



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

Mohammad Mahdi Jalilvand<sup>1</sup> , Homayoun Jahanian<sup>2✉</sup> , Mohammad Azadi<sup>3</sup> 

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

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

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

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

##### Received

2026-05-22

##### Received in revised form

2026-06-18

##### Accepted

2026-06-29

##### Available online

2026-07-01

#### 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(1),189-212 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 CO<sub>2</sub> 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 15 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 ریزساختاری خاک رسی تثبیت شده با سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW)

محمد مهدی جلیوند<sup>۱</sup>، همایون جهانیان<sup>۲</sup>✉، محمد آزادی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: [m.jalilvand@iau.ir](mailto: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](mailto:homayounjahanian@iau.ac.ir)

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

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تثبیت شیمیایی روشی گسترده برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های رسی است. تثبیت کننده‌های 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 ریزساختاری 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؛ به طوری که 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 تثبیت نشده 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 زل‌های 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.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۰۴/۱۰

کلیدواژه‌ها:

تثبیت خاک،

خاک رسی،

پسماند سیلیکات سدیم،

سیمان،

واکنش پوزولانی

استناد: جلیوند، محمد مهدی؛ جهانیان، همایون؛ آزادی، محمد. (۱۴۰۵). عملکرد مکانیکی و ریزساختاری خاک رسی تثبیت شده با سیمان و پسماند

سیلیکات سدیم (SSW). *مجله مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۱)، ۱۸۹-۲۱۲.

DOI:10.22126/amcen.2026.14016.1091



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

## ۱. مقدمه

خاک‌های رسی، به‌ویژه نمونه‌هایی با پلاستیسیته بالا و حساسیت زیاد به رطوبت، به دلیل ظرفیت باربری پایین، تراکم‌پذیری زیاد و رفتار چالش‌برانگیز انقباضی، دشواری‌های قابل توجهی را در مهندسی ژئوتکنیک و عمران ایجاد می‌کنند؛ امری که اغلب منجر به ناپایداری زمین و تغییر شکل در پروژه‌های ساخت‌وساز می‌گردد [۱-۲]. بهبود خواص این خاک‌ها امری حیاتی است، به‌ویژه از آنجا که خاک‌های رسی نرم به‌طور گسترده در بسیاری از سایت‌های مهندسی مشاهده می‌شوند که باعث ایجاد خسارات سازه‌ای و افزایش هزینه‌های نگهداری می‌گردند. روش‌های متداول تثبیت شیمیایی عمدتاً بر پایه استفاده از آهک و سیمان پرتلند معمولی (OPC) استوار هستند؛ این مواد از طریق واکنش‌های هیدراسیون و تشکیل ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدرات (C-S-H)، خواص مکانیکی خاک از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت برشی و سختی را بهبود می‌بخشند [۳-۷]. تثبیت خاک به‌طور مؤثری دوام خاک را افزایش می‌دهد و از میزان پلاستیسیته آن می‌کاهد. با این حال، صنعت سیمان یکی از عوامل اصلی آلودگی زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود و به دلیل فرایند تولید انرژی‌بر خود، حدود ۸٪ از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) را به خود اختصاص می‌دهد [۸-۱۳].

این نگرانی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های بالای تولید مرتبط با آن، انگیزه‌ای برای جست‌وجوی عوامل تثبیت‌کننده‌ی جایگزین و پایدار ایجاد کرده است. در سال‌های اخیر، تثبیت‌کننده‌های مبتنی بر سیلیکات سدیم به‌عنوان افزودنی‌های امیدبخش، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. سیلیکات سدیم (SS) به‌عنوان یک فعال‌ساز قلیایی عمل می‌کند که باعث پیشبرد واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل‌های سیلیسی می‌شود؛ این امر پیوند بین ذرات خاک را تقویت کرده و تغییر شکل‌پذیری و پتانسیل فرسایش خاک را کاهش می‌دهد [۱۲-۱۸]. سیلیکات سدیم همچنین با مصرف یون‌های کلسیم آزاد برای تشکیل ژل (C-S-H)، از تشکیل کانی‌های انبساطی مانند اترینگایت در خاک‌های حاوی سولفات جلوگیری کرده و در نتیجه مانع از بروز آسیب‌های ناشی از تورم می‌شود [۱۳]. با وجود این مزایا، تولید تجاری سیلیکات سدیم به انرژی قابل توجهی نیاز دارد

و منجر به انتشار گاز CO<sub>2</sub> می‌شود که این امر پایداری آن را محدود می‌کند [۱۶].

بنابراین، استفاده از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) که محصول جانبی تولید صنعتی سیلیکات سدیم است، به‌عنوان جایگزینی دوستدار محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای سیلیکات سدیم (SS) خالص پیشنهاد شده است [19-25]. پسماند سیلیکات سدیم (SSW) حاوی چندین فاز پوزولانی از جمله زئولیت‌ها (آنالسیم، جوملینکایت)، آنورتیت و کلسیت است که با ترکیبات سیمانی واکنش داده و ژل‌های ثانویه (C-S-H) و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهند؛ این فرآیند باعث بهبود رفتار مکانیکی خاک‌های تثبیت‌شده و در عین حال کاهش مصرف سیمان می‌شود [20-23]. استفاده از SSW نه تنها باعث ارزش‌افزایی پسماندها و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌شود، بلکه با به حداقل رساندن اتکا به سیمان پرتلند معمولی (OPC)، از روش‌های ساخت‌وساز پایدار حمایت می‌کند.

بررسی‌های تجربی، اثرات مفید ترکیب سیمان، سیلیکات سدیم و محصولات جانبی صنعتی را در تثبیت خاک نشان داده‌اند. برای نمونه، مطالعات "چن و همکاران ۲۰۱۵" نشان می‌دهد که مخلوط‌های حاوی سیمان، سیلیکات سدیم و افزودنی‌های تقویت‌کننده، در مقایسه با تثبیت تنها با سیمان، مقاومت فشاری تک‌محوری را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند [۱۲]. به همین ترتیب، "وکیلی و همکاران ۲۰۱۶" گزارش کردند که مخلوط‌های بهینه‌شده از سیمان، سیلیکات سدیم و سرباره، مقاومت برشی و پایداری خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند و در این فرایند، مدت‌زمان عمل‌آوری نقشی حیاتی در توسعه مقاومت ایفا می‌کند [۱۷]. علاوه بر این، "یو و همکاران ۲۰۱۳" یک تثبیت‌کننده‌ی نوین را معرفی کردند که ترکیبی از سرباره‌ی دانه‌بندی‌شده‌ی کوره بلند (GGBS)، سیمان، خاکستر بادی و سیلیکات سدیم است؛ نتایج این مطالعه نشان‌دهنده‌ی بهبود مقاومت و کنترل تغییر شکل در خاک‌های نرم با درصد رطوبت بالا، در کنار کاهش نیاز به سیمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌باشد [۲۰].

