

Mechanical and Microstructural Performance of Clayey Soil Stabilized with Cement and Sodium Silicate Waste (SSW)

Mohammad Mahdi Jalilvand¹ , Homayoun Jahanian^{2✉} , Mohammad Azadi³

1.Civil Engineering Dept., Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: m.jalilvand@iau.ir.

2.Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: homayounjahanian@iau.ac.ir

3.Civil Engineering Dept., Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: Azadi11@iau.ac.ir.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2026-03-22

Received in revised form

2026-05-25

Accepted

2026-06-09

Available online

2026-06-30

Keywords:

Soil stabilization,
Clay soil,
Sodium silicate waste (SSW),
Cement,
Pozzolanic reaction

ABSTRACT

Chemical stabilization is a widely used method for improving the engineering properties of clayey soils. Conventional stabilizers such as cement and lime are effective but costly and environmentally less sustainable. The use of industrial byproducts with pozzolanic activity provides a promising and eco-friendly alternative. This study investigates the combined effect of Type II Portland cement and sodium silicate waste (SSW) on the geomechanical and microstructural behavior of clayey soil. Laboratory tests, including Atterberg limits, compaction characteristics, unconfined compressive strength (UCS), and scanning electron microscopy (SEM), were conducted on untreated and stabilized specimens. Soil samples were treated with 2–8% cement and 2–8% SSW and cured under standard conditions. Results show that SSW significantly enhances soil performance. The plasticity index decreased from 16.1% for untreated soil to 6.4% in the 8% cement + 8% SSW mixture. Compaction tests indicated a reduction in maximum dry density and an increase in optimum moisture content due to particle refinement and filler effects. UCS values increased considerably with curing time, reaching 3649 kPa for the 8% cement + 8% SSW mixture after 42 days, a 14.6-fold increase over untreated soil and 22% higher than cement-only treatment. The 6% cement + 6% SSW mixture achieved 3420 kPa, offering a more cost-effective option. SEM analysis confirmed enhanced bonding and reduced porosity through the formation of C-S-H and C-A-S-H gels. Overall, the combined use of cement and sodium silicate waste provides an efficient, economical, and environmentally sustainable approach for improving the strength, durability, and plasticity of clayey soils.

Cite this article: Jalilvand, Mohammad Mahdi., Jahanian, Homayoun., & Azadi, Mohammad. (2026) Mechanical and Microstructural Performance of Clayey Soil Stabilized with Cement and Sodium Silicate Waste (SSW). *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(2),76-99. DOI:10.22126/amcen.2026.14016.1091



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2026.14016.1091

Publisher: Razi University

Introduction

Clay soils, characterized by high plasticity and sensitivity to moisture, present significant challenges in geotechnical engineering due to low bearing capacity and shrink-swell behavior. While traditional stabilization using lime and Ordinary Portland Cement (OPC) effectively improves mechanical properties like unconfined compressive strength (UCS) and stiffness, the cement industry's high CO₂ emissions and production costs necessitate the search for sustainable alternatives. Sodium silicate (SS) has emerged as a promising alkaline activator that enhances soil bonding and reduces deformability through geopolymerization and the formation of silica gels. However, the energy-intensive production of commercial SS limits its sustainability. Consequently, utilizing sodium silicate waste (SSW) an industrial byproduct offers an eco-friendly and cost-effective alternative. SSW contains pozzolanic phases such as zeolites, which react with cementitious compounds to form C-S-H and C-A-S-H gels, thereby enhancing soil stability while reducing cement reliance. Research indicates that combining cement with sodium silicate or industrial byproducts significantly improves uniaxial compressive strength, shear strength, and the California Bearing Ratio (CBR) compared to pure cement stabilization. Specifically, the pozzolanic activity of zeolites in SSW helps modify soil mineralogy, reducing swelling potential and increasing durability. Given the global shift toward alkali-activated materials (AAMs) to reduce carbon footprints, valorizing SSW aligns with green geotechnical engineering practices. This study investigates the effectiveness of SSW as a partial substitute for Type II Portland cement in stabilizing clay soils. The research focuses on improving UCS, reducing plasticity, and optimizing compaction behavior. By integrating mechanical testing with microstructural analyses (e.g., SEM), this work aims to provide novel insights into the mechanisms of soil improvement using industrial SSW as a sustainable and economical stabilization strategy.

Method

In the present study, a comprehensive investigation was conducted to evaluate the influence of cement and sodium silicate waste on the mechanical behavior and strength characteristics of stabilized clayey soil, employing the Unconfined Compressive Strength (UCS) test as the primary evaluative tool. The experimental procedure commenced with the determination of the optimum moisture content (OMC) and maximum dry density for each specific mixture—including the untreated pure clay and clay blended with varying proportions of cement and sodium silicate waste—through a series of standard compaction tests.

To ensure a homogeneous distribution of the stabilizing agents within the soil matrix, the components were subjected to a rigorous manual mixing process for a duration of 10 minutes, thereby eliminating any potential agglomerations and ensuring a uniform mixture. A critical adjustment was made during the preparation phase to optimize the incorporation of sodium silicate waste: to minimize energy dissipation and maintain the precision of the water-to-binder ratio, the inherent moisture content of the waste was meticulously accounted for and subtracted from the calculated optimum moisture content. This approach facilitated the direct

integration of the sodium silicate in its plastic (paste) form, ensuring better compatibility with the soil.

The resulting stabilized mixtures were then compacted into cylindrical metal molds, with dimensions of 50 mm in diameter and 100 mm in height, using a systematic four-layer compaction method. To mitigate the risk of interlayer discontinuity and enhance the overall structural integrity of the specimen, the surface of each compacted layer was lightly scratched with a pointed tool before the application of the subsequent layer. Immediately following the compaction process, the specimens were carefully demolded, and their precise weight and geometric dimensions were recorded to calculate the exact bulk density.

To safeguard the specimens against moisture evaporation and premature drying, they were hermetically wrapped in multiple layers of cling film. These specimens were then stored under strictly controlled laboratory conditions. The curing process was carried out for predefined intervals of 7, 14, 28, and 42 days at a constant ambient laboratory temperature, maintaining the initial moisture conditions to accurately assess the time-dependent strength gain of the stabilized soil.

Results

The combination of cement and sodium silicate waste (SSW) significantly enhanced the soil's physical and mechanical behavior. The plasticity index (PI) dropped from 16.1% to 6.4% in the 8%C/8%SSW mixture, while compaction tests revealed that blended mixtures yielded the highest maximum dry density (MDD). Mechanical testing showed a substantial increase in UCS, with the 8%C/8%SSW mixture peaking at 3648.94 kPa after 42 days due to the formation of dense C-S-H and C-A-S-H gels via pozzolanic reactions. Additionally, SSW moderated the brittleness induced by cement, increasing failure strain from 0.5% to 1% and promoting semi-ductile behavior. SEM imaging validated these results, revealing that SSW particles serve as fillers and reactive agents that bond the soil matrix into a dense, continuous network, thereby improving overall stability and long-term durability.

Conclusions

The results from UCS tests, chemical analyses, and SEM imaging collectively confirm that the synergistic use of cement and sodium silicate waste (SSW) significantly enhances the stabilization of clayey soils. The most notable outcome was achieved with a mixture of 8% cement and 8% SSW, which reached a UCS of 3649 kPa after 42 days, approximately 14.6 times higher than untreated soil and 22% higher than 8% cement alone. This improvement is attributed to pozzolanic reactions between cement-derived calcium and reactive phases in SSW (such as analcime and anorthite), leading to the formation of dense C-S-H and C-A-S-H gels. Beyond strength, the incorporation of SSW shifted the failure mode from brittle to semi-ductile, increasing failure strains from 7% to 9% and lowering the normalized ductile index (NDI), which improves energy absorption and deformation tolerance. From a practical and environmental standpoint, SSW allows for a reduction in cement consumption; for instance, a 6% cement and 6% SSW blend outperformed an 8% cement-only mixture. SEM observations further validated these findings, revealing reduced porosity, denser matrices, and enhanced particle bonding. In conclusion, combining cement with SSW provides an optimal

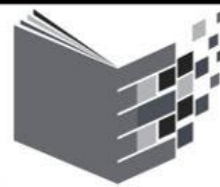
balance between strength gain and ductility. This approach offers a technically viable, cost-effective, and sustainable strategy for stabilizing expansive clays by reducing cement reliance and valorizing industrial by-products.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



عملکرد مکانیکی و ریز ساختمانی خاک رسی تثبیت شده با سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

محمد مهدی جلیوند^۱، همایون جهانیان^۲✉، محمد آزادی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: m.jalilvand@iau.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

رایانامه: homayounjahanian@iau.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: Azadi11@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	
کلیدواژه‌ها: تثبیت خاک، خاک رسی، پسماند سیلیکات سدیم، سیمان، واکنش پوزولانی	تثبیت شیمیایی روشی گسترده برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های رسی است. تثبیت‌کننده‌های متداول مانند سیمان و آهک مؤثر هستند، اما هزینه‌بر بوده و از منظر پایداری زیست‌محیطی، کارآمدی کمتری دارند. در این راستا، بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی با فعالیت پوزولانی، جایگزینی نویدبخش و سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر به بررسی اثر ترکیبی سیمان پرتلند تیپ ۲ و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر رفتار مکانیکی و ریز ساختمانی خاک رسی می‌پردازد. در این راستا، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل حدود اتربرگ، مشخصات تراکمی، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و (SEM) بر روی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده انجام گردید. نمونه‌های خاک با ۲ تا ۸ درصد سیمان و ۲ تا ۸ درصد SSW تثبیت شده و تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شدند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن SSW به‌طور قابل توجهی عملکرد خاک را بهبود می‌بخشد؛ به‌طوری‌که شاخص پلاستیسیته از ۱۶.۱٪ در خاک تثبیت نشده به ۶.۴٪ در ترکیب حاوی ۸٪ سیمان و ۸٪ SSW کاهش یافت. آزمایش‌های تراکمی حاکی از کاهش حداکثر چگالی خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه بود که این امر به دلیل اثرات پرکنندگی و ریز شدن ذرات رخ داده است. مقادیر UCS با افزایش زمان عمل‌آوری به‌طور چشمگیری افزایش یافت و در مخلوط ۸٪ سیمان و ۸٪ SSW پس از ۴۲ روز به ۳۶۴۹ کیلوپاسکال رسید که بیانگر افزایش ۱۴.۶ برابری نسبت به خاک تثبیت‌نشده و ۲۲٪ افزایش نسبت به تثبیت تنها با سیمان است. همچنین مخلوط ۶٪ سیمان و ۶٪ SSW به مقاومت ۳۴۲۰ کیلوپاسکال دست یافت که گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه‌تر را ارائه می‌دهد. تحلیل‌های SEM با تأیید تشکیل ژل‌های C-S-H و C-A-S-H، بهبود پیوستگی و کاهش تخلخل را به اثبات رساند. به‌طور کلی، استفاده ترکیبی از سیمان و پسماند سیلیکات سدیم، رویکردی کارآمد، اقتصادی و پایدار برای بهبود مقاومت، دوام و پلاستیسیته خاک‌های رسی فراهم می‌کند.

استناد: جلیوند، محمد مهدی؛ جهانیان، همایون؛ آزادی، محمد. (۱۴۰۵). عملکرد مکانیکی و ریز ساختمانی خاک رسی تثبیت‌شده با سیمان و پسماند

سیلیکات سدیم (SSW). مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۳(۲)، ۷۶-۹۹.

DOI:10.22126/amcen.2026.14016.1091



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

خاک های رسی، به ویژه نمونه هایی با پلاستیسیته بالا و حساسیت زیاد به رطوبت، به دلیل ظرفیت باربری پایین، تراکم پذیری زیاد و رفتار چالش برانگیز انقباضی، دشواری های قابل توجهی را در مهندسی ژئوتکنیک و عمران ایجاد می کنند؛ امری که اغلب منجر به ناپایداری زمین و تغییر شکل در پروژه های ساخت و ساز می گردد [۱-۲]. بهبود خواص این خاک ها امری حیاتی است، به ویژه از آنجا که خاک های رسی نرم به طور گسترده در بسیاری از سایت های مهندسی مشاهده می شوند که باعث ایجاد خسارات سازه ای و افزایش هزینه های نگهداری می گردند. روش های متداول تثبیت شیمیایی عمدتاً بر پایه استفاده از آهک و سیمان پرتلند معمولی (OPC) استوار هستند؛ این مواد از طریق واکنش های هیدراسیون و تشکیل ژل های سیلیکات کلسیم هیدرات (C-S-H)، خواص مکانیکی خاک از جمله مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت برشی و سختی را بهبود می بخشد [۳-۷]. تثبیت خاک به طور مؤثری دوام خاک را افزایش می دهد و از میزان پلاستیسیته آن می کاهد. با این حال، صنعت سیمان یکی از عوامل اصلی آلودگی زیست محیطی به شمار می رود و به دلیل فرایند تولید انرژی بر خود، حدود ۸٪ از انتشار جهانی دی اکسید کربن (CO_2) را به خود اختصاص می دهد [۸-۱۳].

