



University Of Qom



Evaluation of Recycled Glass Powder for the Improvement of Bentonite Clay under Natural Curing Conditions

Alireza Taleb Beydokhti^{1✉}, Mojtaba Heidari², Ibrahim Rezaei³

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: Beydokhti@sci.ikiu.ac.ir
2. Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: moj.heidari@basu.ac.ir
3. Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: afg.ibrahim1992@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 05 Jun 2026
Revised 09 Jul 2026
Accepted 11 Jul 2026
Published 15 Jul 2026

Keywords:
Geotechnical
Improvement,
Recycled Glass Powder,
Clayey Soil,
Compressive Strength
SEM/EDS.

ABSTRACT

This study investigates the geotechnical improvement potential of bentonitic clay using recycled glass powder without the application of any chemical activator. For this purpose, soil-glass powder mixtures containing 3, 6, 9, 12, and 15% glass powder by dry weight of soil were prepared. Atterberg limits, standard compaction, direct shear, and CBR tests were conducted without considering curing time, whereas unconfined compressive strength and consolidation tests were performed after curing periods of 7, 28, and 60 days. In addition, SEM/EDS analyses were carried out to examine changes in the soil microstructure. The results showed that adding glass powder up to 12% significantly improved the engineering behavior of the soil, reducing the optimum moisture content by 13.3% and increasing the maximum dry density by 3.5%. At this dosage, cohesion and internal friction angle increased by 14.7% and 35.7%, respectively, while the CBR value improved by 37%. Moreover, the unconfined compressive strength of the sample containing 12% glass powder after 60 days of curing was 140% higher than that of the untreated sample. The compression index also decreased with increasing glass powder content and curing time, indicating improved settlement behavior. SEM/EDS results further revealed reduced porosity, enhanced matrix continuity, and the formation of silica/alumina-rich gel-like products. Overall, short-term soil improvement was mainly attributed to filler and particle interlocking effects, while long-term improvement resulted from the gradual formation of bonding gels. Therefore, recycled glass powder can be considered an effective, low-cost, and environmentally friendly option for the improvement of clayey soils.

Cite this article: Taleb Beydokhti AR, Heidari M, Rezaei I. Evaluation of Recycled Glass Powder for the Improvement of Bentonite Clay under Natural Curing Conditions. Civil Infrastructure Researches. 2025; 12(1): 163-181. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.16267.1685>



Introduction

Bentonitic clay is widely recognized as a problematic geomaterial in geotechnical engineering due to its high plasticity, pronounced swelling–shrinkage behavior, high compressibility, and relatively low shear strength. These adverse characteristics often result in excessive settlement, reduced bearing capacity, and instability in foundations, embankments, and pavement subgrades. Conventional stabilizers such as lime and ordinary Portland cement have long been employed to improve weak clayey soils; however, their widespread use is increasingly questioned because of high energy consumption, significant carbon emissions, and associated environmental impacts. In response, growing attention has been directed toward sustainable and low-carbon alternatives derived from industrial and municipal waste streams. Among these, recycled glass powder (RGP) has emerged as a promising candidate because of its high amorphous silica content, broad availability, and potential reactivity. Nevertheless, most existing studies have examined RGP in conjunction with alkaline or chemical activators. The present study investigates the feasibility of using RGP alone, without any chemical activator, to enhance the geotechnical performance of bentonitic clay under natural curing conditions.

Methodology

To evaluate the stabilizing potential of RGP, bentonitic clay was amended with 3, 6, 9, 12, and 15% RGP by dry weight of soil. A comprehensive laboratory testing program was designed to assess the influence of additive content and curing duration on the physical, mechanical, and microstructural behavior of the treated soil. Index and compaction properties were determined through Atterberg limits and standard compaction tests. Shear strength and bearing performance were evaluated using direct shear and California Bearing Ratio (CBR) tests, while Unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to quantify the evolution of compressive strength with curing time.

Consolidation tests were also performed to examine changes in compressibility and swelling-related behavior. To capture the time-dependent nature of the stabilization process, specimens were tested after 0, 7, 28, and 60 days of curing. In addition, scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS) analyses were carried out to characterize changes in soil fabric and to identify possible reaction products responsible for the observed improvements.

Results and Discussion

The results demonstrated that RGP markedly improved the engineering properties of bentonitic clay up to an optimum content of 12%. At this dosage, the optimum moisture content decreased by 13.3%, whereas the maximum dry density increased by 3.5%, indicating more favorable compaction characteristics. This behavior can be attributed to the partial replacement of fine clay particles with rigid, non-plastic glass particles, which reduced water demand and promoted denser particle packing. Mechanical performance also improved significantly. At 12% RGP, cohesion increased by 14.7%, the internal friction angle by 35.7%, and the CBR value by 37%, reflecting enhanced shear strength and bearing capacity. The UCS results exhibited a clear curing-dependent trend, with strength increasing progressively over time and reaching up to 140% above that of the untreated soil after 60 days. This substantial gain suggests that the role of RGP extends beyond immediate physical modification and includes longer-term physicochemical interactions. Consolidation testing further revealed a reduction in the compression index C_c and a slight decrease in swelling tendency, indicating improved volumetric stability. SEM observations indicated a denser, more homogeneous matrix with reduced pore space, and the SEM/EDS results were consistent with the possible formation of secondary aluminosilicate gel-like phases; however, definitive phase identification requires complementary tests (e.g., XRD and FTIR). Collectively, these findings indicate that improvement occurred through a combined

mechanism involving short-term filler and interlocking effects and longer-term gel formation. At 15% RGP, however, the improvement trend diminished, likely due to the excessive presence of non-cohesive glass particles.

Conclusion

This study confirms that recycled glass powder can serve as an effective, low-cost, and environmentally sustainable stabilizing agent for bentonitic clay without the use of chemical activators. Among the tested mixtures, 12% RGP yielded the most favorable overall performance in terms of compaction, strength, bearing capacity, and compressibility. The observed improvements were governed by a dual mechanism comprising immediate physical densification and gradual formation of binding gel phases during curing. These results highlight the potential of RGP as a viable alternative to conventional stabilizers and support its application in sustainable ground improvement and waste reutilization strategies.