می‌آورد. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، بلکه با کاهش وابستگی به سیمان، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی را در راستای مدیریت پسماندهای صنعتی به همراه دارد. در واقع، فعالیت پوزولانی SSW می‌تواند واکنش‌های شیمیایی در خاک را تسریع کرده، تشکیل فازهای سیمانمانند (C-S-H) را تقویت نماید و در نهایت منجر به بهبود چشمگیر عملکرد مکانیکی، افزایش استحکام و ارتقای دوام خاک‌های تثبیت‌شده در برابر عوامل محیطی گردد.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل دقیق‌تر این اثرات، به بررسی میزان اثربخشی SSW به‌عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان پرتلند تیپ ۲ در فرآیند تثبیت خاک رسی تحت شرایط عمل‌آوری کنترل‌شده می‌پردازد. هدف غایی این مطالعه، ارتقای شاخص‌های کلیدی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، کاهش حد پلاستیسیته و بهبود رفتار تراکمی خاک است، در حالی که هم‌زمان تلاش می‌شود ردپای کربنی و اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از تولید انبوه سیمان به حداقل برسد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر استفاده از سیمان خالص یا سیلیکات سدیم تجاری و گران‌قیمت متمرکز بودند، این پژوهش بر کاربرد عملی SSW صنعتی تأکید ورزیده و دیدگاه‌های نوینی را در زمینه استراتژی‌های تثبیت مقرون‌به‌صرفه و دوستدار محیط‌زیست ارائه می‌دهد. برای دستیابی به درکی جامع، این مطالعه با ترکیب آزمایش‌های مکانیکی دقیق و تحلیل‌های پیشرفته ریزساختاری، از جمله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مکانیسم‌های زمینه‌ای بهبود ساختار خاک را تبیین کرده و در نهایت، روش‌های پایدار را که هم‌سو با اصول ژئوتکنیک سبز هستند، ترویج و معرفی می‌کند.

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 می‌دهد که این امر منجر به ایجاد خاک‌هایی بادوام‌تر و مقاوم‌تر می‌شود [26-28]. با این حال، سیلیکات سدیم به‌تنهایی ممکن است برای تثبیت خاک‌های رسی انبساطی، به‌ویژه به دلیل حلالیت بالای آن در محیط‌های اشباع و احتمال شسته‌شدن 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 می‌شود از این ماده به‌صورت هم‌افزا و در ترکیب با افزودنی‌های سخت‌کننده مانند سیمان یا آهک استفاده شود تا واکنش‌های شیمیایی تکمیلی و تشکیل پیوندهای مستحکم‌تر در ساختار خاک حاصل گردد [۲۷].

علاوه بر این، فعالیت پوزولانی ژئولیت‌های موجود در SSW از طریق اصلاح کانی‌شناسی خاک و بهبود پیوند بین ذرات، به کاهش پتانسیل تورم خاک و افزایش مقاومت مکانیکی آن کمک می‌کند [۲۱-۲۳]. جهرمی و همکاران تأکید کردند که ترکیبات ژئولیت-سیمان، جایگزین‌هایی دوستدار محیط‌زیست برای سیمان هستند که ضمن افزایش مقاومت خاک و کاهش شاخص‌های پراکندگی در خاک‌های رسی، اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند [۲۲].

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

پژوهش‌های گسترده و نظام‌مندی در سال‌های اخیر بر بررسی مکانیسم‌های تثبیت خاک‌های رسی با بهره‌گیری از ترکیبات سیمانی و سیلیکات سدیم متمرکز شده‌اند تا راهکارهای بهینه‌ای برای بهبود ویژگی‌های مهندسی این خاک‌ها بیابند؛ خلاصه‌ای جامع از این مطالعات پیشین و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این میان، استفاده از پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به‌عنوان یک راهبرد نوین، با ایجاد ارزش‌افزایی 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 خاک‌های 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 ارگانیک	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 <sup>2</sup> /gr)	3081
Retained on Sieve # 170 (90 μm)	5.7
منبسط شدگی اتوکلاوی	0.21
غلظت نرمال	23
(Vicat Test, minutes) زمان گیرش اولیه	153
(Vicat Test, minutes) زمان گیرش نهایی	212
مقاومت فشاری (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
۷ روزه	333
۲۸ روزه	492

## ۲. مواد

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

تولید سیلیکات سدیم عموماً بر اساس نسبت مولی  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  تنظیم می‌شود و فرمولاسیون‌های صنعتی معمولاً در محدوده ۲۰ تا ۳۰ 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 "ژانوزانگ 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.

شرح	درصد	شرح	درصد
CaO.f	0.82	$\text{SiO}_2$	20.79
Cl	-	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.76
LOI	1.88	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.86
I.R	0.51	CaO	62.28
$\text{C}_3\text{S}$	52.67	MgO	3.22
$\text{C}_2\text{S}$	19.89	$\text{SO}_3$	1.89
$\text{C}_3\text{A}$	6.09	$\text{Na}_2\text{O}$	0.37
$\text{C}_4\text{AF}$	11.74	$\text{K}_2\text{O}$	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 ( $\text{SiO}_2$ ) و کربنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) حاصل می‌گردد. سیلیکات سدیم به‌عنوان یک ماده معدنی، پلیمری و شدیداً قلیایی مشتق شده از سیلیس، کاربردهای گسترده‌ای در بخش‌های مختلف صنعتی دارد. کاربردهای اصلی آن شامل استفاده به‌عنوان پیش‌ماده در تولید چسب‌ها، سیمان‌ها، خمیر کاغذ، شوینده‌ها و صابون‌ها و همچنین به‌عنوان 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 به‌دست می‌آید. در این مرحله، پسماند سیلیکات سدیم که شامل باقی‌مانده‌های حل‌نشده و ناخالصی‌های باقی‌مانده است، در سیستم فیلتراسیون باقی می‌ماند. سپس محلول تصفیه‌شده به مخازن ذخیره‌سازی بزرگی (شکل ۱) منتقل شده و در شرایط کنترل‌شده تا زمان استفاده ذخیره می‌شود. با گذشت زمان، ذرات سنگین‌تری که به‌طور 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)