این نگرانی های زیست محیطی و هزینه های بالای تولید مرتبط با آن، انگیزه ای برای جست و جوی عوامل تثبیت کننده ی جایگزین و پایدار ایجاد کرده است. در سال های اخیر، تثبیت کننده های مبتنی بر سیلیکات سدیم به عنوان افزودنی های امیدبخش، توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. سیلیکات سدیم (SS) به عنوان یک فعال ساز قلیایی عمل می کند که باعث پیشبرد واکنش های ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل های سیلیسی می شود؛ این امر پیوند بین ذرات خاک را تقویت کرده و تغییر شکل پذیری و پتانسیل فرسایش خاک را کاهش می دهد [۱۲-۱۸]. سیلیکات سدیم همچنین با مصرف یون های کلسیم آزاد برای تشکیل ژل (C-S-H)، از تشکیل کانی های انبساطی مانند اترینگایت در خاک های حاوی سولفات جلوگیری کرده و در نتیجه مانع از بروز آسیب های ناشی از تورم می شود [۱۳]. با وجود این مزایا، تولید تجاری سیلیکات سدیم به انرژی قابل توجهی نیاز دارد

و منجر به انتشار گاز CO_2 می شود که این امر پایداری آن را محدود می کند [۱۶].

بنابراین، استفاده از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) که محصول جانبی تولید صنعتی سیلیکات سدیم است، به عنوان جایگزینی دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه برای سیلیکات سدیم (SS) خالص پیشنهاد شده است [19-25]. پسماند سیلیکات سدیم (SSW) حاوی چندین فاز پوزولانی از جمله ژئولیت ها (آنالسیم، جوملینکایت)، آنورتیت و کلسیت است که با ترکیبات سیمانی واکنش داده و ژل های ثانویه (C-S-H) و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) را تشکیل می دهند؛ این فرآیند باعث بهبود رفتار مکانیکی خاک های تثبیت شده و در عین حال کاهش مصرف سیمان می شود [20-23]. استفاده از SSW نه تنها باعث ارزش افزایی پسماندها و کاهش آلودگی محیط زیست می شود، بلکه با به حداقل رساندن اتکا به سیمان پرتلند معمولی (OPC)، از روش های ساخت و ساز پایدار حمایت می کند.

بررسی های تجربی، اثرات مفید ترکیب سیمان، سیلیکات سدیم و محصولات جانبی صنعتی را در تثبیت خاک نشان داده اند. برای نمونه، مطالعات "چن و همکاران ۲۰۱۵" نشان می دهد که مخلوط های حاوی سیمان، سیلیکات سدیم و افزودنی های تقویت کننده، در مقایسه با تثبیت تنها با سیمان، مقاومت فشاری تک محوری را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد [۱۲]. به همین ترتیب، "وکیلی و همکاران ۲۰۱۶" گزارش کردند که مخلوط های بهینه شده از سیمان، سیلیکات سدیم و سرباره، مقاومت برشی و پایداری خاک را به طور قابل توجهی افزایش می دهند و در این فرایند، مدت زمان عمل آوری نقشی حیاتی در توسعه مقاومت ایفا می کند [۱۷]. علاوه بر این، "یو و همکاران ۲۰۱۳" یک تثبیت کننده ی نوین را معرفی کردند که ترکیبی از سرباره ی دانه بندی شده ی کوره بلند (GGBS)، سیمان، خاکستر بادی و سیلیکات سدیم است؛ نتایج این مطالعه نشان دهنده ی بهبود مقاومت و کنترل تغییر شکل در خاک های نرم با درصد رطوبت بالا، در کنار کاهش نیاز به سیمان و کاهش اثرات زیست محیطی می باشد [۲۰].

می آورد. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش هزینه های عملیاتی می شود، بلکه با کاهش وابستگی به سیمان، مزایای زیست محیطی قابل توجهی را در راستای مدیریت پسماندهای صنعتی به همراه دارد. در واقع، فعالیت پوزولانی SSW می تواند واکنش های شیمیایی در خاک را تسریع کرده، تشکیل فازهای سیمانیمانند (C-S-H) را تقویت نماید و در نهایت منجر به بهبود چشمگیر عملکرد مکانیکی، افزایش استحکام و ارتقای دوام خاک های تثبیت شده در برابر عوامل محیطی گردد.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل دقیق تر این اثرات، به بررسی میزان اثربخشی SSW به عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان پرتلند تیپ ۲ در فرآیند تثبیت خاک رسی تحت شرایط عمل آوری کنترل شده می پردازد. هدف غایی این مطالعه، ارتقای شاخص های کلیدی از جمله مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، کاهش حد پلاستیسیته و بهبود رفتار تراکمی خاک است، در حالی که همزمان تلاش می شود رد پای کربنی و اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از تولید انبوه سیمان به حداقل برسد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر استفاده از سیمان خالص یا سیلیکات سدیم تجاری و گران قیمت متمرکز بودند، این پژوهش بر کاربرد عملی SSW صنعتی تأکید ورزیده و دیدگاه های نوینی را در زمینه استراتژی های تثبیت مقرون به صرفه و دوستدار محیط زیست ارائه می دهد. برای دستیابی به درکی جامع، این مطالعه با ترکیب آزمایش های مکانیکی دقیق و تحلیل های پیشرفته ریزساختاری، از جمله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مکانیسم های زمینه ای بهبود ساختار خاک را تبیین کرده و در نهایت، روش های پایداری را که همسو با اصول ژئوتکنیک سبز هستند، ترویج و معرفی می کند.

ترکیب سیمان و مواد مبتنی بر سیلیکات سدیم، خواص مهندسی خاک مانند مقاومت فشاری و نسبت تحمل کالیفرنیا (CBR) را بهبود بخشیده و ضریب هدایت هیدرولیکی (k) را کاهش می دهد که این امر منجر به ایجاد خاک هایی بادوام تر و مقاوم تر می شود [26-28]. با این حال، سیلیکات سدیم به تنهایی ممکن است برای تثبیت خاک های رسی انبساطی، به ویژه به دلیل حلالیت بالای آن در محیط های اشباع و احتمال شسته شدن از توده خاک، کارایی لازم را نداشته باشد و نتایج ناپایداری ایجاد کند. بنابراین، برای دستیابی به حداکثر مقاومت، کاهش پدیده تورم و بهبود عملکرد مکانیکی خاک در درازمدت، توصیه می شود از این ماده به صورت هم افزا و در ترکیب با افزودنی های سخت کننده مانند سیمان یا آهک استفاده شود تا واکنش های شیمیایی تکمیلی و تشکیل پیوندهای مستحکم تر در ساختار خاک حاصل گردد [۲۷].

علاوه بر این، فعالیت پوزولانی ژئولیت های موجود در SSW از طریق اصلاح کانی شناسی خاک و بهبود پیوند بین ذرات، به کاهش پتانسیل تورم خاک و افزایش مقاومت مکانیکی آن کمک می کند [۲۱-۲۳]. جهرمی و همکاران تأکید کردند که ترکیبات ژئولیت-سیمان، جایگزین هایی دوستدار محیط زیست برای سیمان هستند که ضمن افزایش مقاومت خاک و کاهش شاخص های پراکندگی در خاک های رسی، اثرات منفی زیست محیطی را کاهش می دهند [۲۲].

با توجه به تمرکز روزافزون بر پایداری، روندهای اخیر به نفع به کارگیری پسماندهای صنعتی و مواد فعال شده با قلیا (AAMs) در تثبیت خاک است تا از این طریق رد پای کربن و مصرف منابع کاهش یابد [۲۴-۲۵].

پژوهش های گسترده و نظام مندی در سال های اخیر بر بررسی مکانیسم های تثبیت خاک های رسی با بهره گیری از ترکیبات سیمانی و سیلیکات سدیم متمرکز شده اند تا راهکارهای بهینه ای برای بهبود ویژگی های مهندسی این خاک ها بیابند؛ خلاصه ای جامع از این مطالعات پیشین و نتایج به دست آمده از آن ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این میان، استفاده از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به عنوان یک راهبرد نوین، با ایجاد ارزش افزایی از محصولات جانبی صنعتی و جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند، جایگزینی پایدار و کارآمد را فراهم

جدول ۱. مطالعات مربوط به اثر سیمان و سیلیکات سدیم بر خواص مکانیکی و ریزساختاری خاک های رسی

ردیف	سال	انواع خاک	نوع افزودنی	درصد (%)	UCS	SPC	AL	DST	SEM	مرجع
1	2020	رس	سیمان نانو سیمان	0-4 0-4	✓	✓	✓	-	✓	Yousefi et al.[4]
2	2018	رس سیلت	Water Hyacinth Fiber Coir Fiber Jute Fiber	0-5 0-5 0-5	✓	✓	✓	-	✓	Cui et al.[29]
3	2012	خاک ارگانیك	سیمان سیلیکات سدیم کلرید کلسیم	0-30 0-5 0-4	-	✓	✓	✓	✓	Kazemian et al.[30]
4	2014	خاک لاتینه	سیلیکات سدیم	0-15	✓	✓	✓	-	✓	Latifi et al.[31]
5	2015	رس	سیمان سیلیکات سدیم	0-30 1-4	✓	✓	✓	-	✓	Ma et al.[12]
6	2021	رس	سیلیکات سدیم	20- 50	-	✓	-	✓	✓	Koohestani et al.[18]
7	2022	کائولین رس	سیلیکات سدیم	0-6	✓	-	-	✓	-	Nazar et al.[32]
8	2023	رس	سیمان سیلیکات سدیم	0-5 0-40	✓	✓	✓	✓	-	Ponomar et al.[33]
9	1971	رس	سیلیکات سدیم	0-4	✓	✓	✓	✓	-	Hurly et al.[34]
10	2021	رس	نانو سیلیکا سیلیکات سدیم	1-9 2-6	✓	✓	-	-	✓	Selvakumar et al.[35]

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ دو

شرح	مقدار
نرمی (Blaine Test, cm ² /gr)	3081
Retained on Sieve # 170 (90 μm)	5.7
منبسط شدگی اتوکلاوی	0.21
غلظت نرمال	23
Vicat Test, زمان گیرش اولیه (minutes)	153
Vicat Test, زمان گیرش نهایی (minutes)	212
مقاومت فشاری (Kgf/cm ²)	
۷ روزه	333
۲۸ روزه	492

۲. مواد

این بخش به تشریح مواد و روشهای آزمایشگاهی به کاررفته در این پژوهش می پردازد. در این مطالعه، از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی این سیمان به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، پسماند سیلیکات سدیم (SSW) که یک محصول جانبی صنعتی با فعالیت پوزولانی است، به عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان به منظور ارزیابی اثر آن بر تثبیت خاک به کار گرفته شده است.

تولید سیلیکات سدیم عموماً بر اساس نسبت مولی SiO_2 به Na_2CO_3 تنظیم می‌شود و فرمولاسیون‌های صنعتی معمولاً در محدوده ۲۰ تا ۳۳ قرار دارند. در مقابل، پسماند سیلیکات سدیم اغلب نسبتی تقریباً دو برابر این مقدار را نشان می‌دهد که آن را برای کاربردهای صنعتی استاندارد نامناسب می‌سازد. بر این اساس، سیلیکات‌های سدیم به کاررفته در مطالعات پژوهشی پیشین عموماً از محدوده صنعتی قابل استفاده انتخاب می‌شوند، برای نمونه، "وکیلی و همکاران ۲۰۱۶" از سیلیکات سدیم با نسبتی بین ۱.۹ و ۲.۱ استفاده کردند [۱۷] و همچنین "ژائوزانگ و همکاران ۲۰۲۴" از سیلیکات سدیم با نسبت ۲.۲ استفاده کردند [۱۴].