Funding Statement

No funding in this study was received.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following regarding potential conflicts of interest:

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, development, and preparation of this manuscript

ارزیابی اثر پودر شیشه بازیافتی بر بهسازی خاک رسی بنتونیتی تحت عمل آوری طبیعی

علیرضا طالب بیدختی^۱، مجتبی حیدری^۲، ابراهیم رضایی^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه:

Beydokhti@sci.ikiu.ac.ir

۲. استاد، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: moj.heidari@basu.ac.ir

۳. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: afg.ibrahim1992@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴

کلیدواژه ها:

بهسازی ژئوتکنیکی،

پودر شیشه بازیافتی،

خاک رسی،

مقاومت فشاری،

SEM/EDS.

این پژوهش، امکان بهسازی ژئوتکنیکی خاک رسی بنتونیتی با استفاده از پودر شیشه بازیافتی، بدون کاربرد فعال کننده شیمیایی را بررسی می کند. بدین منظور، مخلوط های خاک- پودر شیشه با ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی نسبت به وزن خشک خاک تهیه شد. آزمایش های حدود اتبرگر، تراکم استاندارد، برش مستقیم و CBR بدون لحاظ زمان عمل آوری انجام شدند، در حالی که آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری و تحکیم در سنین عمل آوری ۷، ۲۸ و ۶۰ روز انجام گرفتند. همچنین، برای بررسی تغییرات ریزساختاری خاک، از تحلیل های SEM/EDS استفاده شد. نتایج نشان داد افزودن پودر شیشه تا ۱۲ درصد، موجب بهبود قابل توجه رفتار مهندسی خاک می شود، به گونه ای که رطوبت بهینه ۱۳/۳ درصد کاهش و دانسیته خشک حداکثر ۳/۵ درصد افزایش یافت. در این مقدار، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۴/۷ و ۳۵/۷ درصد و مقدار CBR نیز ۳۷ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین، مقاومت فشاری تک محوری نمونه حاوی ۱۲ درصد پودر شیشه پس از ۶۰ روز عمل آوری، ۱۴۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. شاخص فشردگی نیز با افزایش مقدار پودر شیشه و زمان عمل آوری کاهش یافت که بیانگر بهبود رفتار نشست پذیری خاک است. نتایج SEM/EDS نیز کاهش تخلخل، افزایش پیوستگی ماتریس خاک و تشکیل محصولات ژل مانند غنی از سیلیس/آلومینا را نشان داد. در مجموع، بهسازی خاک در کوتاه مدت ناشی از اثر پرکنندگی و قفل و بست ذرات و در بلندمدت ناشی از تشکیل تدریجی ژل های اتصال دهنده است. بنابراین، پودر شیشه بازیافتی حتی بدون استفاده از فعال کننده شیمیایی، می تواند گزینه ای مؤثر، کم هزینه و سازگار با محیط زیست برای بهسازی خاک های رسی باشد.

استناد: طالب بیدختی علیرضا، حیدری مجتبی، رضایی ابراهیم. ارزیابی اثر پودر شیشه بازیافتی بر بهسازی خاک رسی بنتونیتی تحت عمل آوری طبیعی. پژوهش های زیرساخت های عمرانی، ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۱۶۳-۱۸۱. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.16267.1685>

۱- مقدمه

خاک‌های رسی به دلیل خاصیت خمیری بالا، پتانسیل تورم و انقباض و مقاومت برشی پایین، همواره یکی از چالش‌برانگیزترین مصالح در پروژه‌های ژئوتکنیکی بوده‌اند [۱ و ۲]. روش‌های سنتی بهسازی خاک نظیر استفاده از سیمان پرتلند معمولی (OPC^1) و آهک، علی‌رغم اثربخشی نسبی، با معایب زیست‌محیطی قابل‌توجهی از جمله مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه هستند؛ به‌گونه‌ای که صنعت تولید سیمان به‌تنهایی مسئول حدود ۵ تا ۸ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن (CO_2) است [۳]. این پیامدهای نامطلوب، محققان را به سمت توسعه روش‌های جایگزین و سازگار با محیط‌زیست مانند ژئوپلیمرها سوق داده است. ژئوپلیمرها شبکه‌های آلومینوسیلیکاتی سه‌بعدی و آمورفی هستند که از واکنش مواد غنی از سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) با فعال‌کننده‌های قلیایی تشکیل می‌شوند [۴]. این مواد در دمای محیط یا دماهای پایین (۲۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری شده و در مقایسه با سیمان پرتلند، انتشار CO_2 بسیار کمتری دارند [۵]. در سال‌های اخیر، پودر شیشه بازیافتی (RGP^2) به دلیل ترکیب شیمیایی خاص (عمدتاً سیلیس آمورف) و خواص پوزولانی بالقوه، به‌عنوان یکی از پیش‌ماده‌های امیدوارکننده در تولید ژئوپلیمرها مورد توجه قرار گرفته است [۶]. تحقیقات پیشین نشان داده است که پودر شیشه به دلیل ماهیت قلیایی و محتوای سیلیکاتی، می‌تواند به‌طور مؤثری در تهیه حلال قلیایی و به‌عنوان پایه ژئوپلیمر در ملات‌ها استفاده شود [۷-۹]. در فرآیند تولید ژئوپلیمرها معمولاً از ترکیب $NaOH$ و Na_2SiO_3 به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شود؛ با این حال، پودر شیشه به‌عنوان یک منبع غنی از سیلیس، پتانسیل

جایگزینی با سیلیکات سدیم را نیز داراست [۱۰]. علاوه بر این، بهره‌گیری از پودر شیشه بازیافتی راهکاری پایدار برای مدیریت پسماندهای شیشه‌ای محسوب می‌شود که سالانه مقادیر عظیمی از آن در سراسر جهان دفن می‌گردد. عدم بازیافت این پسماندها، علاوه بر اشغال فضای محل‌های دفن زباله، به دلیل تجزیه‌ناپذیری شیشه، اثرات زیست‌محیطی بلندمدتی به همراه دارد [۶].