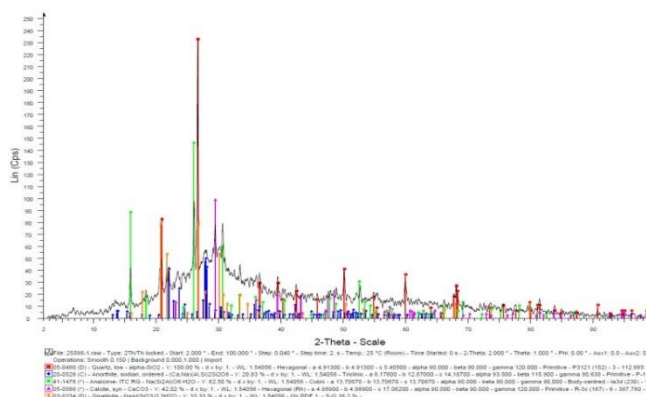
ترکیب شیمیایی	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L.O.I
درصد وزنی (%)	0.86	5.19	64.41	13.97	0.84	5.38	0.28	1.57	7.5

با توجه به نتایج تحلیل XRF، نمونه خاک دارای درصد بالایی از سیلیس: SiO<sub>2</sub> (۴۴.۴۱٪) و آلومینا: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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 تثبیت‌کننده 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 به‌کاررفته 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 بوین‌زهرا (شهر شال) در استان قزوین جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. به‌منظور 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L.O.I
درصد وزنی (%)	4.26	13.14	44.41	0.7	2.01	15.17	0.75	4.96	14.6

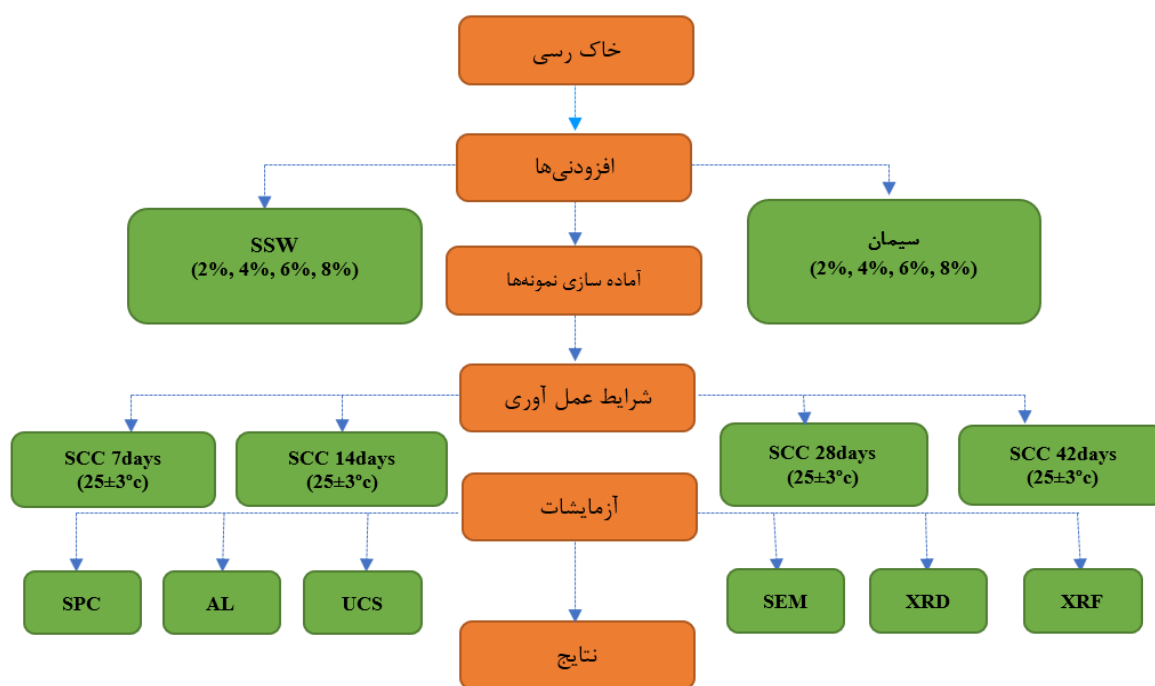
جدول ۶. خواص فیزیکی خاک رس

مقدار	خواص فیزیکی
۲/۶۱	(Gs) وزن مخصوص
۴/۳۰	(%) درصد رطوبت طبیعی
۴۱/۴۰	(%) حد روانی
۲۵/۳۰	(%) حد خمیری
۱۶/۱۰	(%) شاخص خمیری
۱/۶۵	(gr/cm <sup>3</sup> ) 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 به‌کارگیری 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 آماده‌شده بلافاصله از قالب خارج شده و وزن و ابعاد آن‌ها به‌طور دقیق ثبت گردید. برای جلوگیری از اتلاف رطوبت، نمونه‌ها در چندین لایه سلفون پیچیده شده و تا زمان انجام آزمایش در شرایط کنترل‌شده 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 تثبیت‌شده 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