شکل ۱. مخازن پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

پسماند سیلیکات سدیم به کاررفته در این پژوهش از شرکت تولیدی سیلیکات سدیم «باوند شیمی» واقع در شهرک صنعتی لیا، در استان قزوین تهیه شده است. برای شناسایی و تعیین ویژگی‌های این پسماند، تحلیل‌های پراش پرتو ایکس (XRD) (شکل ۲) و فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بر روی نمونه‌های جمع‌آوری شده انجام شد. خواص این پسماند در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ دو			
شرح	درصد	شرح	درصد
CaO.f	0.82	SiO_2	20.79
Cl	-	Al_2O_3	4.76
LOI	1.88	Fe_2O_3	3.86
I.R	0.51	CaO	62.28
C_3S	52.67	MgO	3.22
C_2S	19.89	SO_3	1.89
C_3A	6.09	Na_2O	0.37
C_4AF	11.74	K_2O	0.68

به منظور شناسایی دقیق پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به کاررفته در این مطالعه، ضروری است ابتدا ماهیت شیمیایی سیلیکات سدیم و روش‌های استحصال صنعتی آن مورد بررسی قرار گیرد تا درک روشنی از فرایند تولید این پسماند حاصل شود. سیلیکات سدیم یک ترکیب معدنی محلول در آب است که معمولاً به اشکال کریستالی، شیشه‌ای، پودری یا محلول آبی تولید می‌شود. این ترکیب از طریق واکنش شیمیایی بین سیلیس (SiO_2) و کربنات سدیم (Na_2CO_3) حاصل می‌گردد. سیلیکات سدیم به عنوان یک ماده معدنی، پلیمری و شدیداً قلیایی مشتق شده از سیلیس، کاربردهای گسترده‌ای در بخش‌های مختلف صنعتی دارد. کاربردهای اصلی آن شامل استفاده به عنوان پیش‌ماده در تولید چسب‌ها، سیمان‌ها، خمیر کاغذ، شوینده‌ها و صابون‌ها و همچنین به عنوان افزودنی در فرمولاسیون‌های بتن و عامل فعال در فرایندهای تصفیه آب است.

در جریان انحلال سیلیکات سدیم فاز جامد در آب، پس از فیلتراسیون، محلولی زلال و شفاف به دست می‌آید. در این مرحله، پسماند سیلیکات سدیم که شامل باقی‌مانده‌های حل نشده و ناخالصی‌های باقی‌مانده است، در سیستم فیلتراسیون باقی می‌ماند. سپس محلول تصفیه شده به مخازن ذخیره‌سازی بزرگی (شکل ۱) منتقل شده و در شرایط کنترل شده تا زمان استفاده ذخیره می‌شود. با گذشت زمان، ذرات سنگین‌تری که به طور ناقص حل شده‌اند در کف مخازن ته‌نشین شده و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بیشتری را تشکیل می‌دهند.

جدول ۴. نتایج آزمایش XRF برای پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

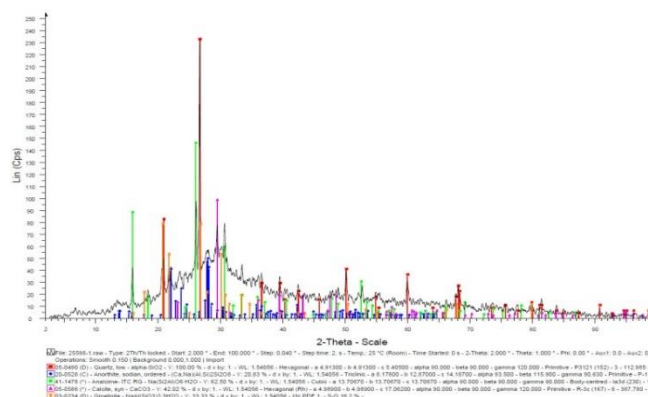
ترکیب شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	L.O.I
درصد وزنی (%)	0.86	5.19	64.41	13.97	0.84	5.38	0.28	1.57	7.5

با توجه به نتایج تحلیل XRF، نمونه خاک دارای درصد بالایی از سیلیس: SiO₂ (۴۴.۴۱٪) و آلومینا: Al₂O₃ (۱۳.۱۴٪) است که نشان دهنده‌ی ماهیت رسی آن است.

علاوه بر این، مقادیر قابل توجه اکسید کلسیم: CaO (۱۵.۱۷٪) و مقدار کاهش وزن پس از حرارت: L.O.I (۱۴.۶٪)، حضور چشمگیر فازهای کربناتی در ترکیب خاک را تأیید می‌کند. تحلیل XRD کانی‌های اصلی خاک را کوارتز، کلسیت، دولومیت، فلدسپار و کانی‌های رسی شناسایی کرد.

این ترکیب نشان می‌دهد که خاک مورد مطالعه در دسته‌ی خاک‌های رسی آهکی قرار می‌گیرد. این نوع خاک‌ها معمولاً حاوی مقادیر زیادی از کانی‌های کربناتی مانند کلسیت و دولومیت بوده و غالباً در محیط‌های رسوبی شکل می‌گیرند.

علاوه بر این، ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناختی خاک، به‌ویژه محتوای بالای CaO و L.O.I، نشان دهنده‌ی پتانسیل بالای آن برای واکنش با عوامل تثبیت کننده مانند سیمان و مواد پوزولانی است. بر اساس ترکیب کلی و ویژگی‌های مشاهده شده، احتمال غالب بودن کانی‌های رسی مانند کائولینیت یا ایلیت بسیار زیاد است. خواص فیزیکی خاک رسی به کاررفته در این مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۲. نتایج آزمایش XRD برای پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

در این مطالعه، از خاک رسی برای آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه‌های خاک از منطقه بوین‌زهر (شهر شال) در استان قزوین جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. به منظور شناسایی ویژگی‌های کانی‌شناختی و شیمیایی خاک، تحلیل‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و فلورسانس پرتو ایکس (XRF) انجام گرفت. در آزمایش XRD، پرتویی با طول موج مشخص بر روی نمونه خاک تابیده شده و موج بازتابی برای تعیین انواع کانی‌های موجود مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نمونه خاک از سه کانی اصلی تشکیل شده است: کائولینیت، کوارتز و ایلیت. برای تخمین نسبت‌های نسبی این کانی‌ها، شناسایی و تعیین مقدار عناصر شیمیایی موجود در خاک ضروری است. به همین منظور، تحلیل XRF نیز بر روی نمونه‌ها انجام شد تا ترکیب عنصری و درصد‌های مربوط، به آن‌ها تعیین گردد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج تحلیل XRF برای خاک

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 (%)	4.26	13.14	44.41	0.7	2.01	15.17	0.75	4.96	14.6

جدول ۶. خواص فیزیکی خاک رس

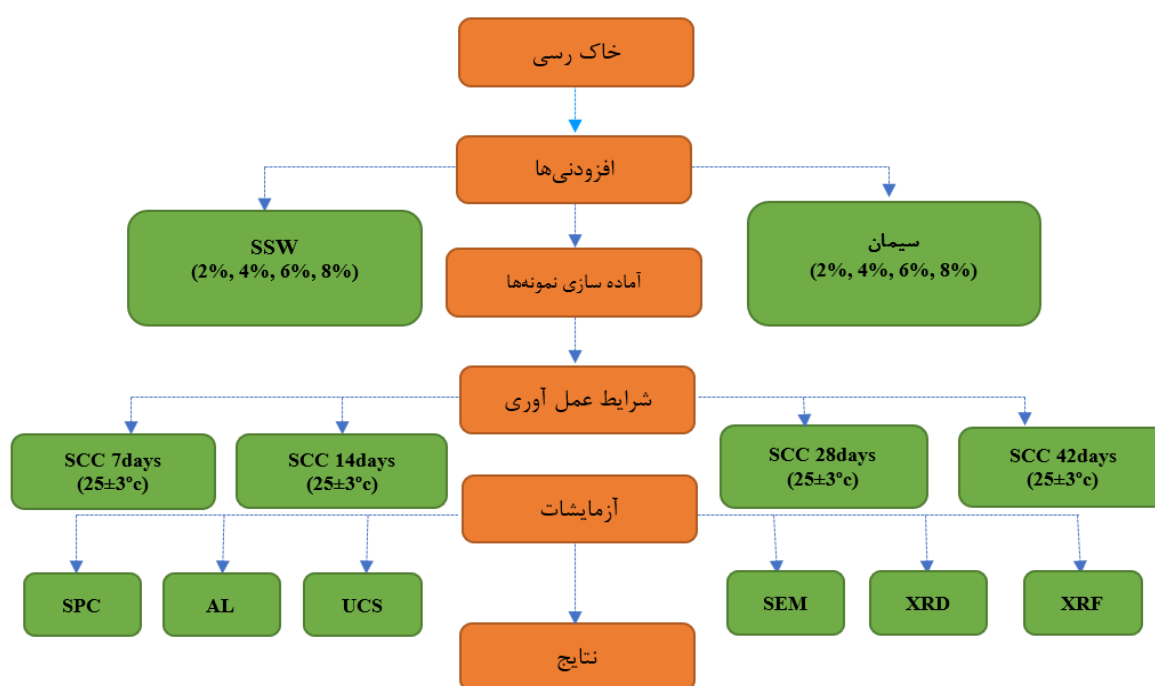
مقدار	خواص فیزیکی
۲/۶۱	وزن مخصوص (Gs)
۴/۳۰	(%) درصد رطوبت طبیعی
۴۱/۴۰	(%) حد روانی
۲۵/۳۰	(%) حد خمیری
۱۶/۱۰	(%) شاخص خمیری
۱/۶۵	(gr/cm ³) حداکثر وزن مخصوص خشک
۱۷/۳۰	(%) درصد رطوبت بهینه

تراکم تعیین شد. سپس، ترکیبات به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همگن شدند تا از یکنواختی مخلوط اطمینان حاصل شود. برای به کارگیری بهینه پسماند سیلیکات سدیم و به حداقل رساندن اتلاف انرژی، درصد رطوبت این پسماند محاسبه و از مقدار رطوبت بهینه کسر شد تا امکان افزودن مستقیم آن به شکل خمیری فراهم گردد. سپس مخلوط حاصل در قالب‌های فلزی استوانه‌ای (به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر) در چهار لایه متراکم شدند. برای افزایش چسبندگی بین لایه‌ها، سطح هر لایه پس از تراکم، به صورت ملایم با ابزاری نوک‌تیز خراشیده شد. نمونه‌های آماده شده بلافاصله از قالب خارج شده و وزن و ابعاد آن‌ها به طور دقیق ثبت گردید.

