک SSW در مقایسه با تثبیت تنها با آهک، عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. در میان ترکیب‌های مورد بررسی، مخلوط حاوی ۴ درصد آهک و ۲ درصد پسماند سیلیکات سدیم با دستیابی به مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۴۸۰ کیلوپاسکال پس از ۴۲ روز عمل آوری، به‌عنوان ترکیب بهینه از دیدگاه عملکرد مکانیکی معرفی گردید که نسبت به خاک طبیعی حدود ده برابر و نسبت به نمونه حاوی آهک تنها حدود ۶۱ درصد افزایش مقاومت را نشان

می‌دهد. همچنین، مخلوط حاوی ۲ درصد آهک و ۲ درصد پسماند سیلیکات سدیم، با وجود مقاومت اندکی کمتر، به دلیل تأمین عملکرد مکانیکی مناسب همراه با کاهش میزان آهک مصرفی، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های عمرانی دارای ملاحظات اقتصادی پیشنهاد می‌شود.

۲) علاوه بر افزایش مقاومت، افزودن SSW موجب افزایش قابل توجه شکل پذیری شد؛ به طوری که کرنش گسیختگی از حالت ترد ($\sim 1\%$) به رفتار نیمه شکل پذیر ($\sim 9\%$) افزایش یافت که بیانگر بهبود ظرفیت جذب انرژی و افزایش ایمنی سازه‌ای در برابر گسیختگی ناگهانی است.

۳) استفاده از پسماند سیلیکات سدیم در کنار آهک، ضمن حفظ عملکرد مکانیکی مطلوب، امکان کاهش نسبی مصرف آهک را فراهم می‌آورد که این امر منجر به کاهش مصرف مصالح، صرفه جویی در انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی می‌شود. بررسی‌های ریزساختاری تشکیل محصولات سیمانی نظیر ژل‌های C-S-H و C-A-S-H را تأیید کرد که نقش اصلی در افزایش مقاومت و دوام خاک دارند. همچنین نتایج XRF/XRD نشان داد که SSW علاوه بر نقش پرکننده، به عنوان عامل پوزولانی نیز عمل کرده و موجب بهبود تراکم، کاهش حالت خمیری خاک و افزایش چگالی خاک می‌شود.

۴) در مجموع، ترکیب آهک و SSW یک رویکرد مؤثر، پایدار و سازگار با محیط زیست برای بهسازی خاک‌های رسی محسوب می‌شود. این روش به ویژه برای بستر راه‌ها، پی‌سازی در خاک‌های ضعیف و پروژه‌های عمرانی با رویکرد استفاده از پسماندهای صنعتی پیشنهاد می‌شود. برای تحقیقات آینده، بررسی دوام بلندمدت تحت بارگذاری چرخه‌ای، شرایط تر و خشک و آزمایش‌های میدانی در مقیاس بزرگ توصیه می‌گردد.