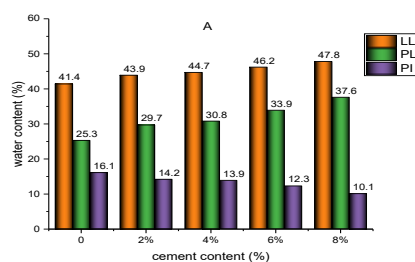
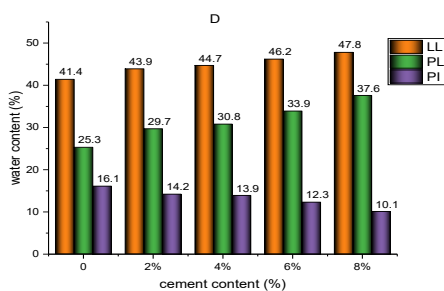
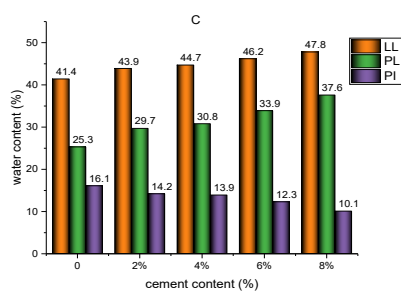
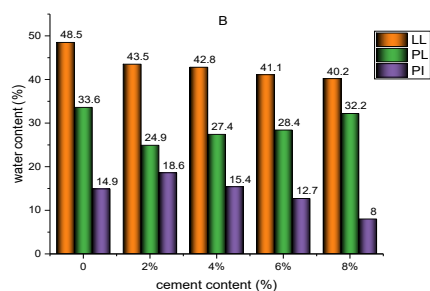
ترکیبات	اختصار	ترکیبات	اختصار
soil+4% cement+4% SSW	CL/4C/4SSW	Clay Soil	CL
soil+6% cement+4% SSW	CL/6C/4SSW	Soil+2% cement	CL/2C
soil+8% cement+4% SSW	CL/8C/4SSW	soil+4% cement	CL/4C
soil+2% cement+6% SSW	CL/2C/6SSW	soil+6% cement	CL/6C
soil+4% cement+6% SSW	CL/4C/6SSW	soil+8% cement	CL/8C
soil+6% cement+6%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

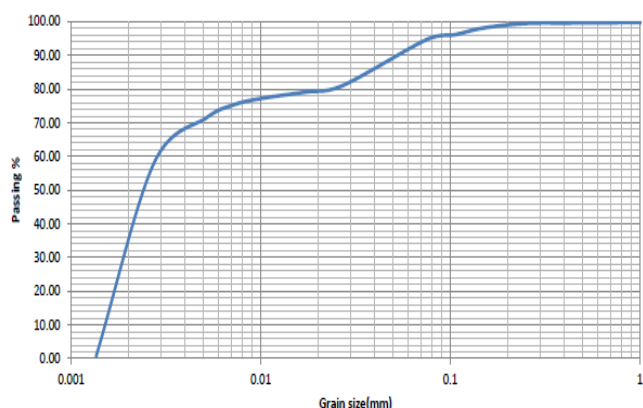
به منظور بررسی ویژگی‌های پلاستیسیته، آزمایش‌های تعیین حد روانی و حد پلاستیک بر مبنای وزن خشک خاک، در سه تکرار مجزا بر روی نمونه‌های مختلف صورت گرفت؛ این نمونه‌ها شامل خاک رسی خالص (بدون افزودنی)، نمونه‌های حاوی پسماند سیلیکات سدیم و همچنین ترکیباتی متشکل از خاک رسی به همراه سیمان و پسماند سیلیکات سدیم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

#### ۲-۴. توزیع اندازه ذرات خاک

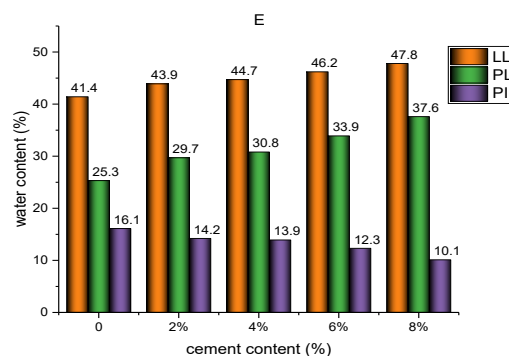
جهت به‌دست آوردن منحنی توزیع دانه‌بندی خاک، با توجه به اینکه ۹۴.۶۷٪ خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرد، آزمایش هیدرومتر مطابق با استاندارد ASTM D-422 انجام شد [۳۸]. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ۹۴.۶۷٪ از ذرات خاک کوچک‌تر از ۰.۰۷۵ میلی‌متر هستند که این امر منجر به طبقه‌بندی این خاک در دسته خاک‌های ریزدانه می‌شود.



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.

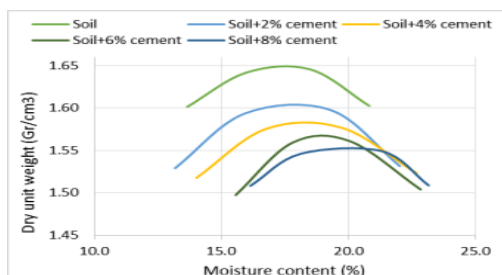


شکل ۴. اثر سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) بر حدود اتربرگ؛ A) سیمان، B) سیمان + ۲٪ SSW، C) سیمان + ۴٪ SSW، D) سیمان + ۶٪ SSW، E) سیمان + ۸٪ SSW

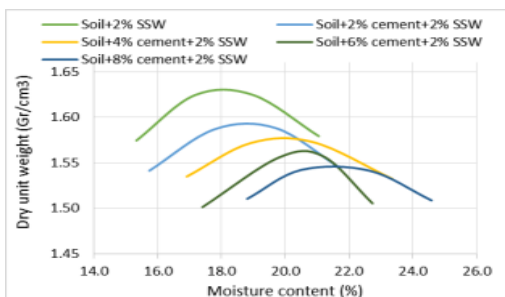
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها (شکل ۴)، افزودن سیمان در محدوده ۰ تا ۸ درصد منجر به تغییرات قابل‌توجهی در حدود اتربرگ خاک شده است. به‌طور خاص، با افزایش مقدار سیمان، این تغییرات برجسته‌تر می‌شوند.

نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین همسو است؛ بسیاری از این پژوهش‌ها نیز گزارش کرده‌اند که افزودن سیمان به‌طور قابل‌توجهی بر حدود اتربرگ خاک‌های رسی تأثیر گذاشته و باعث کاهش آن‌ها می‌شود [۱۵، ۲۴، ۲۵].