برای جلوگیری از اتلاف رطوبت، نمونه‌ها در چندین لایه سلفون پیچیده شده و تا زمان انجام آزمایش در شرایط کنترل شده نگهداری شدند. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز در دمای محیط آزمایشگاه و تحت شرایط رطوبتی اولیه عمل‌آوری شدند. ترکیبات مخلوط‌ها و اختصارات مربوط به آن‌ها در جدول ۷ خلاصه شده و روند کاری آزمایش‌ها در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

۳. روش‌ها

در این مطالعه، تأثیر افزودنی‌ها بر عملکرد مکانیکی خاک رسی تثبیت شده از طریق آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مورد بررسی قرار گرفت. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا مقدار رطوبت بهینه برای هر مخلوط شامل خاک رس و خاک مخلوط شده با درصدهای مختلف سیمان و پسماند سیلیکات سدیم، بر اساس نتایج آزمایش



شکل ۳. فلوچارت برنامه‌ی آزمایشگاهی

جدول ۷. اختصارات ترکیبات

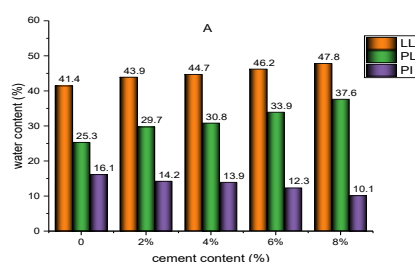
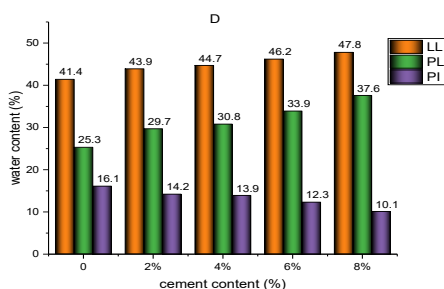
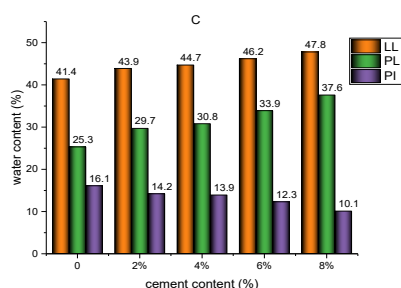
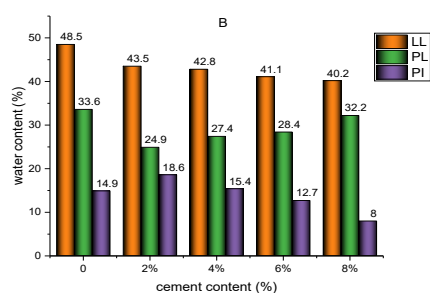
ترکیبات	اختصار	ترکیبات	اختصار
soil+4% cement+4% SSW	CL/4C/4SSW	Clay Soil	CL
soil+6% cement+4% SSW	CL/6C/4SSW	Soil+2% cement	CL/2C
soil+8% cement+4% SSW	CL/8C/4SSW	soil+4% cement	CL/4C
soil+2% cement+6% SSW	CL/2C/6SSW	soil+6% cement	CL/6C
soil+4% cement+6% SSW	CL/4C/6SSW	soil+8% cement	CL/8C
soil+6% cement+6% SSW	CL/6C/6SSW	Soil+2% cement+2% SSW	CL/2C/2SSW
soil+8% cement+6% SSW	CL/8C/6SSW	soil+4% cement+2% SSW	CL/4C/2SSW
soil+2% cement+8% SSW	CL/2C/8SSW	soil+6% cement+2% SSW	CL/6C/2SSW
soil+4% cement+8% SSW	CL/4C/8SSW	soil+8% cement+2% SSW	CL/8C/2SSW
soil+6% cement+8% SSW	CL/6C/8SSW	soil+2% cement+4% SSW	CL/2C/4SSW
soil+8% cement+8% SSW	CL/8C/8SSW		

۴. نتایج

۴-۱. حدود اتربرگ (AL)

وزن مخصوص ذرات خاک (Gs) با استفاده از آزمایش پیکنومتر و مطابق با استاندارد ASTM D854 تعیین شد [۳۶] این آزمایش سه بار تکرار شد و مقدار میانگین (Gs) برابر با ۲.۶۱۴ به دست آمد حد پلاستیک (PL)، حد روانی (LL) و شاخص پلاستیسیته (PI) مطابق با استاندارد ASTM D4318 تعیین شدند [۳۷].

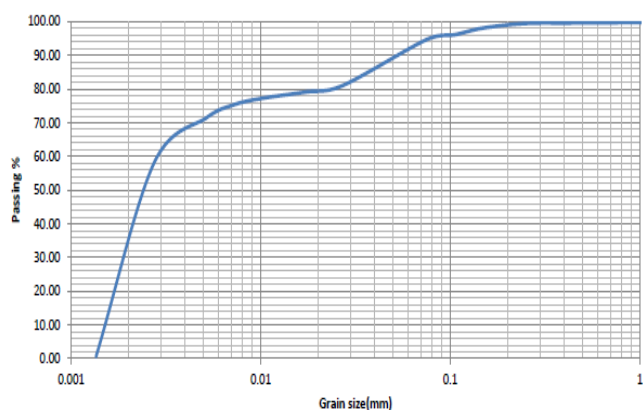
به منظور بررسی ویژگی‌های پلاستیسیته، آزمایش‌های تعیین حد روانی و حد پلاستیک بر مبنای وزن خشک خاک، در سه تکرار مجزا بر روی نمونه‌های مختلف صورت گرفت؛ این نمونه‌ها شامل خاک رسی خالص (بدون افزودنی)، نمونه‌های حاوی پسماند سیلیکات سدیم و همچنین ترکیباتی متشکل از خاک رسی به همراه سیمان و پسماند سیلیکات سدیم بودند. نتایج حاصل از این ارزیابی‌ها و تغییرات حدود اتربرگ بر حسب مقدار سیمان و پسماند سیلیکات سدیم اضافه‌شده به خاک، در شکل ۴ به صورت نموداری ترسیم و ارائه شده است.



هیدرات (C-S-H) و کلسیم آلومینیوم سیلیکات هیدرات (C-A-S-H) ایجاد می‌کند. این ترکیبات از طریق پر کردن منافذ، کاهش میل به جذب رطوبت و بهبود پیوند میان ذرات، باعث تقویت ماتریس خاک می‌شوند. در نتیجه، این تثبیت ترکیبی ضمن ارتقای رفتار مکانیکی و پلاستیک خاک، راهکاری پایدار و مقرون به صرفه را از طریق بازیافت بهینه این پسماند صنعتی ارائه می‌دهد.

۲-۴. توزیع اندازه ذرات خاک

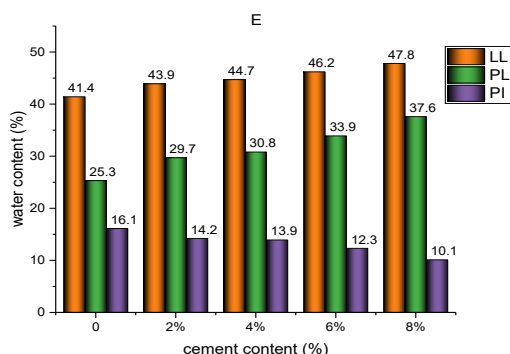
جهت به دست آوردن منحنی توزیع دانه بندی خاک، با توجه به اینکه ۹۴.۶٪ خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرد، آزمایش هیدرومتر مطابق با استاندارد ASTM D-422 انجام شد [۳۸]. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ۹۴.۶٪ از ذرات خاک کوچک تر از ۰.۰۷۵ میلی متر هستند که این امر منجر به طبقه بندی این خاک در دسته خاک های ریزدانه می شود.



شکل ۵. توزیع اندازه ذرات رس

۳-۴. تراکم پروکتور استاندارد (SPC)

جهت تعیین درصد رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر تراکم خشک (MDD)، آزمایش تراکم پروکتور استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698 انجام شد [۳۹]. تجهیزات و ابزارهای مورد نیاز برای اجرای آزمایش تراکم پروکتور استاندارد در شکل ۶ نشان داده شده است.

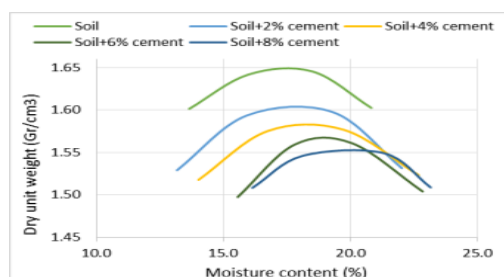


شکل ۴. اثر سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر حدود اتربرگ؛ A) سیمان، B) سیمان + ۲٪ SSW، C) سیمان + ۴٪ SSW، D) سیمان + ۶٪ SSW، E) سیمان + ۸٪ SSW

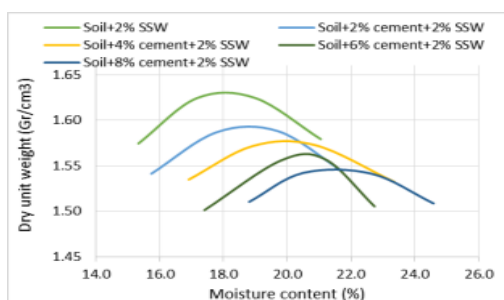
با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش ها (شکل ۴)، افزودن سیمان در محدوده ۰ تا ۸ درصد منجر به تغییرات قابل توجهی در حدود اتربرگ خاک شده است. به طور خاص، با افزایش مقدار سیمان، این تغییرات برجسته تر می شوند.

نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین همسو است؛ بسیاری از این پژوهش ها نیز گزارش کرده اند که افزودن سیمان به طور قابل توجهی بر حدود اتربرگ خاک های رسی تأثیر گذاشته و باعث کاهش آنها می شود [۱۵، ۲۴، ۲۵].

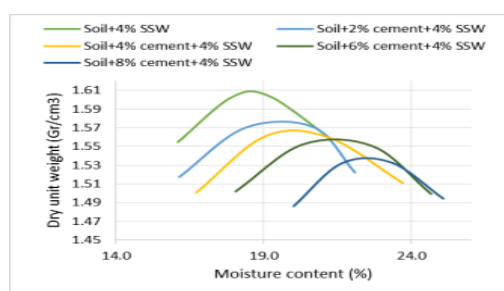
با توجه به نتایج ارائه شده، استفاده ترکیبی از سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) تأثیر بسزایی در بهبود خواص خاک رسی، به ویژه حدود اتربرگ آن دارد. داده ها نشان دهنده کاهش مستمر شاخص پلاستیسیته (PI) با افزایش درصد سیمان و SSW است. به طور مشخص، مقدار PI از مقدار اولیه ۱۶.۱٪ در خاک تثبیت نشده به ۶.۴٪ در مخلوط حاوی ۸٪ سیمان و ۸٪ SSW کاهش یافته است که این امر بیانگر بهبود چشمگیر پایداری خاک و کاهش رفتار پلاستیک آن است. علاوه بر این، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) نیز تغییراتی را نشان دادند که منعکس کننده اصلاحات در حساسیت آبی و ویژگی های پلاستیک خاک است. کاهش مستمر شاخص پلاستیسیته (PI) با افزودن SSW نشان می دهد که این محصول جانبی صنعتی، به دلیل ماهیت پوزولانی، به صورت هم افزا با سیمان واکنش داده و ترکیبات سیمانی ثانویه ای نظیر کلسیم سیلیکات



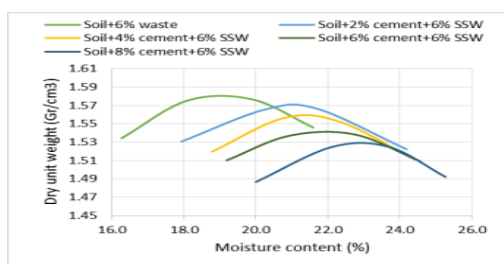
A



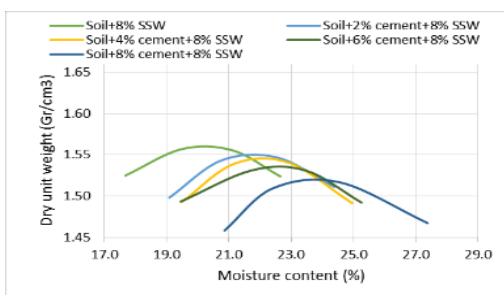
B



C



D



E

شکل ۷. نتایج آزمایش پروکتور استاندارد برای مخلوط خاک و سیمان و SSW؛ A (سیمان)، B (سیمان + ۲٪ SSW)، C (سیمان + ۴٪ SSW)، D (سیمان + ۶٪ SSW)، E (سیمان + ۸٪ SSW).



شکل ۶. تجهیزات و ابزارهای مورد استفاده در آزمایش تراکم پروکتور استاندارد (SPC)

آزمایش‌های تراکم بر روی چهار گروه از نمونه‌ها انجام شد: خاک رسی تثبیت نشده، مخلوط‌های خاک و سیمان، مخلوط‌های خاک و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) و مخلوط‌های ترکیبی خاک و سیمان و SSW. مقدار افزودنی‌ها در درصدهای ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد نسبت به وزن خشک خاک تغییر داده شد تا تأثیر آن‌ها بر رفتار تراکمی ارزیابی شود.

در هر آزمایش، خاک خشک به‌طور کامل با افزودنی‌های مربوطه مخلوط شد تا همگنی آن تضمین گردد و سپس آب به‌صورت تدریجی برای دستیابی به مقادیر مختلف رطوبت اضافه شد. مخلوط‌های آماده‌شده سپس مطابق با دستورالعمل‌های ASTM D698 در قالب آزمایش پروکتور استاندارد متراکم شدند و دانسیته خشک حاصل ثبت گردید. منحنی‌های تراکم از طریق رسم نمودار دانسیته خشک در مقابل مقدار رطوبت رسم شدند و از روی آن‌ها، درصد رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر دانسیته خشک (MDD) تعیین گردیدند. منحنی‌های حاصل که در شکل ۷ به تصویر کشیده شده‌اند، به وضوح اثرات به تنهایی و ترکیبی سیمان و SSW را بر ویژگی‌های تراکمی خاک نشان می‌دهند. بدیهی است که هر دو افزودنی باعث بهبود حداکثر دانسیته خشک شده و مقدار OMC را به‌طور جزئی تغییر می‌دهند؛ در این میان، مخلوط‌های ترکیبی خاک و سیمان و SSW بیشترین بهبود را در رفتار تراکمی نشان دادند که حاکی از اثرات هم‌افزایی میان این دو افزودنی است.