شیشه یک ماده جامد آمورف (غیرکریستالی)، شکننده و شفاف است. رایج‌ترین نوع آن که قرن‌هاست در تولید پنجره و ظروف کاربرد دارد، شیشه سودالایم^۳ است که حدود ۹۰ درصد از شیشه‌های تولیدی را شامل می‌شود. این نوع شیشه عمدتاً از ۷۲ درصد سیلیس، ۱۴/۲ درصد اکسید سدیم (Na_2O)، ۲/۵ درصد اکسید منیزیم (MgO)، ۱۰ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۰/۶ درصد آلومینا (Al_2O_3) تشکیل شده است. ترکیب اصلی شیشه یعنی سیلیس، ذرات ماده‌ای غیرچسبنده است؛ بنابراین پودر خردشده شیشه نیز رفتاری دانه‌ای و غیرچسبنده دارد. با این حال، هنگامی که این پودر با خاک ریزدانه چسبنده و متورمشونده مخلوط می‌شود، به دلیل اصلاح دانه‌بندی و همچنین حضور ترکیباتی نظیر آهک که پتانسیل هیدراتاسیون دارند، موجب بهبود قوام و مقاومت خاک می‌گردد [۱۱].

در سال‌های اخیر، بهسازی خاک‌های رسی با استفاده از پسماندهای جامد از جمله پودر شیشه، مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. ابرمو^۴ و همکاران، در مطالعات خود نشان دادند که با افزایش میزان پودر شیشه تا ۲۰ درصد، مقاومت اصطکاکی ذرات خاک افزایش یافته و مشخصات ژئوتکنیکی آن بهبود می‌یابد [۱۲]. آلفوبی^۵ و همکاران، تأثیر ترکیب پودر شیشه (یک تا ۱۵ درصد) و سیمان (۱۵ درصد) بر خاک رسی را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین بهبود

³- Soda-lime

⁴- Eberemu

⁵- Olofuobi

¹- Ordinary Portland Cement

²- Recycled Glass Powder

در ۳۰۰ درصدی CBR اشباع می‌شود. با این حال، تحلیل اقتصادی آن‌ها نشان داد که ۱۵ درصد پودر شیشه، با ایجاد افزایش ۵۴/۵ درصدی مقاومت و کاهش ۱۹ درصدی هزینه‌های ساخت، درصد بهینه اقتصادی و فنی است [۱۹]. اخیراً اسمائل^{۱۰} و همکاران نیز گزارش دادند که افزودن ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر شیشه به بنتونیت، علاوه بر کاهش شاخص خمیری از ۱۷ به ۱۰ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری را پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به میزان قابل‌توجهی ارتقا می‌دهد [۲۰].

در کنار بهبود خواص مکانیکی، جنبه‌های زیست‌محیطی این ماده نیز حائز اهمیت است. دیسفانی^{۱۱} و همکاران، با اندازه‌گیری غلظت عناصر قابل نشت از پودر شیشه و مقایسه آن با استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA^{۱۲})، نشان دادند که خطرات زیست‌محیطی کاربرد این ماده بسیار ناچیز است. آن‌ها همچنین با اندازه‌گیری pH دریافتند که پودر شیشه بازیافتی ماهیتی نسبتاً قلیایی (بازه ۹/۹ تا ۱۰/۱) دارد که این ویژگی می‌تواند در تحریک واکنش‌های پوزولانی مؤثر باشد [۲۱].

با توجه به محدودیت منابع اولیه و پیامدهای مخرب زیست‌محیطی تولید افزودنی‌های سنتی (آهک و سیمان)، بهره‌گیری از مواد جایگزین و پایدار نظیر پودر شیشه بازیافتی ضروری به نظر می‌رسد. بخش عمده مطالعات گذشته یا بر نقش پودر شیشه در کنار سیمان و سایر افزودنی‌ها متمرکز بوده‌اند، یا عملکرد آن را در سامانه‌های ژئوپلیمری فعال‌شده با مواد قلیایی نظیر NaOH و Na_2SiO_3 ارزیابی کرده‌اند؛ اما تأثیر مستقیم پودر شیشه بازیافتی بدون استفاده از ماده فعال‌کننده شیمیایی و اتکا به قلیائیت ذاتی خود شیشه در

در چگالی خشک و ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) در حالت اشباع در پنج درصد پودر شیشه، و بیشترین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ۱۰ درصد پودر شیشه حاصل می‌شود [۱۳]. همچنین جاناکچی^۶ و همکاران نشان دادند که پودر ضایعات شیشه سودالایم به‌عنوان یک افزودنی پوزولانی، موجب بهبود قابل‌توجه مقاومت و اصلاح حدود اتربرگ خاک‌های ریزدانه می‌شود [۱۴].

در پژوهشی دیگر، بنی^۷ و همکاران نشان دادند که افزودن پودر شیشه تا محدوده ۶ تا ۸ درصد، ارزش CBR را از سه به ۱۲/۸ درصد افزایش داده و مقاومت فشاری تک‌محوری و پارامترهای برشی خاک را بهبود می‌بخشد [۱۵]. پورعباس و همکاران، عملکرد ژئوپلیمرهای مبتنی بر RGP را در خاک رسی ارزیابی کردند و دریافتند که افزودن ۱۵ درصد وزنی از این ژئوپلیمر، منجر به بهبود چشمگیر مقاومت فشاری تک‌محوری می‌گردد. تحلیل‌های ریزساختاری SEM/EDX در این مطالعه، تشکیل ژل ژئوپلیمری و افزایش یکپارچگی ساختار خاک را تأیید کرد؛ هرچند این فرآیند به‌شدت وابسته به غلظت فعال‌ساز قلیایی (NaOH) و زمان عمل‌آوری بود [۱۶].