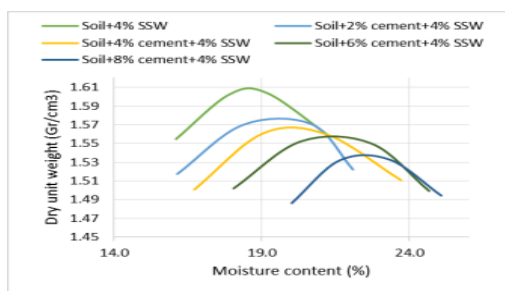
با توجه به نتایج ارائه‌شده، استفاده ترکیبی از سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) تأثیر بسزایی در بهبود خواص خاک رسی، به‌ویژه حدود اتربرگ آن دارد. داده‌ها نشان‌دهنده کاهش مستمر شاخص پلاستیسیته (PI) با افزایش درصد سیمان و SSW است. به‌طور مشخص، مقدار PI از مقدار اولیه ۱۶.۱٪ در خاک تثبیت نشده به ۶.۴٪ در مخلوط 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 منعکس‌کننده اصلاحات در حساسیت آبی و ویژگی‌های پلاستیک خاک است. کاهش مستمر شاخص پلاستیسیته (PI) با افزودن SSW نشان می‌دهد که این محصول جانبی صنعتی، به دلیل ماهیت پوزولانی، به‌صورت هم‌افزا با سیمان واکنش داده و ترکیبات سیمانی ثانویه‌ای نظیر کلسیم سیلیکات



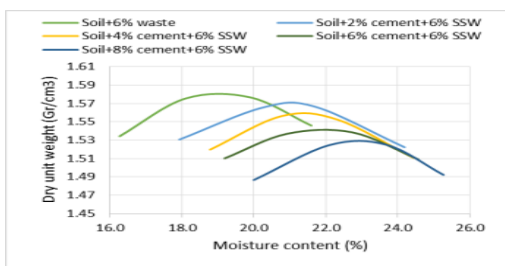
A



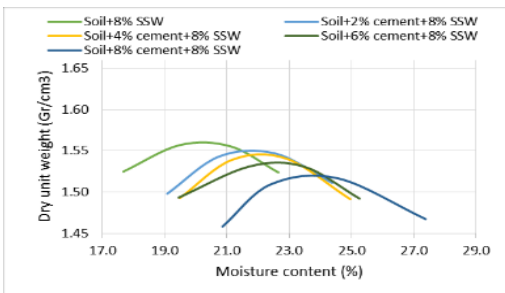
B



C



D



E



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.

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).

جدول ۹. ترکیب بهینه از نظر عملکرد و بهره‌وری هزینه

ترکیبات	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	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)

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

افزودن SSW به سیمان نه‌تنها 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).

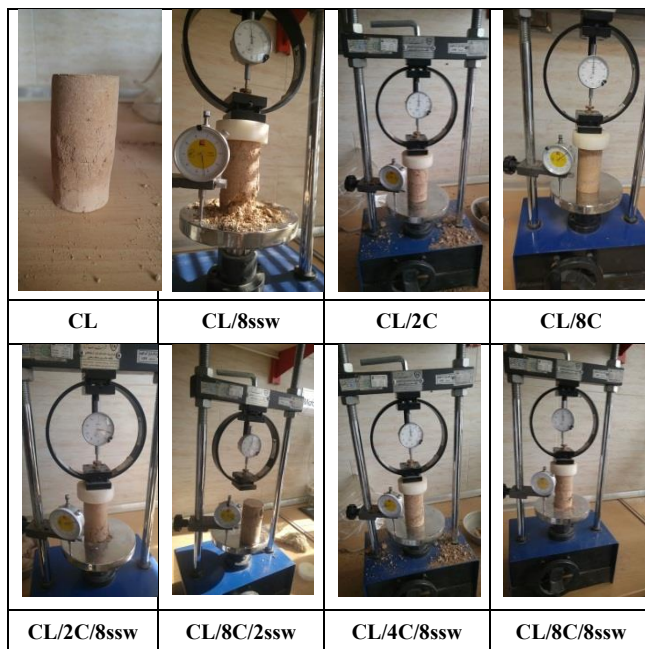
افزودنی کارآمد، اقتصادی و پایدار در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک برجسته کرده و امکان جایگزینی یا تکمیل مواد سنتی تثبیت کننده را فراهم می‌سازد.

همان‌طور که در جدول ۱۰ ارائه شده است، مقادیر UCS در مقایسه با خاک رس تثبیت نشده، با افزودن سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW) به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در حالی که سیمان به‌تنهایی بهبود چشمگیری در مقاومت ایجاد می‌کند، استفاده ترکیبی از سیمان و SSW منجر به دستیابی به مقادیر حتی بالاتری می‌شود، به‌ویژه در نسبت‌های اختلاط متوسط. حداکثر مقدار UCS برابر با ۳۶۴۸.۹۴ کیلوپاسکال برای مخلوط CL/8C/8SSW به دست آمده است که نشان دهنده اثر هم‌افزایی قوی میان سیمان و SSW است. این نتایج اثبات می‌کند که روش تثبیت ترکیبی، به‌ویژه در شرایط عمل‌آوری بلندمدت، مؤثرتر از استفاده از سیمان به‌تنهایی است.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش UCS پس از ۴۲ روز عمل‌آوری

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 کننده‌های به‌کاررفته، تفاوت‌های آشکاری را در نحوه گسترش ترک‌ها و الگوهای تغییر شکل نشان می‌دهند.