جدول ۹. ترکیب بهینه از نظر عملکرد و بهره‌وری هزینه

ترکیبات	MDD (g/cm ³)	OMC (%)	مزیت کلیدی
4% SSW + 8% Cement	1.538	22.6	تراکم حداکثری
6% SSW + 6% Cement	1.542	21.9	تعادل عملکرد-هزینه

۴-۴. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از یک دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شد. بر این اساس، پس از اتمام دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها از پوشش پلاستیکی چندلایه خارج شده، وزن شدند و مشخصات فیزیکی آن‌ها پیش از قرارگیری در دستگاه آزمایش ثبت گردید. این آزمایش تحت شرایط کنترل کرنش با نرخ بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه و مطابق با استاندارد ASTM D2166-98 انجام شد [۴۰]. نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزودن پسماند سیلیکات سدیم در ترکیب با سیمان و رس، منجر به افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها می‌گردد.



شکل ۸. نمونه‌های آزمایش تک‌محوری

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نمونه‌ها پس از شکست در آزمایش فشاری تک‌محوری، بسته به نوع و مقدار

با توجه به نتایج آزمایش‌ها (شکل ۷)، افزودن سیمان در محدوده صفر تا هشت درصد به‌طور قابل‌توجهی بر ویژگی‌های تراکمی خاک تأثیر می‌گذارد. به‌طور مشخص، حداکثر دانسیته خشک (MDD) از حدود ۱.۶۵ به ۱.۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافته، در حالی که درصد رطوبت بهینه (OMC) از حدود ۱۷٪ به ۱۹.۵٪ افزایش یافته است. این روند به افزایش حضور ذرات ریزتر و در نتیجه افزایش سطح ویژه مخلوط به دلیل هیدراسیون سیمان نسبت داده می‌شود. این ذرات ریزتر میل بیشتری به جذب آب دارند، که این امر منجر به افزایش نیاز به آب برای تراکم بهینه و در نتیجه افزایش OMC و کاهش MDD می‌گردد. علاوه بر این، ثابت نگه داشتن میزان SSW در مقدار ۲٪ و هم‌زمان افزایش مقدار سیمان از ۲٪ به ۸٪، این اثرات را تقویت کرده و مجدداً تأثیر سیمان بر رفتار تراکمی خاک را نشان می‌دهد. افزایش مقدار سیمان منجر به کاهش ۲.۹۵ درصدی در MDD و افزایش ۱۵.۱ درصدی در OMC شد.

در بررسی اثر تغییر میزان SSW در ترکیب با مقدار ثابت سیمان (۸٪)، اثر افزایش غلظت SSW در ترکیب با ۸٪ سیمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که درصدهای پایین SSW (۲ تا ۴ درصد) مؤثرترین عملکرد را در افزایش MDD و کاهش OMC داشتند. در غلظت‌های بالاتر، به دلیل جایگزینی ذرات خاک با مواد سبک‌تر، کاهش جزئی در MDD مشاهده گردید (جدول ۸).

جدول ۸. مقایسه عملکرد سیمان و (سیمان+SSW)

سیمان+SSW	سیمان	پارامترها
۷.۹٪-	۶٪-	تغییرات (MDD)
۳۷.۵٪+	۱۲.۷٪+	تغییرات (OMC)

افزودن SSW به سیمان نه تنها روند کاهش تراکم را حفظ می‌کند، بلکه از طریق اثر پوزولانی خود (تشکیل ژل‌های سیلیکاتی)، منافذ بین ذرات را بهتر پر کرده و در نتیجه منجر به ایجاد ساختاری منسجم‌تر و متراکم‌تر می‌شود (جدول ۹).

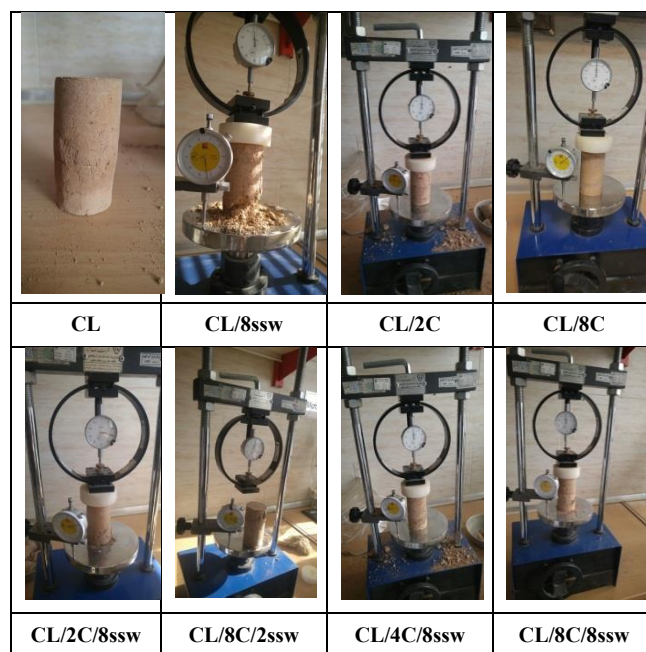
افزودنی کارآمد، اقتصادی و پایدار در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک برجسته کرده و امکان جایگزینی یا تکمیل مواد سنتی تثبیت کننده را فراهم می سازد.

همان طور که در جدول ۱۰ ارائه شده است، مقادیر UCS در مقایسه با خاک رس تثبیت نشده، با افزودن سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در حالی که سیمان به تنهایی بهبود چشمگیری در مقاومت ایجاد می کند، استفاده ترکیبی از سیمان و SSW منجر به دستیابی به مقادیر حتی بالاتری می شود، به ویژه در نسبت های اختلاط متوسط. حداکثر مقدار UCS برابر با ۳۶۴۸.۹۴ کیلو پاسکال برای مخلوط CL/8C/8SSW به دست آمده است که نشان دهنده اثر هم افزایی قوی میان سیمان و SSW است. این نتایج اثبات می کند که روش تثبیت ترکیبی، به ویژه در شرایط عمل آوری بلندمدت، مؤثرتر از استفاده از سیمان به تنهایی است.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش UCS پس از ۴۲ روز عمل آوری

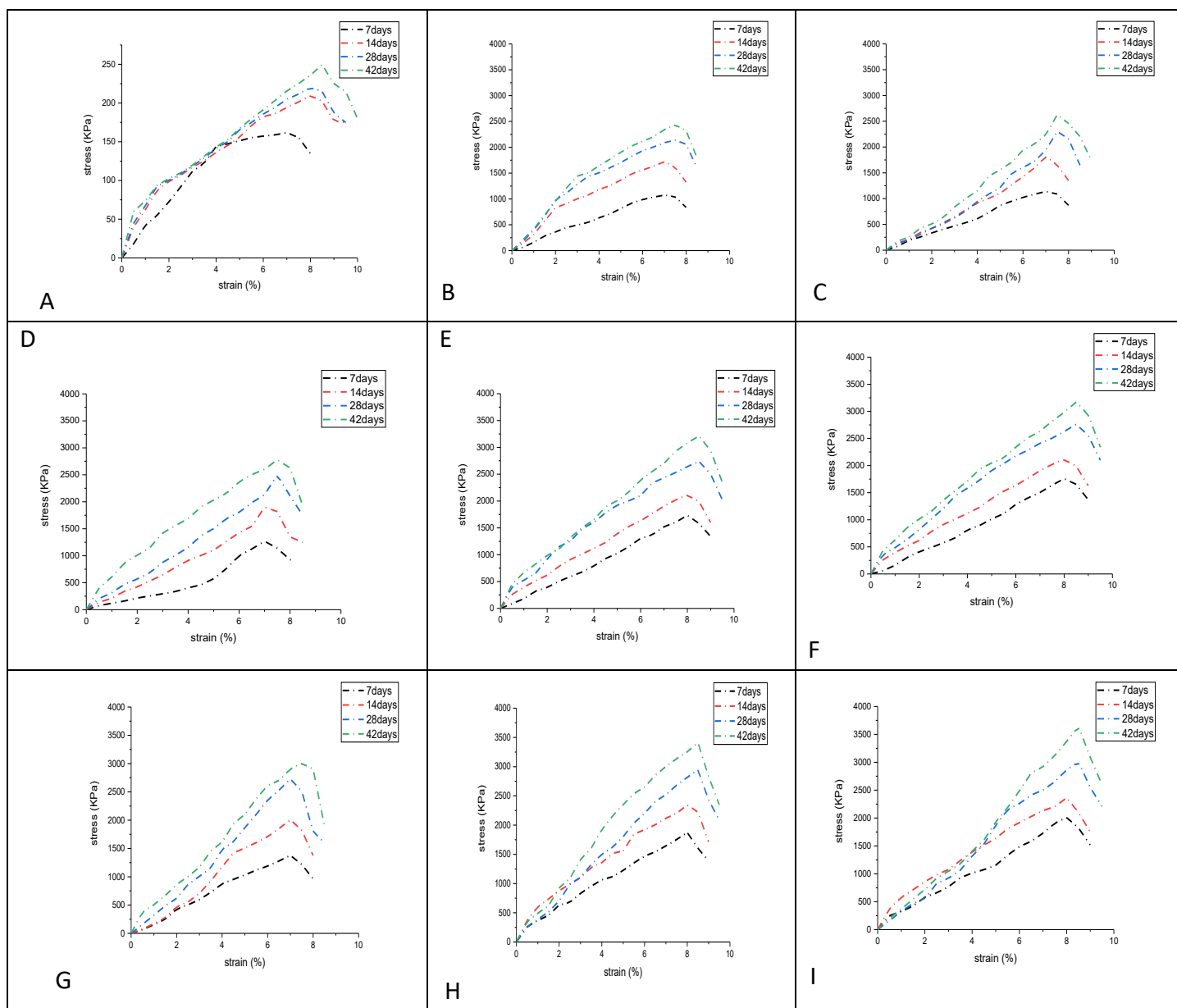
اختصارات	UCS(KPa)
CL	249.73
CL/2C	2440.40
CL/4C	2457.40
CL/6C	2777.00
CL/8C	3008.28
CL/2C/2SSW	2502.32
CL/4C/2SSW	2652.16
CL/6C/2SSW	3420.00
CL/8C/2SSW	3052.73
CL/2C/4SSW	2657.16
CL/4C/4SSW	3006.78
CL/6C/4SSW	3101.68
CL/8C/4SSW	3236.53
CL/2C/6SSW	2816.98
CL/4C/6SSW	3171.60
CL/6C/6SSW	3211.56
CL/8C/6SSW	3411.35
CL/2C/8SSW	2961.83
CL/4C/8SSW	3131.65
CL/6C/8SSW	3171.60
CL/8C/8SSW	3648.94

تثبیت کننده های به کار رفته، تفاوت های آشکاری را در نحوه گسترش ترک ها و الگوهای تغییر شکل نشان می دهند.