بلایی^۸ و همکاران، با افزودن پودر شیشه تا ۲۵ درصد وزنی به خاک‌های متورم‌شونده، گزارش دادند که ۱۵ درصد پودر شیشه به عنوان درصد بهینه، علاوه بر کاهش چشمگیر پتانسیل تورم، می‌تواند نیاز به ضخامت لایه زیر اساس را تا ۶۳ درصد کاهش دهد [۱۷]. محمدزاده و توفیق نیز در بررسی اصلاح خاک رس با ژئوپلیمر پایه شیشه، میزان بهینه RGP را ۹ درصد گزارش کردند [۱۸]. عاشیق^۹ و همکاران، ضمن بررسی افزودن ۲۰ درصد پودر شیشه، دریافتند که این میزان باعث افزایش ۱۱۰ درصدی مقاومت فشاری و افزایش

10- Ismael

11- Disfani

12- Environmental Protection Agency

6- Canakci

7- Benny

8- Blayi

9- Ashiq

شرایط عمل‌آوری طبیعی، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی امکان بهسازی یک خاک رسی بنتونیتی با استفاده از پودر شیشه بازیافتی بدون استفاده از هرگونه فعال‌کننده شیمیایی است. این رویکرد، در مقایسه با روش‌های متداول مبتنی بر فعال‌کننده‌های قلیایی، می‌تواند از نظر اقتصادی، اجرایی و زیست‌محیطی مزیت داشته باشد؛ زیرا هم هزینه و پیچیدگی اجرا را کاهش می‌دهد و هم مخاطرات ناشی از مصرف مواد شیمیایی را محدود می‌سازد. بر این اساس، در پژوهش حاضر، اثر مقادیر مختلف پودر شیشه بازیافتی بر خواص خمیری، تراکمی، مقاومتی، باربری، تحکیمی و ریزساختاری خاک رسی بنتونیتی در دوره‌های مختلف عمل‌آوری تا ۶۰ روز بررسی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای معرفی پودر شیشه بازیافتی به‌عنوان یک افزودنی پایدار و کم‌هزینه در بهسازی خاک‌های رسی فراهم سازد.

۲- مواد

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از نهشته‌های برجای حاصل از هوازدگی و دگرسانی توف‌های آذرآواری شمال قزوین، در محدوده معدن بنتونیت نیاق، برداشت شد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های مهندسی اولیه خاک پایه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل دانه‌بندی، حدود آتربرگ، چگالی ویژه، تراکم استاندارد و برش مستقیم انجام شد. همچنین، ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی خاک نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲- پودر شیشه بازیافتی

برای تهیه پودر شیشه مورد استفاده در این پژوهش، از ضایعات شیشه تخت معمولی پنجره‌های ساختمانی استفاده شد. فرآیند آماده‌سازی شامل خردایش اولیه با چکش و آسیاب فکی و سپس آسیاب نهایی با دستگاه آسیاب دیسکی برای دستیابی به ذرات ریزتر و یکنواخت‌تر بود (شکل ۱). در ادامه، به‌منظور کنترل حداکثر اندازه ذرات و حذف احتمالی ذرات درشت‌دانه، پودر حاصل از الک شماره ۱۲۰ (۰/۱۲۵ میلی‌متر) عبور داده شد. انتخاب این الک به‌عنوان حد بالای دانه‌بندی، با هدف تضمین یکنواختی ذرات، افزایش سطح ویژه و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای واکنش‌های پوزولانی در سیستم خاک-شیشه انجام گرفت.



شکل ۱- روش تهیه پودر شیشه (الف) آسیاب فکی (ب) آسیاب دیسکی

۳- روش مطالعه

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پودر شیشه بر خواص مهندسی خاک ریزدانه از آزمون‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، برش مستقیم و نسبت باربری کالیفرنیا استفاده شده است. همچنین جهت بررسی تأثیر

زمان عمل‌آوری ماده افزودنی بر خواص مهندسی خاک از آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم استفاده شده است. برای این منظور، درصدهای متفاوتی از پودر شیشه تهیه شده شامل ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی خاک خشک به ترکیب خاک پایه اضافه شده و کاملاً

استفاده از سه نمونه موازی انجام شد. این شیوه برای آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، برش مستقیم، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری تک‌محوری برای تمامی درصدهای افزودنی و سنین عمل‌آوری رعایت گردید. در مورد آزمایش تحکیم، به دلیل محدودیت‌های تجهیزاتی، ارزیابی نمونه‌ها در دو تکرار انجام پذیرفت و نتایج نهایی براساس میانگین داده‌های حاصله تحلیل گردید.

۴- آزمون‌ها

۴-۱- آزمون دانه‌بندی و چگالی ویژه

آزمایش‌های دانه‌بندی و چگالی ویژه به ترتیب مطابق استاندارد ASTM D422 و ASTM D854 بر روی نمونه خاک و پودر شیشه انجام گرفت [۲۲ و ۲۳].

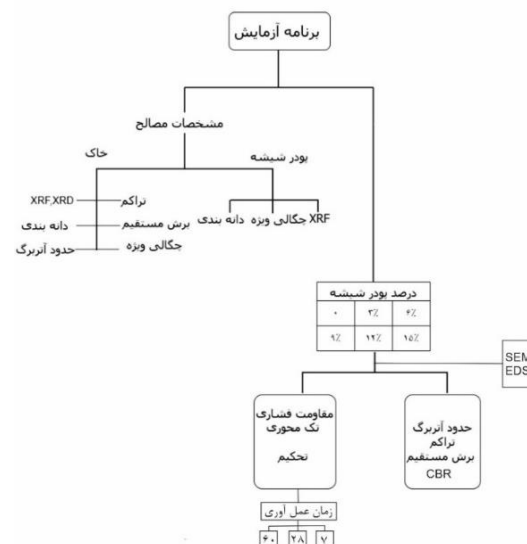
۴-۲- آزمون حدود اتربرگ

به‌منظور تعیین ویژگی‌های خمیری، آزمایش‌های تعیین حد روانی و حد خمیری مطابق با استاندارد ASTM D4318، ابتدا بر روی خاک پایه (شاهد) و سپس بر روی مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف پودر شیشه انجام شد [۲۴].