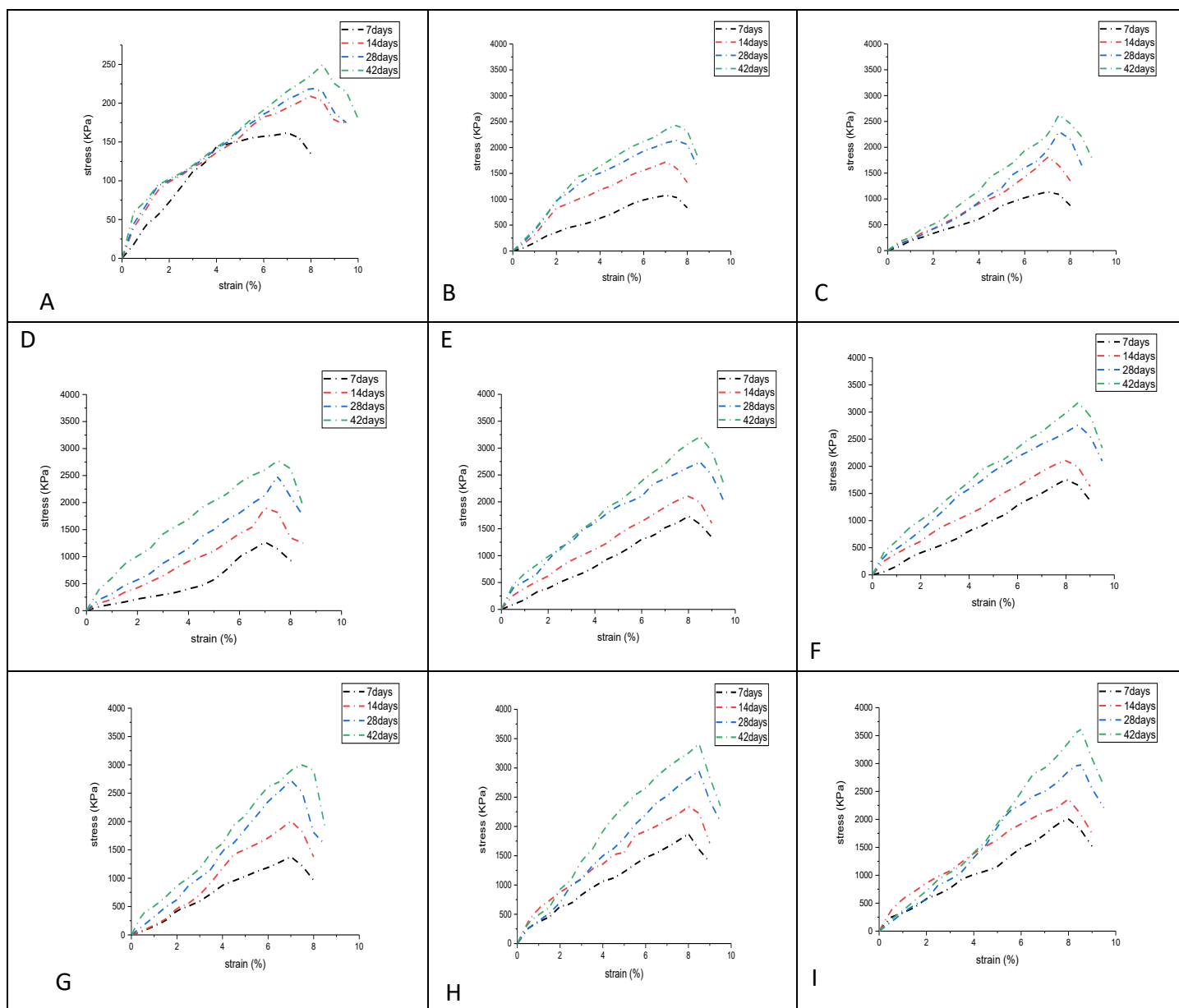


شکل ۹. تصویر نمونه‌ها پس از شکست

افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۴۲ روز منجر به بهبود محسوس عملکرد مکانیکی تمامی مخلوط‌های آزمایش شده گردید.

به‌طور مشخص، با طولانی‌تر شدن دوره‌های عمل‌آوری، افزایش تدریجی در مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مشاهده گردید که نشان‌دهنده تداوم توسعه مواد سیمانی و پوزولانی در ماتریس خاک تثبیت شده است. علاوه بر این، سختی نمونه‌ها که با شیب منحنی تنش-کرنش بیان می‌شود نیز با پیشرفت عمل‌آوری افزایش یافت که منعکس کننده ارتقای مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل تحت بارگذاری است. این روندها که در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده‌اند، اثر مفید افزایش زمان عمل‌آوری را بر هر دو ویژگی مقاومت و سختی سیستم‌های خاک تثبیت شده تأیید می‌کنند.

علاوه بر این، روند صعودی و افزایش مستمر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) متناسب با افزایش میزان SSW، گویای آن است که این ماده نه تنها نقش مؤثری در ارتقای مقاومت مکانیکی خاک ایفا می‌کند، بلکه موجب بهبود دوام و پایداری ساختاری خاک تثبیت شده در برابر عوامل محیطی می‌گردد. این یافته‌های تجربی، پتانسیل بالای پسماند سیلیکات سدیم (SSW) را به‌عنوان یک



شکل ۱۰. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده 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 + ۶٪ SSW)، (F خاک + ۶٪ سیمان + ۸٪ SSW)، (G خاک + ۸٪ سیمان)، (H خاک + ۸٪ سیمان + ۶٪ SSW)، (I خاک + ۸٪ سیمان + ۸٪ SSW)

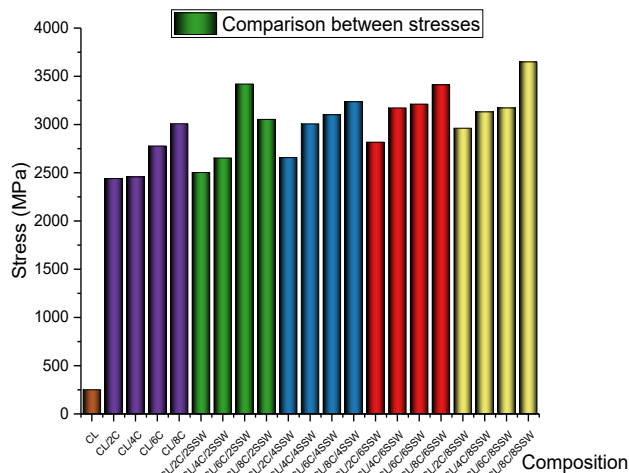
نشان می‌دهند. تا روزهای ۲۸ و ۴۲ (شکل‌های ۱۳ و ۱۴)، افزایش مقاومت برجسته‌تر شده و مخلوط‌هایی نظیر  $CL/6C/2SSW$ ،  $CL/8C/6SSW$  و  $CL/8C/8SSW$  به بالاترین مقادیر تنش دست یافته‌اند.