شکل ۹. تصویر نمونه ها پس از شکست

افزایش زمان عمل آوری از ۷ روز به ۴۲ روز منجر به بهبود محسوس عملکرد مکانیکی تمامی مخلوط های آزمایش شده گردید. به طور مشخص، با طولانی تر شدن دوره های عمل آوری، افزایش تدریجی در مقاومت فشاری تک محوری (UCS) مشاهده گردید که نشان دهنده تداوم توسعه مواد سیمانی و پوزولانی در ماتریس خاک تثبیت شده است. علاوه بر این، سختی نمونه ها که با شیب منحنی تنش-کرنش بیان می شود نیز با پیشرفت عمل آوری افزایش یافت که منعکس کننده ارتقای مقاومت مخلوط ها در برابر تغییر شکل تحت بارگذاری است. این روندها که در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده اند، اثر مفید افزایش زمان عمل آوری را بر هر دو ویژگی مقاومت و سختی سیستم های خاک تثبیت شده تأیید می کنند. علاوه بر این، روند صعودی و افزایش مستمر مقادیر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) متناسب با افزایش میزان SSW، گویای آن است که این ماده نه تنها نقش مؤثری در ارتقای مقاومت مکانیکی خاک ایفا می کند، بلکه موجب بهبود دوام و پایداری ساختاری خاک تثبیت شده در برابر عوامل محیطی می گردد. این یافته های تجربی، پتانسیل بالای پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را به عنوان یک



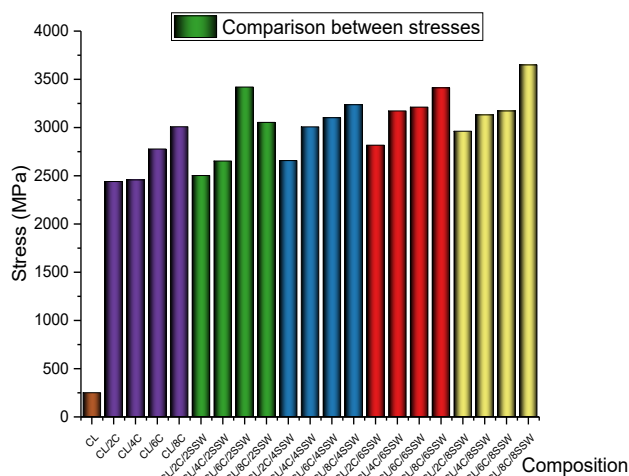
شکل ۱۰. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و SSW پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز عمل‌آوری
(A خاک)، (B خاک + ۲٪ سیمان)، (C خاک + ۴٪ سیمان)، (D خاک + ۶٪ سیمان)، (E خاک + ۶٪ سیمان + SSW/۶)،
(F خاک + ۶٪ سیمان + SSW/۸)، (G خاک + ۸٪ سیمان)، (H خاک + ۸٪ سیمان + SSW/۶)، (I خاک + ۸٪ سیمان + SSW/۸)

نشان می‌دهند. تا روزهای ۲۸ و ۴۲ (شکل‌های ۱۳ و ۱۴)، افزایش مقاومت برجسته‌تر شده و مخلوط‌هایی نظیر CL/6C/2SSW، CL/8C/6SSW و CL/8C/8SSW به بالاترین مقادیر تنش دست یافته‌اند.

نتایج به‌وضوح نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی میان سیمان و SSW است، به‌گونه‌ای که مقادیر متوسط تا بالای SSW، عملکرد را بیش از حالت استفاده از سیمان به‌تنهایی ارتقا می‌دهد. علاوه بر این،

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است، مقادیر تنش نمونه‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری به‌طور تدریجی افزایش می‌یابد که این امر تأییدی بر هیدراسیون مستمر سیمان و واکنش‌های پوزولانی پسماند سیلیکات سدیم (SSW) است.

در روزهای ۷ و ۱۴ (شکل‌های ۱۱ و ۱۲)، نمونه‌های تثبیت شده، به‌ویژه نمونه‌های حاوی هر دو ماده سیمان و SSW (ترکیبات ۶ تا ۲۱)، بهبودهای چشمگیری را در مقایسه با خاک رس تثبیت نشده



شکل ۱۴. مقایسه تنش‌ها پس از ۴۲ روز عمل‌آوری

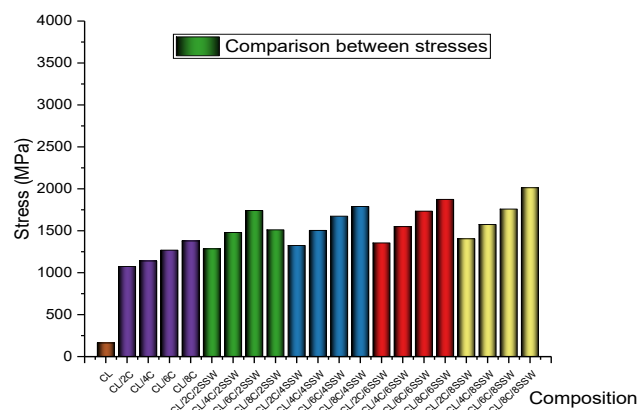
تداوم واکنش‌های هیدراسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی SSW منجر به تشکیل پیوندهای پایدارتر، مانند (C-S-H) و افزایش ژل‌های سیلیکاته، می‌شود.

جدول ۱۱. اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) پس از ۴۲ روز

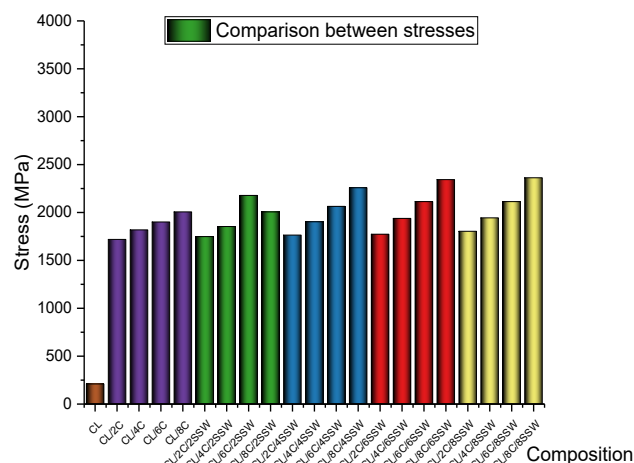
ترکیبات	Clay	Clay + 2% Cement	Clay + 8% Cement
UCS (kPa)	۲۵۰	۲۴۴۰	۳۰۰۸
کرنش در لحظه شکست (%)	۹	۷.۵	۷.۵

با توجه به جدول ۱۱، افزایش مقدار سیمان منجر به افزایش ۱۲ برابری مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه طبیعی شده است. کاهش کرنش شکست (تقریباً ۱۶.۷٪) بیانگر افزایش سختی و تردی بیشتر است. رفتار نمونه‌ها از ترد (در حالت طبیعی) به نیمه‌ترد/نیمه‌شکل پذیر تغییر می‌کند.

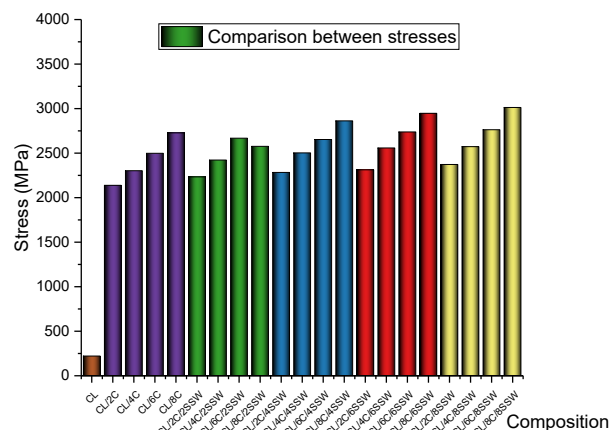
افزایش مستمر مقاومت در طول زمان، گویای دوام و کارایی بلندمدت روش تثبیت ترکیبی است.



شکل ۱۱. مقایسه تنش‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری



شکل ۱۲. مقایسه تنش‌ها پس از ۱۴ روز عمل‌آوری



شکل ۱۳. مقایسه تنش‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

۵-۴. اثر ترکیب سیمان و SSW

۵-۴-۱. مقاومت فشاری (UCS) پس از ۴۲ روز:

با توجه به جدول ۱۲، در مقایسه با نمونه‌های حاوی سیمان تنها، افزایش مقدار UCS در مخلوط سیمان و SSW مشاهده می‌شود.

جدول ۱۲. افزایش مقدار (UCS) در مخلوط سیمان و SSW در مقایسه با

سیمان

Base	3008	8% Cement
%1.5+	3052	2% SSW + 8% Cement
+21.3%	3649	8% SSW + 8% Cement

جدول ۱۳. بهینه‌سازی مخلوط بر اساس مقاومت و رفتار مکانیکی

کاربرد پیشنهادی	رفتار مکانیکی	UCS (kPa)	ترکیبات
ساخت پی (فونداسیون) بر روی خاک‌های سست	نیمه‌شکل‌پذیر	۳۶۴۹	8% SSW + 8% Cement
بستر راه (زیرسازی جاده)	نیمه ترد	۳۰۵۲	2% SSW + 8% Cement
پروژه‌های اقتصادی-سازه‌ای	نیمه‌شکل‌پذیر	۳۴۲۰	6% SSW + 6% Cement

حداکثر مقاومت مربوط به مخلوط حاوی ۸٪ سیمان + ۸٪ SSW است که نشان‌دهنده افزایش ۱۴.۶ برابری در مقایسه با خاک طبیعی است.

۵-۴-۲. رفتار کرنش

افزودن SSW منجر به افزایش کرنش شکست (از ۰.۵٪ به ۱٪) می‌شود. نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های حاوی سیمان خالص، افت تنش ملایم‌تری پس از نقطه پیک نشان می‌دهند که بیانگر رفتاری نیمه‌شکل‌پذیر است.

افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW) از طریق چندین مکانیسم هم‌افزا به بهبود مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده کمک می‌کند. نخست، ذرات بسیار ریز SSW به‌طور مؤثری ریزمنافذ باقی‌مانده از

محصولات هیدراسیون سیمان را پر کرده و در نتیجه باعث افزایش چگالی کلی و چسبندگی ماتریس خاک می‌شوند.

دوم، میزان سیلیکای (SiO_2) موجود در SSW با هیدروکسید کلسیم $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ آزادشده در حین هیدراسیون سیمان، واکنش‌های پوزولانی داده و منجر به تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) اضافی می‌گردد که پیوند میان‌ذره‌ای را تقویت می‌کند. علاوه بر این، SSW به دلیل خواص روان‌کنندگی، توزیع یکنواخت‌تر ذرات سیمان را در سراسر خاک تسهیل کرده و منجر به ایجاد مخلوطی سازگارتر و همگن‌تر می‌شود. این مکانیسم‌ها کاملاً با روندهای مشاهده‌شده در نتایج پیشین همسو هستند: نمونه‌هایی با حداکثر تراکم خشک (MDD) کمتر، مانند مخلوط حاوی ۸٪ سیمان و ۸٪ SSW با MDD برابر با ۱.۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) بالاتری را نشان دادند که حاکی از بهبود عملکرد ساختاری است. علاوه بر این، کاهش شاخص پلاستیسیته (PI) در اثر استفاده ترکیبی از سیمان و SSW، به ایجاد میکروساختاری پایدارتر و یکنواخت‌تر کمک می‌کند که برای توسعه پیوندهای قوی میان‌ذره‌ای مطلوب است.

با توجه به جدول ۱۳، می‌توان بهینه‌سازی مخلوط را بر اساس مقاومت و رفتار مکانیکی پیشنهاد داد.

بهره‌گیری از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در مخلوط‌های خاک تثبیت‌شده با سیمان، دوام بلندمدت آن‌ها را ارتقا می‌بخشد، چنان‌که افزایش چشمگیر مقاومت مشاهده‌شده بین روزهای ۲۸ و ۴۲، این مخلوط‌ها را برای کاربردهای مهندسی عمران که نیازمند دوام بالا هستند، بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، حضور SSW از طریق ترویج رفتار نیمه‌شکل‌پذیر، به بهبود مدیریت تغییر شکل کمک می‌کند و به مخلوط اجازه می‌دهد تا کرنش‌های بیشتری را بدون وقوع شکست ناگهانی تحمل کند. از منظر اقتصادی، مخلوط حاوی ۶٪ سیمان و ۶٪ SSW مقرون‌به‌صرفه بودن قابل‌توجهی را نشان می‌دهد، زیرا در مقایسه با مخلوط حاوی ۸٪ سیمان تنها، به مقاوتهی ۱۳.۷٪ بالاتر دست یافته است و بدین ترتیب، جایگزینی کاربردی و کارآمد برای تثبیت پایدار خاک ارائه می‌دهد.