۴-۳- آزمایش تراکم

به‌منظور انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد مطابق با ASTM D698، ابتدا مقادیر مختلف پودر شیشه (۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی خاک خشک) به خاک پایه اضافه و به صورت خشک کاملاً مخلوط شد. سپس مقدار مشخصی آب به هر مخلوط اضافه شد و فرآیند اختلاط تا دستیابی به یک ترکیب کاملاً همگن ادامه یافت. جهت توزیع یکنواخت رطوبت، نمونه‌های مرطوب به مدت ۲۴ ساعت در داخل کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند و پس از آن تحت آزمایش قرار گرفتند [۲۵]. شایان ذکر است که نتایج آزمایش تراکم بر روی خاک بدون افزودنی

مخلوط حاصل همگن گردید و برای آزمون‌های مختلف آماده گردید. همچنین به منظور بررسی زمان عمل‌آوری پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در محفظه‌های پلاستیکی قرار گرفته و پس از مدت هفت، ۲۸ و ۶۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۲، برنامه آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار برنامه آزمایش

درصدهای پودر شیشه مورد استفاده در این پژوهش براساس پیشینه تحقیق انتخاب شدند. در اغلب مطالعات مرتبط با بهسازی خاک با استفاده از پودر شیشه در حضور مواد فعال‌کننده، مقادیر پودر شیشه عمدتاً در بازه حدود ۱ تا ۲۰ درصد وزنی خاک خشک بررسی شده است. بنابراین، درصدهای انتخاب‌شده در این پژوهش، ضمن قرارگیری در محدوده متداول مطالعات پیشین، امکان بررسی روند تغییرات رفتار مهندسی خاک و تعیین مقدار بهینه پودر شیشه را فراهم می‌کنند. زمان‌های عمل‌آوری نیز مشابه رویه رایج در مطالعات بهسازی خاک و با هدف ارزیابی رفتار کوتاه‌مدت و میان‌مدت مخلوط‌ها و همچنین با لحاظ محدودیت‌های زمانی برنامه آزمایشگاهی تعیین شدند.

به‌منظور حصول اطمینان از صحت نتایج، قابلیت تکرارپذیری و کاهش خطای آزمایشگاهی، تمامی آزمایش‌های این پژوهش براساس استانداردهای مربوطه با

(خاک پایه) به عنوان مبنای مقایسه برای ارزیابی تأثیر پودر شیشه در نظر گرفته شد.

۴-۴- آزمایش برش مستقیم خاک

به‌منظور ارزیابی اثر افزودن پودر شیشه بر پارامترهای مقاومت برشی، آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D3080-04 بر روی خاک پایه و نمونه‌های بازسازی‌شده حاوی درصد‌های مختلف پودر شیشه انجام شد [۲۶]. بدین منظور، خاک پایه با مقادیر ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی پودر شیشه ترکیب شد و پس از رسیدن به رطوبت بهینه، در قالب‌های استاندارد متراکم گردید. همچنین، نمونه خاک پایه بدون افزودنی نیز تحت شرایط مشابه تهیه و آزمایش شد تا مبنای مقایسه نتایج قرار گیرد. نمونه‌های آماده‌شده در دستگاه برش مستقیم قرار گرفتند و تحت تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، زمان کافی برای تحکیم اولیه به آن‌ها اختصاص داده شد. انتخاب این سطوح تنش با هدف پوشش دامنه‌ای متعارف از تنش‌های قائم در مسائل ژئوتکنیکی سطحی و فراهم کردن امکان ترسیم پوش گسیختگی و استخراج پارامترهای مقاومت برشی انجام شد. پس از اتمام مرحله تحکیم، آزمایش برش با نرخ جابه‌جایی ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت.

انتخاب این نرخ با توجه به تعداد نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف پودر شیشه، لزوم تکرار آزمایش‌ها برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج و نیز محدودیت‌های اجرایی ناشی از طولانی شدن زمان آزمایش در نرخ‌های پایین‌تر صورت گرفت. هرچند در خاک‌های ریزدانه، استفاده از نرخ‌های پایین‌تر می‌تواند شرایط نزدیک‌تری به زهکشی کامل فراهم آورد، در این پژوهش با هدف ارزیابی مقایسه‌ای اثر درصد‌های مختلف پودر شیشه، تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط یکسان و با نرخ بارگذاری ثابت انجام شد. این رویکرد، امکان مقایسه سازگار روند تغییرات پارامترهای مقاومتی را فراهم کرده و کمک می‌کند اثر

افزودن پودر شیشه بر رفتار برشی خاک به‌صورت قابل اتکاتری ارزیابی شود.

۴-۵- آزمایش CBR

در این پژوهش، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) جهت ارزیابی ظرفیت باربری خاک پایه و مخلوط‌های اصلاح‌شده با پودر شیشه، براساس استانداردهای ASTM D1883 و ASTM D1557 (تراکم اصلاح‌شده) انجام شد [۲۷ و ۲۸].

بدین منظور، خاک عبوری از الک شماره ۴ با رطوبت بهینه مخلوط شد و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محفظه در بسته جهت همگن‌سازی رطوبت، در ۵ لایه و با اعمال ۵۶ ضربه در هر لایه متراکم گردید. در نهایت، با اعمال سربار، بارگذاری با نرخ نفوذ ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و مقادیر نیرو در نفوذهای ۲/۵ و ۵ میلی‌متر ثبت و به‌صورت درصد CBR گزارش گردید.

۴-۶- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری محصورنشده

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS^{13}) به عنوان معیاری برای ارزیابی خواص مکانیکی خاک بهسازی شده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۴۹ و ارتفاع ۹۹ میلی‌متر استفاده شد و قالب مورد استفاده فلزی و از نوع جداسدنی بود. برای ساخت نمونه‌های تک محوری ابتدا خاک از الک شماره ۴۰ عبور داده شد و سپس به مدت ۳ روز در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

در ابتدا، نمونه‌های خاک با نسبت‌های مختلف RGP به خاک (به ترتیب ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی) به همراه نمونه شاهد (بدون ماده افزودنی) آماده گردید و سپس حدود ۱۰ دقیقه با یکدیگر مخلوط گردید تا یک مخلوط کاملاً همگن حاصل شود. پس از اضافه کردن آب