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،

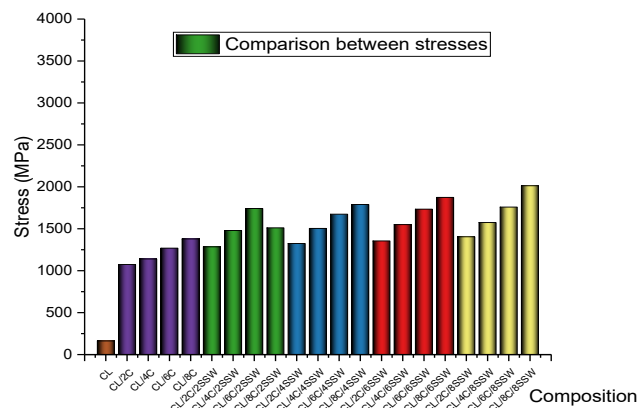
همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است، مقادیر تنش نمونه‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری به‌طور تدریجی افزایش می‌یابد که این امر تأییدی بر هیدراسیون مستمر سیمان و واکنش‌های پوزولانی پسماند سیلیکات سدیم (SSW) است.

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

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



شکل ۱۴. مقایسه تنش‌ها پس از ۴۲ روز عمل‌آوری



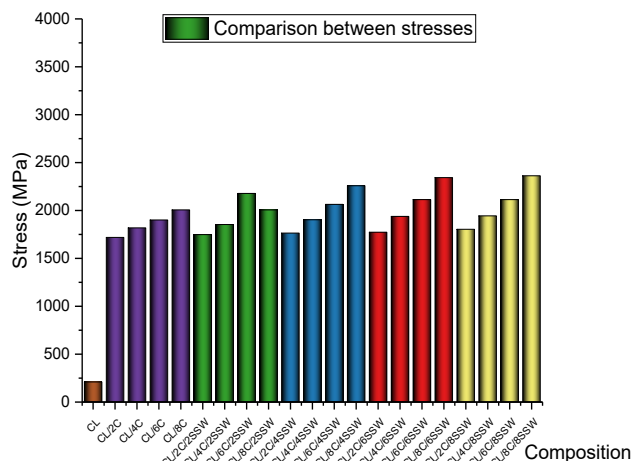
شکل ۱۱. مقایسه تنش‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری

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

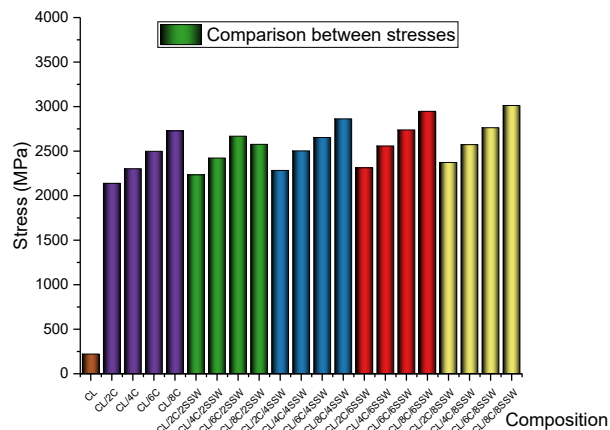
جدول ۱۱. اثر سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) پس از ۴۲ روز

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/نیمه‌شکل‌پذیر تغییر می‌کند.



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

## ۴-۵-۱. 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

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

## جدول ۱۳. بهینه‌سازی مخلوط بر اساس مقاومت و رفتار مکانیکی

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

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

## ۴-۵-۲. 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<sub>2</sub>) موجود در SSW با هیدروکسید کلسیم [Ca(OH)<sub>2</sub>] 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 مقاوتی ۱۳.۷٪ بالاتر دست یافته است و بدین ترتیب، جایگزینی کاربردی و کارآمد برای تثبیت پایدار خاک ارائه می‌دهد.

## ۴-۶. 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 نمونه‌های تثبیت شده با ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان و SSW در سنین مختلف عمل‌آوری

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

همان‌طور که در جدول ۱۴ ارائه شده است، مقادیر NDI با افزودن سیمان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش شکل‌پذیری و تمایل به رفتار ترد است. بالاترین مقادیر NDI در نمونه‌های حاوی ۸٪ سیمان مشاهده شد که پس از ۴۲ روز عمل‌آوری به ۰.۳۷ رسید، این امر منعکس‌کننده اثر سخت‌کنندگی شدید هیدراسیون سیمان است.

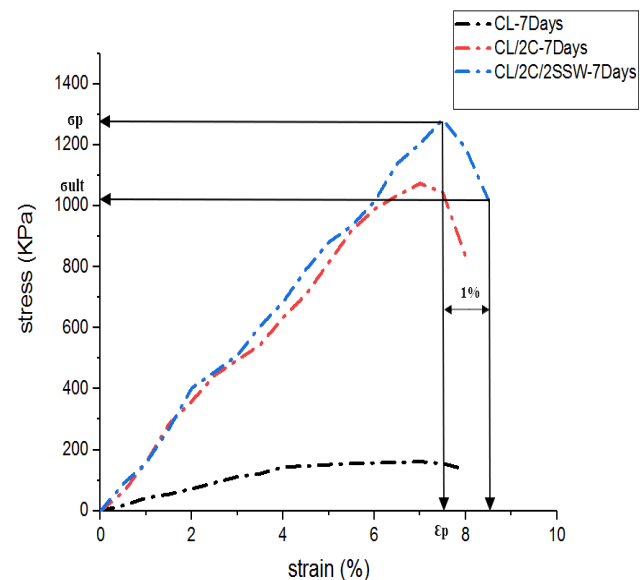
در مقابل، افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW) در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سیمان تنها، مقدار NDI را کاهش داده و در نتیجه شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. برای مثال، مخلوط حاوی ۲٪ سیمان و ۸٪ SSW پس از ۷ روز، مقدار NDI برابر با ۰.۱۹ را نشان می‌دهد که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از نمونه‌های حاوی سیمان تنها

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

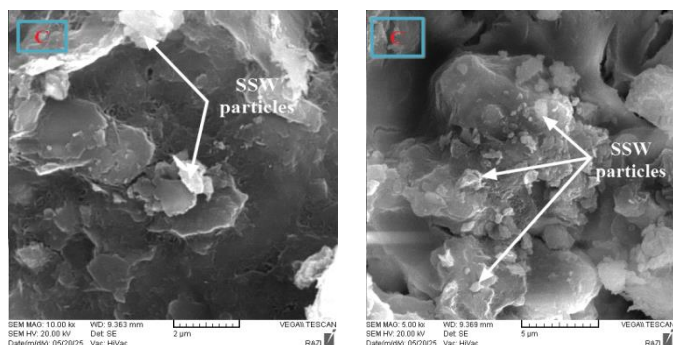
$$NDI = \frac{\sigma_p - \sigma_{ult}}{\sigma_p} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_p$  تنش شکست (یا حالت پیک) و  $\sigma_{ult}$  تنش نهایی (یا حالت باقی‌مانده) است.