۵-۴-۳. شاخص شکل‌پذیری نرمال‌شده (NDI)

سازه‌های ساخته شده از خاک و خاک بهبود یافته که ممکن است تحت بارهای سنگین یا نشست‌های تفاضلی قرار گیرند، باید نسبتاً انعطاف‌پذیر یا شکل‌پذیر باشند. بنابراین، مطالعه رفتار شکل‌پذیری خاک‌های تثبیت‌شده حائز اهمیت است. شاخص شکل‌پذیری نرمال‌شده (NDI) برای نمایش شکل‌پذیری خاک در

جدول ۱۴. مقادیر NDI نمونه های تثبیت شده با ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان و SSW در سنین مختلف عمل آوری

ترکیبات	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۴۲ روزه
soil	0.17	0.16	0.15	0.14
soil+2% cement	0.22	0.23	0.25	0.26
soil+4% cement	0.24	0.26	0.28	0.29
soil+6% cement	0.27	0.29	0.30	0.31
soil+8% cement	0.30	0.32	0.34	0.37
soil+2% cement+2% SSW	0.21	0.22	0.23	0.24
soil+4% cement+2% SSW	0.23	0.25	0.26	0.27
soil+6% cement+2% SSW	0.26	0.27	0.28	0.29
soil+8% cement+2% SSW	0.29	0.30	0.32	0.34
soil+2% cement+4% SSW	0.20	0.21	0.22	0.23
soil+4% cement+4% SSW	0.21	0.23	0.25	0.26
soil+6% cement+4% SSW	0.24	0.25	0.27	0.28
soil+8% cement+4% SSW	0.27	0.28	0.30	0.32
soil+2% cement+6% SSW	0.20	0.21	0.22	0.23
soil+4% cement+6% SSW	0.21	0.22	0.24	0.25
soil+6% cement+6% SSW	0.23	0.24	0.26	0.27
soil+8% cement+6% SSW	0.26	0.27	0.29	0.31
soil+2% cement+8% SSW	0.19	0.20	0.21	0.22
soil+4% cement+8% SSW	0.20	0.21	0.22	0.24
soil+6% cement+8% SSW	0.22	0.23	0.24	0.26
soil+8% cement+8% SSW	0.25	0.26	0.27	0.29

همان طور که در جدول ۱۴ ارائه شده است، مقادیر NDI با افزودن سیمان افزایش می یابد که نشان دهنده کاهش شکل پذیری و تمایل به رفتار ترد است. بالاترین مقادیر NDI در نمونه های حاوی ۸٪ سیمان مشاهده شد که پس از ۴۲ روز عمل آوری به ۰.۳۷ رسید، این امر منعکس کننده اثر سخت کنندگی شدید هیدراسیون سیمان است.

در مقابل، افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در مقایسه با مخلوط های حاوی سیمان تنها، مقدار NDI را کاهش داده و در نتیجه شکل پذیری را افزایش می دهد. برای مثال، مخلوط حاوی ۲٪ سیمان و ۸٪ SSW پس از ۷ روز، مقدار NDI برابر با ۰.۱۹ را نشان می دهد که به طور قابل توجهی کمتر از نمونه های حاوی سیمان تنها

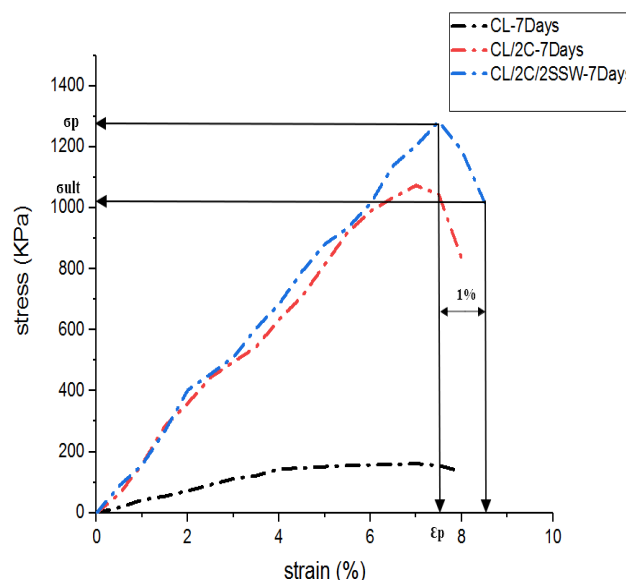
حین برش پیشنهاد شده است [4, 41]. NDI در رابطه ۱، به صورت نسبت افت مقاومت پس از نقطه پیک به مقدار تنش پیک تعریف شده است.

$$NDI = \frac{\sigma_p - \sigma_{ult}}{\sigma_p} \quad (1)$$

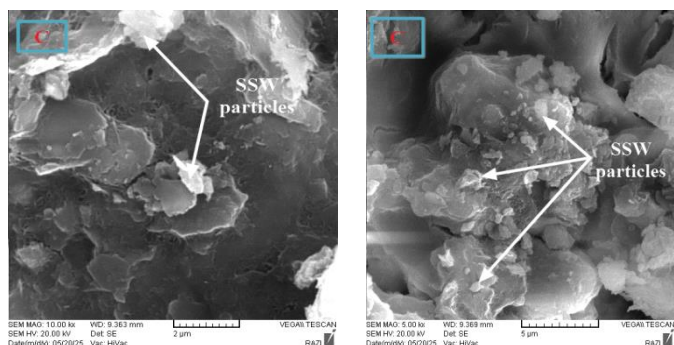
که در آن σ_p تنش شکست (یا حالت پیک) و σ_{ult} تنش نهایی (یا حالت باقی مانده) است.

مقدار NDI برابر با صفر، بیانگر رفتار کاملاً شکل پذیر است که در آن با افزایش کرنش، تغییری در تنش رخ نمی دهد (مقادیر پیک و نهایی یکسان هستند). در این پژوهش، به منظور یکنواختی، تنش نهایی در کرنشی معادل ۱٪ بیشتر از مقاومت پیک در نظر گرفته شده است. مقدار ۱٪ متناسب با حداقل کرنش ممکن پس از پیک برای خاک تثبیت نشده انتخاب شده است تا مقایسه UCS بین خاک های تثبیت شده و تثبیت نشده تسهیل گردد. شکل ۱۵ مقادیر تنش پیک و باقی مانده را به منظور محاسبه شاخص تردی نشان می دهد.

جدول ۱۴ مقادیر NDI را برای نمونه های تثبیت نشده و نمونه های تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان و SSW در زمان های مختلف عمل آوری به تصویر می کشد.



شکل ۱۵. تشریح پارامترها در منحنی های تنش-کرنش خاک تثبیت نشده و نمونه های تثبیت شده با مقادیر مختلف خاک، سیمان و SSW به منظور محاسبه NDI



شکل ۱۶. تصاویر میکروساختاری با بزرگ‌نمایی ۲ و ۵ میکرون از نمونه‌های (A) رس، (B) رس + ۸٪ سیمان، (C) رس + ۸٪ سیمان + ۸٪ SSW

تصویر خاک رس خالص، ساختاری بسیار متخلخل و ناهمگن را نشان می‌دهد که در آن هیچ پیوند مؤثری بین ذرات وجود ندارد. حضور منافذ متعدد و نبود فازهای پیوندی، بیانگر ضعف ذاتی خاک رس در ایجاد چسبندگی و مقاومت مکانیکی است.

با افزودن سیمان به خاک رس، تغییرات ساختاری محسوسی مشاهده شد. واکنش‌های هیدراسیون سیمان منجر به تشکیل فازهای ژلی مانند (C-S-H) گردید که به‌طور نسبتاً مناسب فضاهای خالی را پر کرده و پیوند نسبی میان ذرات خاک ایجاد کردند. اگرچه چسبندگی حاصله بهبود یافت، اما همچنان منافذ قابل توجهی در ساختار باقی ماند.

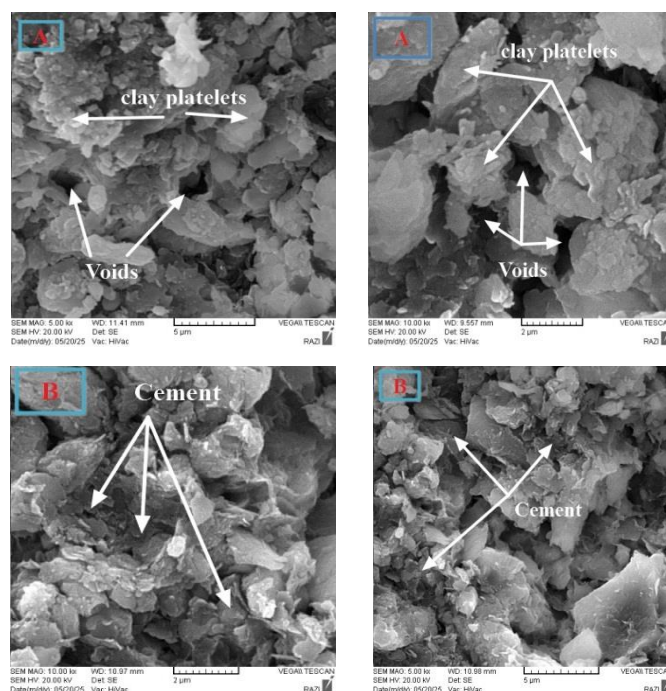
در مخلوط سوم، شامل خاک رس به‌همراه سیمان و پسماند سیلیکات سدیم، ساختاری بسیار متراکم و منسجم تر مشاهده شد. واکنش‌های پوزولانی ناشی از حضور سیلیکات سدیم، فازهای ژلی ثانویه‌ای تولید کردند که به‌طور مؤثری منافذ را پر نموده و منجر به ایجاد ساختاری نسبتاً پیوسته و یکنواخت گردید. کاهش چشمگیر تخلخل، بهبود پیوند میان ذرات و چسبندگی قابل توجه، این مخلوط را از نظر عملکرد میکروساختاری به بهترین گزینه تبدیل کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن هم‌زمان سیمان و پسماند سیلیکات سدیم به خاک رس، میکروساختار را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده و نواقص ذاتی خاک رس را کاهش می‌دهد و در نتیجه، پتانسیل بالایی برای ارتقای خواص مکانیکی و دوام بلندمدت خاک تثبیت شده فراهم می‌کند.

است و این موضوع نقش SSW را در بهبود ظرفیت تغییر شکل پس از نقطه پیک برجسته می‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقادیر NDI به‌طور کلی افزایش می‌یابند که گویای افزایش تردی به دلیل تداوم هیدراسیون سیمان در دوره‌های طولانی است. با این حال، حضور SSW این اثر را تعدیل کرده و شکل‌پذیری بالاتری را در مقایسه با تثبیت با سیمان خالص حفظ می‌کند. به‌طور کلی، داده‌ها تأیید می‌کنند که سیمان تمایل به کاهش شکل‌پذیری دارد، در حالی که SSW آن را بهبود می‌بخشد و تثبیت ترکیبی، تعادلی میان مقاومت و شکل‌پذیری ایجاد می‌کند.

۴-۷. تصاویر SEM

به منظور تحلیل دقیق تغییرات میکروساختاری و بررسی اثرات متقابل مواد تثبیت‌کننده بر بافت خاک رس، تصاویری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سه حالت مختلف تهیه و مورد واکاوی قرار گرفتند (شکل ۱۶).

این بررسی‌ها شامل تحلیل ساختار خاک رس در حالت خالص، ارزیابی تغییرات حاصل از ترکیب خاک رس و سیمان، و در نهایت بررسی اثرات هم‌افزای ترکیب خاک رس، سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر مورفولوژی و چیدمان ذرات خاک بود تا تأثیر هر یک از این افزودنی‌ها بر بهبود ساختار داخلی خاک به‌وضوح مشخص گردد.

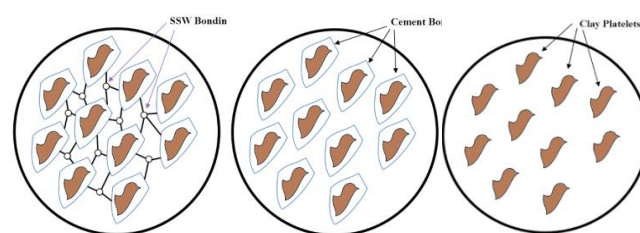


۱۴.۶ برابر بیشتر از خاک طبیعی تثبیت نشده و ۲۲٪ بیشتر از مقاومت حاصل از به کارگیری ۸٪ سیمان به تنهایی است. این ارتقا عمدتاً به واکنش های پوزولانی مؤثر میان کلسیم آزاد حاصل از هیدراسیون سیمان و ترکیبات واکنش پذیر سیلیکات و آلومینات در SSW نسبت داده می شود.