13- Uniaxial Unconfined Soil

آماده‌سازی نمونه‌ها، مخلوط خاک و درصد‌های مختلف پودر شیشه با رطوبت بهینه ترکیب شده و در سه لایه تا دستیابی به حداکثر دانسیته خشک در رینگ‌های استاندارد تحکیم (با قطر ۵۰ میلی‌متر) متراکم شدند. پس از اتمام دوره‌های عمل‌آوری مشخص (آنی، ۲۸ و ۶۰ روز)، نمونه‌ها تحت تنش‌های قائم ۲۵ تا ۸۰۰ کیلوپاسکال (با پله‌های بارگذاری مضاعف شامل ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال) مورد آزمایش قرار گرفتند. انتخاب این محدوده بارگذاری با هدف پوشش تنش‌های متداول ژئوتکنیکی در مسائل پی و زیرسازی و همچنین فراهم کردن امکان ترسیم کامل منحنی $e-\log p$ جهت استخراج دقیق و قابل‌اعتماد شاخص‌های تراکم‌پذیری (C_c) و تورم‌پذیری (C_s) صورت گرفته است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مشخصات خاک پایه و پودر شیشه

منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. براساس نتایج آزمایش دانه‌بندی، بیش از ۷۱ درصد از ذرات خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده‌اند که بیانگر ریزدانه بودن خاک است. نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، حد روانی (LL) را ۴۳/۸ درصد و حد خمیری (PL) را ۲۶ درصد نشان می‌دهد که حاصل آن شاخص خمیری (PI) معادل ۱۷/۸ درصد است. بر این اساس و طبق سیستم طبقه‌بندی متحد ($USCS$)^{۱۵}، خاک پایه در رده CL قرار می‌گیرد. سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در جدول ۱ خلاصه شده است. همچنین، نتایج آنالیزهای XRD و XRF به‌منظور تعیین ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی خاک در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه گردیده است.

معادل با رطوبت بهینه (OWC)^{۱۴} حداقل به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط حاصل ورز داده شد تا ترکیبی یکنواخت حاصل شود. مخلوط حاصل در سه لایه در داخل قالب تراکم متراکم گردید. پس از اتمام فرآیند تراکم و خروج از قالب، وزن نمونه‌ها ثبت شد. به‌منظور جلوگیری از تغییر رطوبت و حفظ شرایط هم‌دمای در طول دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها ابتدا به‌صورت انفرادی با لایه‌ای از فیلم پلاستیکی پوشانده و سپس در کیسه‌های زیپ‌دار پلاستیکی قرار گرفتند (شکل ۳). این اقدام باعث ایجاد یک محیط ایزوله و حفظ رطوبت بهینه در تمامی نمونه‌ها گردید. علاوه بر این، کیسه‌های حاوی نمونه‌ها در محفظه‌های پلاستیکی بزرگ‌تری قرار داده شدند که محیط داخلی آن با پارچه‌های مرطوب جهت حفظ رطوبت نسبی محیطی پوشانده شده بود. تمامی نمونه‌ها در محیطی با دمای کنترل‌شده ($25 \pm 2^\circ C$) برای مدت‌های ۷، ۲۸ و ۶۰ روز عمل‌آوری شدند. پایداری شرایط رطوبتی در طول دوره عمل‌آوری، با کنترل وزن نمونه‌ها پیش از آزمایش UCS مورد پایش قرار گرفت؛ به‌طوری‌که تغییر وزن نمونه‌ها نسبت به قبل از عمل‌آوری همواره کمتر از یک گرم گزارش شد که نشان‌دهنده اثربخشی روش ایزولاسیون اعمال شده است.

سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D2166-16 انجام شد و در این آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید [۲۹]. نرخ جابه‌جایی عمودی در آزمایش UCS برابر با یک میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد.

۷-۴- آزمایش تحکیم

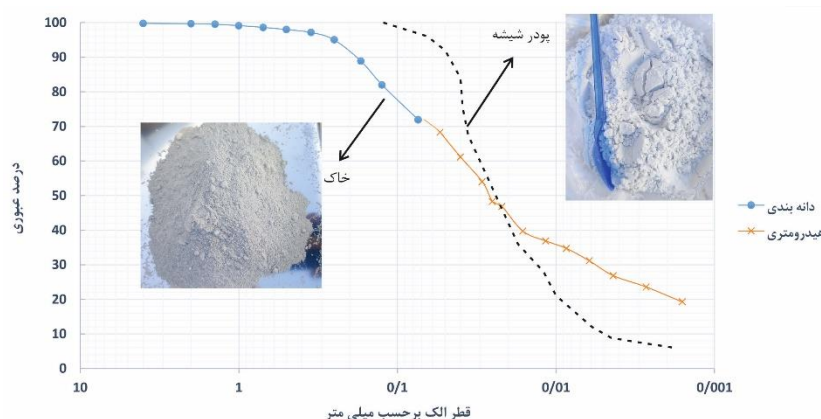
به منظور بررسی تأثیر پودر شیشه بازیافتی بر شاخص‌های تراکم‌پذیری خاک (C_c و C_s) آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM-D2435 انجام شد [۳۰]. برای

15- Unified Soil Classification System

14- Optimum Water Content



شکل ۳- آماده سازی نمونه های مورد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری



شکل ۴- منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه

زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)	درصد رطوبت بهینه	دانسیتة خشک حداکثر (KN/m^3)	شاخص خمیری	حد خمیری	حد روانی	G_s	رده خاک	رنگ ظاهری
۲۸	۴۸	۲۱/۸	۱۵/۸۰	۱۷/۸	۲۶/۰	۴۳/۸	۲/۶۸	CL	خاکستری روشن

جدول ۲- ترکیب کانی شناسی خاک مورد مطالعه براساس نتایج آنالیز XRD [۳۱]

نام نمونه	ترکیب کانی شناسی
خاک معدن نیاق	Quartz, Montmorillonite, Illite, Kaolinite, Alkali Feldspar, Plagioclase, Calcite, Dolomite