مقدار NDI برابر با صفر، بیانگر رفتار کاملاً شکل‌پذیر است که در آن با افزایش کرنش، تغییر در تنش رخ نمی‌دهد (مقادیر پیک و نهایی یکسان هستند). در این پژوهش، به‌منظور 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 تثبیت‌نشده انتخاب شده است تا مقایسه UCS بین خاک‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده تسهیل گردد. شکل ۱۵ مقادیر تنش پیک و باقی‌مانده را به‌منظور محاسبه شاخص تردی نشان می‌دهد. جدول ۱۴ مقادیر NDI را برای نمونه‌های تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان و SSW در زمان‌های مختلف عمل‌آوری به تصویر می‌کشد.



شکل ۱۵. تشریح پارامترها در منحنی‌های تنش-کرنش خاک تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف خاک، سیمان و SSW به‌منظور 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.

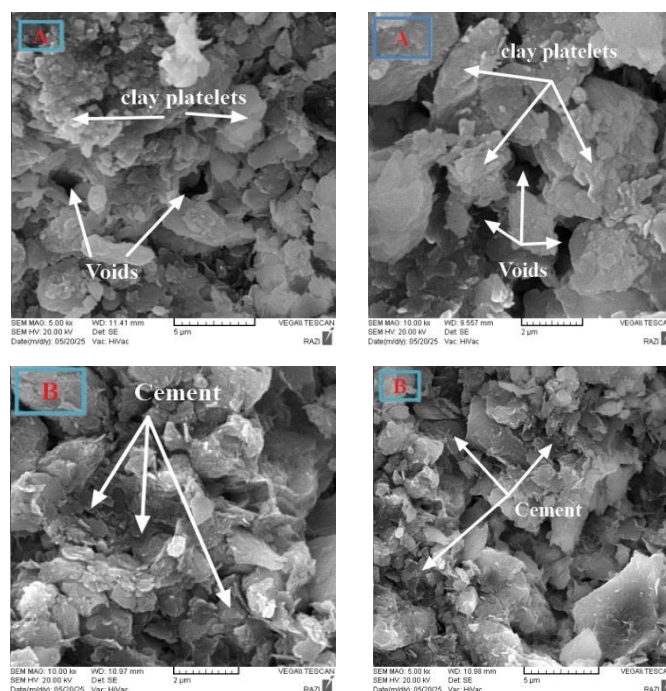
در مخلوط سوم، شامل خاک رس به‌همراه سیمان و پسماند سیلیکات سدیم، ساختاری بسیار متراکم و منسجم تر مشاهده شد. واکنش‌های پوزولانی ناشی از حضور سیلیکات سدیم، فازهای ژلی ثانویه‌ای تولید کردند که به‌طور مؤثری منافذ را پر نموده و منجر به ایجاد ساختاری نسبتاً پیوسته و یکنواخت گردید. کاهش چشمگیر تخلخل، بهبود پیوند 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 تثبیت‌شده 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.

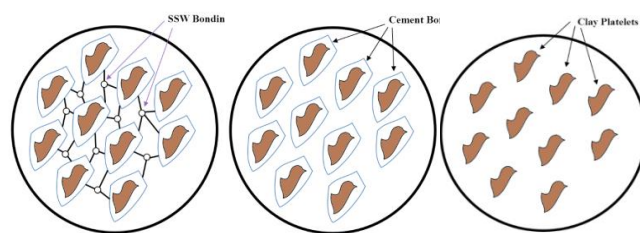


۱۴.۶ برابر بیشتر از خاک طبیعی تثبیت نشده و ۲۲٪ بیشتر از مقاومت حاصل از به کارگیری ۸٪ سیمان به تنهایی است. این ارتقا عمدتاً به واکنش های پوزولانی مؤثر میان کلسیم آزاد حاصل از هیدراسیون سیمان و ترکیبات واکنش پذیر سیلیکات و آلومینات در SSW نسبت داده می شود.

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 تراکم 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 SiO<sub>2</sub>. *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] Wassie, 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 kaolin 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 به‌طور قابل‌توجهی شاخص شکل‌پذیری نرمال‌شده (NDI) را افزایش می‌دهد که منعکس‌کننده کاهش شکل‌پذیری و افزایش تردی با گذشت زمان عمل‌آوری است. در مقابل، افزودن پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، مقادیر NDI را کاهش داده و ظرفیت تغییر شکل پس از پیک را بهبود بخشید. به‌طور کلی، استفاده ترکیبی از سیمان و SSW تعادلی بهینه میان افزایش مقاومت و بهبود شکل‌پذیری در خاک‌های رسی ایجاد کرد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که به‌کارگیری هم‌افزای سیمان و پسماند سیلیکات سدیم (SSW)، یک متدولوژی بهینه و جامع است که موفق می‌شود تعادلی ایده‌آل میان پذیرفتگی فنی، توجیه اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی در فرآیند تثبیت خاک‌های رسی متورم برقرار سازد.

این استراتژی نه‌تنها منجر به بهبود چشمگیر پارامترهای مکانیکی—از جمله افزایش مقاومت فشاری و ارتقای پایداری بلندمدت در برابر عوامل محیطی—می‌شود، بلکه با تعدیل رفتار ترد سیمان و ایجاد خاصیت نیمه‌شکل‌پذیری در ماتریس خاک، ظرفیت تحمل تغییرشکل و جذب انرژی را به‌طور محسوسه افزایش می‌دهد. علاوه بر این، جایگزینی بخشی از سیمان با پسماندهای صنعتی، علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی، اثرات مخرب تولید سیمان بر محیط‌زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای 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 برمی‌دارد. از این رو، این رویکرد نه تنها یک جایگزین فنی کارآمد، بلکه یک الگوی نوین و پایدار است که پتانسیل بالایی برای به‌کارگیری در مقیاس وسیع در پروژه‌های زیرساختی، جاده‌سازی 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.