تحلیل های شیمیایی، نقش فازهای معدنی فعال نظیر آنالسیم، جومیلایت و آنورتیت را در SSW شناسایی کردند که در محیط قلیایی با Ca(OH)_2 واکنش داده و محصولات سیمانی اضافی مانند ژل های C-S-H و C-A-S-H تولید می کنند. این ژل ها باعث افزایش چسبندگی، دوام و یکپارچگی ساختاری خاک تثبیت شده می شوند. به طور موازی، رفتار مکانیکی نیز بهبود یافت و مخلوط های سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) تغییر حالتی از شکست ترد به نیمه شکل پذیر را نشان دادند. افت تنش پس از نقطه پیک کمتر ناگهانی شد و کرنش های شکست از حدود ۷٪ به ۹٪ افزایش یافت که نشان دهنده ظرفیت جذب انرژی و تحمل تغییر شکل بهتر است. یکی از مزایای عملی کلیدی این رویکرد، پتانسیل کاهش مصرف سیمان بدون افت عملکرد است. برای مثال، مخلوطی با ۶٪ سیمان و ۶٪ SSW به مقاومت UCS برابر با ۳۴۲۰ کیلوپاسکال دست یافت که عملکردی بهتر از مخلوط حاوی ۸٪ سیمان تنها (۳۰۰۸ کیلوپاسکال) داشت. این یافته، مقرون به صرفه بودن و مزایای زیست محیطی جایگزینی بخشی از سیمان با SSW را در کاربردهای تثبیت خاک تأیید می کند.

مشاهدات میکروسکوپی با استفاده از SEM نیز نتایج مقیاس کلان را تأیید کرد. تصاویر نشان دهنده کاهش تخلخل، توسعه ماتریس های متراکم و تقویت پیوند میان ذرات در اثر تشکیل ژل های سیمانی و اثر پرکنندگی ذرات ریز SSW بود. اجزای غیرواکنشی مانند کوارتز نیز به بهبود تراکم و کاهش نفوذپذیری کمک کرده و ساختار خاک را بیش از پیش تثبیت نمودند. در نهایت، مشخص شد که بهبودهای مشاهده شده در مقاومت با سایر شاخص های ژئوتکنیکی، از جمله کاهش شاخص پلاستیسیته (PI) و حداکثر تراکم خشک (MDD) همسو است که در مجموع، پایداری کلی و اثربخشی مخلوط های حاوی SSW را تأیید می کند.

شکل ۱۷ مدل مفهومی عملکرد سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در بافت خاک رسی و پیوند میان ذرات را نشان می دهد. در بخش (الف)، صفحات رس بدون افزودنی نمایش داده شده اند که در آن ذرات به صورت نسبتاً سست به هم متصل شده اند و مقاومت مکانیکی خاک محدود است. با افزودن سیمان، بخش (ب) تشکیل لایه های فاز ژلی را در اطراف ذرات رس نشان می دهد که باعث افزایش چسبندگی و پایداری ساختاری خاک می شود. در نهایت، بخش (ج) نشان می دهد که ذرات SSW این لایه های فاز ژلی را به یکدیگر متصل کرده و شبکه ای یکپارچه ایجاد می کنند که مقاومت خاک رسی را بیش از پیش افزایش داده و خواص مکانیکی آن را بهبود می بخشد. این مدل مفهومی به وضوح نقش مکمل سیمان و SSW را در تثبیت و بهبود ساختار خاک های رسی به تصویر می کشد.



شکل ۱۷. مدل مفهومی عملکرد SSW و سیمان در بافت خاک رسی و پیوند ذرات به یکدیگر

۵. نتیجه گیری

نتایج جامع به دست آمده از آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، تحلیل های شیمیایی و کانی شناسی و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، به طور جمعی عملکرد موفقیت آمیز استفاده ترکیبی از سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را در تثبیت خاک های رسی تأیید می کنند. هم افزایی میان واکنش های سیمانی و پوزولانی در این مخلوط ها منجر به بهبودهای مکانیکی و ساختاری قابل توجهی شد.

از بارزترین نتایج، افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بود، به ویژه در مخلوط حاوی ۸٪ سیمان و ۸٪ SSW که پس از ۴۲ روز عمل آوری به مقدار UCS برابر با ۳۶۴۹ کیلوپاسکال رسید. این مقدار تقریباً

- [3] Liu, C., et al., Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO₂. *Construction and Building Materials*, 2023. 409 :p. 133889.
- [4] Yousefi, A., H. Jahanian, and M. Azadi, Effect of adding cement and nanocement on mechanical properties of clayey soil. *The European Physical Journal Plus*, 2020. 135(8): p. 649.
- [5] Ullah, A., D. Boumezerane, and F. Ahmad, Subgrade improvement with mixed lime and cement as additives. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [6] Pandey, A. and A. Rabbani, Soil stabilisation using cement. *International journal of civil engineering and technology*, 2017. 8(6): p. 316-322.
- [7] Elmanay, A.S., H.E. Fouad, and Y.G. Youssef, Improvement of swelling chlorite soil using sodium silicate alkali activator. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021. 12(2): p. 1535-1544.
- [8] Wasse, T.A. and G. Demir, A review on stabilization of soft soils with geopolymerization of industrial wastes. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 2023. 13(2): p.
- [9] Beygi, L. and J. Khazaei, Soft clay eco-friendly improvement by ground granulated blast furnace slag and quicklime. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024. 42(3): p. 2061
- [10] Sadegh, G.J., Hamid, J.B., & Fereydoun, M.N. (2020). A laboratory study comparing the stabilization of kaolinite clay using cement and cement kiln dust.
- [11] Soomro, M., V.W. Tam, and A.C.J. Evangelista, Production of cement and its environmental impact, in *Recycled Concrete*. 2023, Elsevier. p. 11-46.
- [12] Ma, C., et al., Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay. *Soils and Foundations*, 2015. 55(5): p. 1222-1232.
- [13] Li, W., et al., Treating sulfate-bearing soil by using sodium silicate and NaOH-activated ground granulated blast-furnace slag. *Acta Geotechnica*, 2024. 19(5): p. 3129-3138.
- [14] Zhang, Z., et al., Effects of metakaolin and sodium silicate treatment on highwater content dredged clay for improved construction fill performance. *Construction and Building Materials*, 2024. 411: p. 134196
- [15] Kulanthavel, P., et al., Strength enhancement of clay soil stabilized with ordinary portland cement, sodium silicate and sodium hydroxide. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2023. 16(5): p. 1297
- [16] Abdel-Gawwad, H.A., et al., Sustainable utilization of sodium silicate-based lead glass sludge as an alkali-activator for alkali-activated slag:

نتایج نشان داد که تثبیت با سیمان به طور قابل توجهی شاخص شکل پذیری نرمال شده (NDI) را افزایش می دهد که منعکس کننده کاهش شکل پذیری و افزایش تردی با گذشت زمان عمل آوری است. در مقابل، افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، مقادیر NDI را کاهش داده و ظرفیت تغییر شکل پس از پیک را بهبود بخشید. به طور کلی، استفاده ترکیبی از سیمان و SSW تعادلی بهینه میان افزایش مقاومت و بهبود شکل پذیری در خاک های رسی ایجاد کرد. در مجموع، یافته های این پژوهش به وضوح نشان می دهد که به کارگیری هم افزای سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، یک متدولوژی بهینه و جامع است که موفق می شود تعادلی ایده آل میان پذیرفتگی فنی، توجیه اقتصادی و پایداری زیست محیطی در فرآیند تثبیت خاک های رسی متورم برقرار سازد.

این استراتژی نه تنها منجر به بهبود چشمگیر پارامترهای مکانیکی—از جمله افزایش مقاومت فشاری و ارتقای پایداری بلندمدت در برابر عوامل محیطی—می شود، بلکه با تعدیل رفتار ترد سیمان و ایجاد خاصیت نیمه شکل پذیری در ماتریس خاک، ظرفیت تحمل تغییر شکل و جذب انرژی را به طور محسوسی افزایش می دهد. علاوه بر این، جایگزینی بخشی از سیمان با پسماندهای صنعتی، علاوه بر کاهش هزینه های اجرایی، اثرات مخرب تولید سیمان بر محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش داده و با ترویج مفهوم اقتصاد چرخشی (Circular Economy) از طریق بازگرداندن مواد جانبی صنعتی به چرخه تولید، گامی مؤثر و راهبردی در راستای تحقق اهداف مهندسی سبز برمی دارد. از این رو، این رویکرد نه تنها یک جایگزین فنی کارآمد، بلکه یک الگوی نوین و پایدار است که پتانسیل بالایی برای به کارگیری در مقیاس وسیع در پروژه های زیرساختی، جاده سازی و بهسازی خاک در آینده مهندسی ژئوتکنیک و عمران دارد.

References

- [1] Bouras, F., et al., Geotechnical behavior and physico-chemical changes of lime-treated and cement-treated silty soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022. 40(4): p. 2033-2049.
- [2] Min, Y., et al., On the use of one-part geopolymer activated by solid sodium silicate in soft clay stabilization. *Construction and Building Materials*, 2023. 402: p. 132957.

- [30] Kazemian, S., et al., Effects of cement–sodium silicate system grout on tropical organic soils. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012. 37(8): p. 2137-2148.
- [31] Latifi, N., A. Eisazadeh, and A. Marto, Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate-based liquid stabilizer. *Environmental earth sciences*, 2014. 72(1): p. 91
- [32] Nazar, R.S., M.D. Ahmed, and A.L. Al-Obaidi, Assessment of bearing capacity and settlement characteristics of soft soils reinforced by crushed concrete and sodium silicate columns. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 61: p. 781-785.
- [33] Ponomar, V., T. Luukkonen, and J. Yliniemi, Revisiting alkali-activated and sodium silicate-based materials in the early works of Glukhovskiy. *Construction and Building Materials*, 2023. 398: p. 132474.
- [34] Hurley, C.H. and T.H. Thornburn, Sodium silicate stabilization of soils: A review of the literature. 1971.
- [35] Selvakumar, S., P. Kulanthaivel, and B. Soundara, Influence of nano-silica and sodium silicate on the strength characteristics of clay soil. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2021. 6(3): p. 46.
- [36] ASTM D02-854. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [37] ASTM, 2010. D4318-10: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi>, pp. D4318-10e1.
- [38] ASTM, 2007. D422-63 :Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi>, pp. D422-63e2.
- [39] ASTM D00-698a. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [40] ASTM, 2016. D2166-16: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi>, pp. D2166D2166M-16.
- [41] Bordoloi, S., et al., Measurement of mechanical characteristics of fiber from a novel invasive weed: A comprehensive comparison with fibers from agricultural crops. *Measurement*, 2018. 113: p. 62-70.
- Performance, characterization, and Pb-stabilization. *Construction and Building Materials*, 2024. 434: p. 136681.
- [17] Vakili, M.V., et al., Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*, 2016. 124: p. 243-251.
- [18] Koohestani, B., et al., Geopolymerization of soil by sodium silicate as an approach to control wind erosion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021. 18: p. 1837-1848.
- [19] Yu, W., et al., Research on strength and deformation properties of high moisture soft soils stabilized by GGBS, cement, fly ash, and sodium silicate. *Construction and Building Materials*, 2024. 4448: p. 138244.
- [20] Kocak, Y., E. Tascı, and U. Kaya, The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, 2013. 47: p. 720-727.
- [21] Turkoz, M. and P. Vural, The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2013. 20(4): p. 395-405.
- [22] Jahromi, G., et al. (2023). Effect of zeolite and cement additives on the mechanical behavior and dispersion index of clayey soil. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(8), 1645-1660.
- [23] Kordnaeij, A., R.Z. Moayed, and M. Soleimani, Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement. *Soils and Foundations*, 2019. 59(4): p. 905-919.
- [۲۴] Shinde, B., et al., Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. *Progress in Engineering Science*, 2024.
- [25] Roshan, M.J. and A.S.B.A. Rashid, Geotechnical characteristics of cement stabilized soils from various aspects: A comprehensive review. *Arabian Journal of Geosciences*, 2024.
- [26] Nigussie, E. and A. Dinku, Evaluation of sodium silicate and its combination with cement/lime for soil stabilization. *Civil Engineering, Addis Ababa University School Of Graduate Studies*, 2011.
- [27] Moayed, H., et al., Effect of sodium silicate on unconfined compressive strength of soft clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2011. 16: p. 289-295.
- [28] Gacambi Kiuna, V. and Z. Kaya, Effect of sodium silicate and cement on the improvement of engineering properties of organic soil. *Revista de la construcción*, 2023. 22(3): p. 632-645.
- [29] Cui, H., et al., Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. *Construction and Building Materials*, 2018. 189: p. 286-295.