جدول ۳- مشخصات شیمیایی خاک پایه و پودر شیشه بازیافتی

درصد وزنی											
LOI	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
۵/۷۸	۰/۰۱	۰/۳۰	۰/۰۲	۲/۵۰	۰/۴۰	۱/۱۰	۶/۷۶	۱/۹۶	۱۳/۴۷	۶۷/۷۹	خاک پایه
۰/۱	-	۰/۰۲	-	۰/۲۱	۱۴/۱۱	۰/۶۷	۸/۶۹	۳/۷۸	۰/۷۱	۷۱/۸۱	شیشه

محاسبه شده برای این پودر، شامل ضریب یکنواختی ($C_u=6$) و ضریب انحراف ($C_c=1/12$) است که بیانگر توزیع مناسب و پیوسته ذرات در محدوده سیلت می باشد. سطح ویژه بسیار بالای حاصل از این دانه بندی، نقش مؤثری در واکنش زایی پوزولانی ایفا می کند. همچنین، آزمایش چگالی ویژه (G_s)، مقدار چگالی پودر شیشه را

در ادامه ارزیابی مصالح مصرفی، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پودر شیشه تهیه شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. براساس منحنی دانه بندی (شکل ۱)، حدود ۹۷ درصد از ذرات از الک شماره ۲۰۰ (0.075 میلی متر) عبور کرده اند که این توزیع ابعاد، تطابق مطلوبی با مطالعات پیشین نشان می دهد [۱۶ و ۱۸]. ضرایب دانه بندی

۲/۴۶ نشان داد و ترکیب شیمیایی آن براساس آنالیز XRF در جدول ۳ ارائه گردیده است.

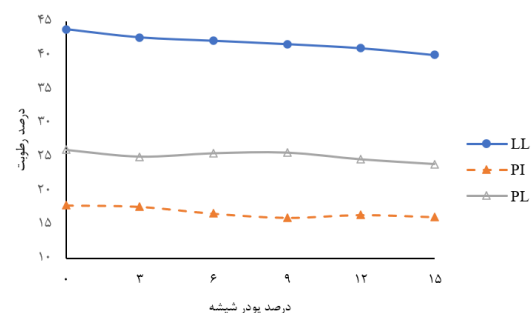
۲-۵- تأثیر پودر شیشه بر حدود اتربرگ

نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ برای نمونه خاک پایه و مخلوط‌های بهسازی‌شده با درصد‌های مختلف پودر شیشه در جدول ۴ و روند تغییرات آن‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج حدود اتربرگ نمونه‌های مورد مطالعه با درصد های مختلف پودر شیشه

حدود اتربرگ	خاک پایه	درصد وزنی				
		۳	۶	۹	۱۲	۱۵
LL	۴۳/۸	۴۲/۶	۴۲/۱	۴۱/۶	۴۱/۰	۴۰/۰
PL	۲۶/۰	۲۵/۱	۲۵/۵	۲۵/۶	۲۴/۶	۲۳/۹
PI	۱۷/۸	۱۷/۶	۱۶/۶	۱۶	۱۶/۴	۱۶/۱

طبق نتایج به‌دست‌آمده، روند تغییرات حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) با افزایش درصد پودر شیشه همواره کاهشی است؛ به‌طوری‌که با افزودن ۱۵ درصد پودر شیشه، حد روانی حدود ۸/۶ درصد، حد خمیری حدود ۸ درصد، شاخص خمیری خاک حدود ۹/۵ درصد کاهش یافته است. این رفتار کاهشی با یافته‌های الوفوبی و همکاران، بنی و همکاران و اسمائل و همکاران همخوانی دارد [۱۳، ۱۵ و ۲۰].



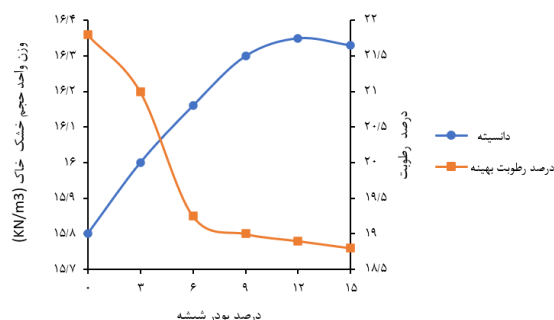
شکل ۵- نمودار تغییرات حدود اتربرگ با درصد‌های متفاوت از پودر شیشه افزودنی

کاهش حدود اتربرگ را می‌توان به ماهیت فیزیکی و شیمیایی پودر شیشه باز یافتی نسبت داد. این ماده به دلیل غیرپلاستیک، دانه‌ای و غیرچسبنده بودن، در مقایسه با ذرات رسی خاک پایه، ظرفیت بسیار کمتری برای جذب و نگهداری آب دارد. با افزایش درصد پودر شیشه، بخشی از ذرات رسی فعال با ذرات غیرفعال شیشه

جایگزین شده و در نتیجه، فاز رسی و ضخامت لایه دوگانه آب کاهش می‌یابد. این امر، موجب افت هم‌زمان حد روانی و حد خمیری می‌شود. از سوی دیگر، به علت ماهیت کاملاً غیرچسبنده ذرات شیشه، افزودن مقادیر بیشتر آن (۱۵ درصد) و غلبه رفتار دانه‌ای و غیرچسبنده شیشه باعث تضعیف انسجام خمیری خاک و کاهش شاخص خمیری مخلوط می‌گردد.

۳-۵- تأثیر پودر شیشه در آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم (شکل ۶) نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر شیشه تا ۱۲ درصد، دانسیته خشک مخلوط حدود ۳/۵ درصد افزایش و رطوبت بهینه آن ۱۳/۳ درصد کاهش می‌یابد.