مراجع

- [1] Bouras, F. (2022). Geotechnical behavior and physico-chemical changes of lime-treated and cement-treated silty soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(4), 2033-2049.
- [2] Min, Y. (2023). On the use of one-part geopolymers activated by solid sodium silicate in soft clay stabilization. *Construction and Building Materials*, 402, 132957.
- [3] Taeibi, V. and Mahboobi Ardekani, A.R. and Haji Sotoudeh, M. and Nikzad, M. (2015). Variations in the plastic limits of lime-stabilized clay. *Experimental Research in Civil Engineering*, 2(Spring & Summer 2015), 1-14.
- [4] Alireza, G.Z. (2019). Prediction of unconfined compressive strength of clay subgrade stabilized with Portland cement and lime using Group Method of Data Handling (GMDH).
- [5] Ullah, A. and Boumezerane, D. and Ahmad, F. (2023). Subgrade improvement with mixed lime and cement as additives. *Materials Today: Proceedings*.
- [6] Nan, J. (2024). Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze-thaw cycles. *Transportation Geotechnics*, 44, 101175.
- [7] Wassie, T.A. and Demir, G. (2023). A review on stabilization of soft soils with geopolymerization of industrial wastes. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 13(2), 1-8.
- [8] Beygi, L. and Khazaei, J. (2024). Soft clay eco-friendly improvement by ground granulated blast furnace slag and quicklime. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 2061-2074.
- [9] Sadegh, G.J. and Hamid, J.B. and Fereydoun, M.N. (2020). A laboratory study comparing the stabilization of kaolinite clay using cement and cement kiln dust.
- [10] Luo, Y. (2022). Effects of curing and processing on strength of raw earth stabilized with lime and sodium silicate. *Materials and Structures*, 55(8), 226.
- [11] Li, W. (2024). Treating sulfate-bearing soil by using sodium silicate and NaOH-activated ground granulated blast-furnace slag. *Acta Geotechnica*, 19(5), 3129-3138.
- [12] Zhang, Z. (2024). Effects of metakaolin and sodium silicate treatment on highwater content dredged clay for improved construction fill performance. *Construction and Building Materials*, 411, 134196.
- [13] Kulanthaivel, P. (2023). Strength enhancement of clay soil stabilized with ordinary portland cement, sodium silicate and sodium hydroxide. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(5), 1297-1310.
- [14] Abdel-Gawwad, H.A. (2024). Sustainable utilization of sodium silicate-based lead glass sludge as an alkali-activator for alkali-activated slag: Performance, characterization, and Pb-stabilization. *Construction and Building Materials*, 434, 136681.
- [15] Vakili, M.V. (2016). Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*, 124, 243-251.

- [16] Koohestani, B. (2021). Geopolymerization of soil by sodium silicate as an approach to control wind erosion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 1837-1848.
- [17] Negussie, E. and Dinku, A. (2014). Investigation on the effects of combining lime and sodium silicate for expansive subgrade stabilization. *Zede Journal*, 31, 33-44.
- [18] Moayedi, H. (2011). Effect of sodium silicate on unconfined compressive strength of soft clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 289-295.
- [19] Harender, A.B. and Sharma, P. (2020). Stabilization of soil of Hissar City by addition of sodium silicate and lime. *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- [20] Dharini, V. and Balamaheswari, M. and Presentia, A.N. (2023). Enhancing the strength of expansive clayey soil using lime as soil stabilizing agent along with sodium silicate as grouting chemical. *Materials Today: Proceedings*.
- [21] Jiang, P. (2023). Laboratory characterization of soft clay mixed with EPS, lime, fly ash, and sodium silicate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8), 302.
- [22] Elahi, N. (2021). Effect of sulfur and sodium silicate on lime stabilization of soil and control of water erosion around a lime plant (Torbat Heydariyeh). *Watershed Management Research*, 34(4), 88-103.
- [23] Kocak, Y. and Tascı, E. and Kaya, U. (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, 47, 720-727.
- [24] Savaş, H. (2016). Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(6), 589-598.
- [25] Mola-Abasi, H. and Khajeh, A. and Naderi Semsani, S. (2018). Effect of the ratio between porosity and SiO_2 and Al_2O_3 on tensile strength of zeolite-cemented sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018028.
- [26] Mohanty, S. (2021). Strength and durability of flyash, GGBS and cement clinker stabilized dispersive soil. *Cold Regions Science and Technology*, 191, 103358.
- [27] Shinde, B. (2024). Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. *Progress in Engineering Science*, 100009.
- [28] Roshan, M.J. and Rashid, A.S.B.A. (2024). Geotechnical characteristics of cement stabilized soils from various aspects: A comprehensive review. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(1), 1.
- [29] ASTM. (2002). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D854). West Conshohocken: ASTM International.
- [30] ASTM. (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D4318-10). West Conshohocken: ASTM International.
- [31] ASTM. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM D422-63). West Conshohocken: ASTM International.
- [32] ASTM. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (ASTM D698-12). West Conshohocken: ASTM International.
- [33] ASTM. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM D2166-16). West Conshohocken: ASTM International.