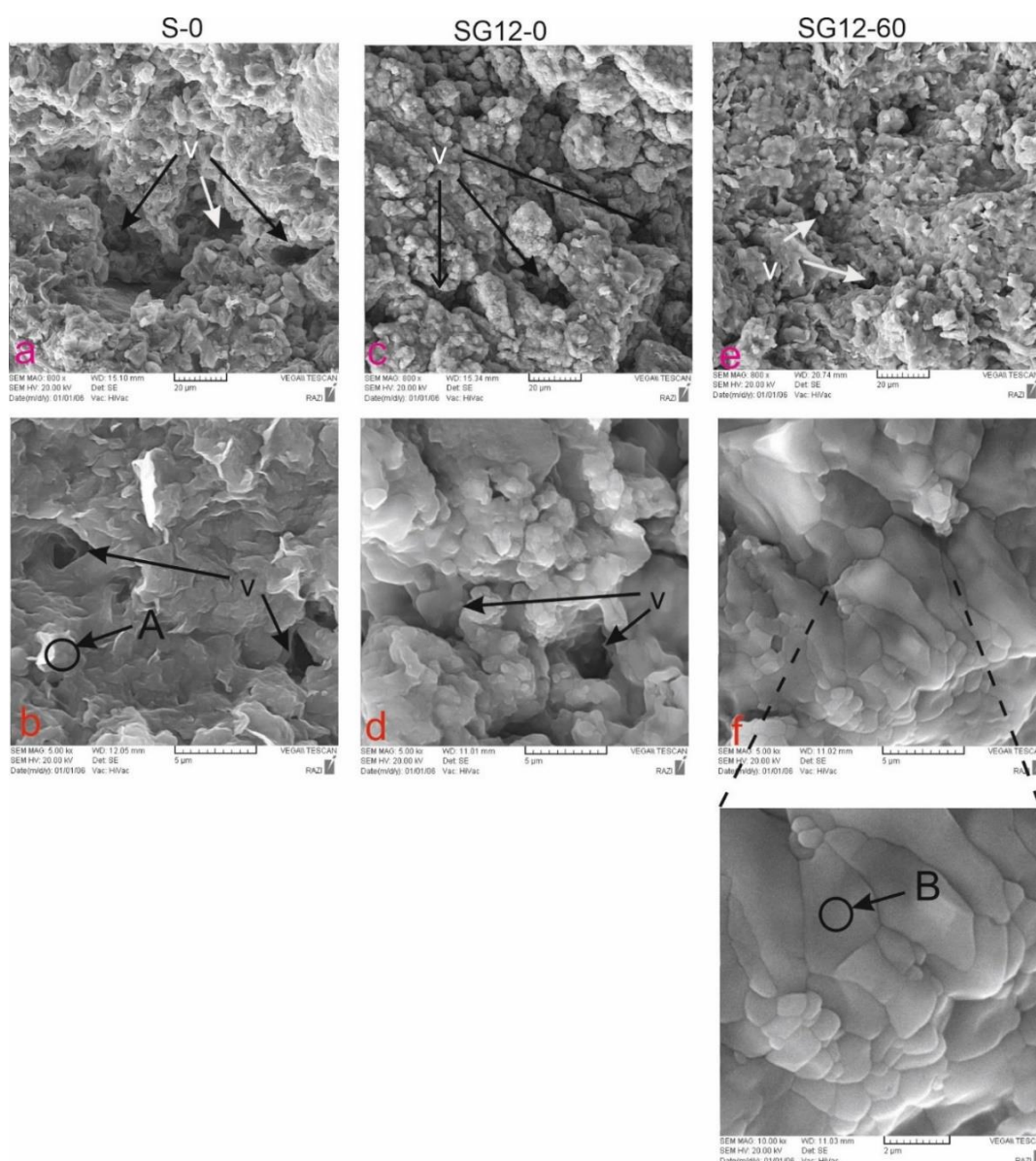


شکل ۶- تأثیر پودر شیشه بر میزان دانسیته خشک و رطوبت بهینه در آزمایش تراکم

این بهبود پارامترهای تراکمی ناشی از دو عامل است: نخست، اثر پرکنندگی ذرات شیشه که با پر کردن

با این حال، در مقادیر فراتر از ۱۲ درصد، روند تغییرات دانسیته خشک نزولی می‌شود. این کاهش کارایی را می‌توان به وزن مخصوص کمتر پودر شیشه نسبت به ذرات خاک پایه و به ویژه ماهیت دانه‌ای و غیرچسبنده آن نسبت داد. در درصدهای بالاتر پودر شیشه، غلبه رفتار غیرچسبنده ذرات شیشه بر پیوستگی ماتریس رسی، انسجام مخلوط را در حین تراکم مختل کرده و مانع از دستیابی به آرایش متراکم‌تر ذرات می‌گردد.

فضاهای خالی میان‌ذره‌ای، سبب دستیابی به آرایش متراکم‌تر و در نتیجه افزایش دانسیته مخلوط می‌شود؛ دوم، غیرفعال بودن پودر شیشه و سطح ویژه ناچیز آن نسبت به کانی‌های فعال رسی است؛ این امر از جذب آب در لایه دوگانه می‌کاهد و با تسهیل لغزش ذرات روی یکدیگر در حین کوبش، موجب کاهش رطوبت بهینه مخلوط می‌گردد. این تفسیر با مشاهدات SEM مبنی بر کاهش نسبی منافذ و بهبود آرایش ذرات در نمونه بهسازی شده (SG12-0) نسبت به خاک شاهد (S-0) که در شکل ۷ ارائه شده است، سازگاری دارد.

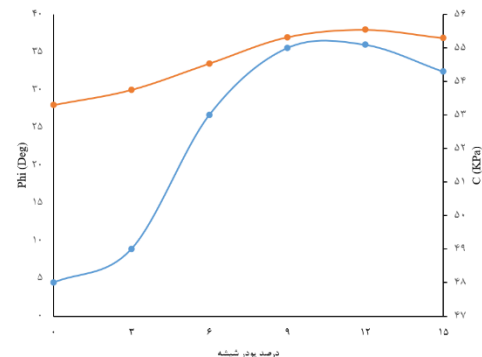


شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای خاک پایه (a و b)، خاک بهسازی شده با ۱۲ درصد شیشه و بدون زمان عمل‌آوری (c و d) و خاک بهسازی شده با ۱۲ درصد شیشه و با زمان عمل‌آوری ۶۰ روز (e و f) (V: منافذ)

۴-۵- تأثیر پودر شیشه بر مقاومت برشی خاک

تغییرات پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خاک بهسازی شده با مقادیر مختلف پودر شیشه در زمان عمل‌آوری صفر، در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزودن پودر شیشه تا سطح ۱۲ درصد، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۴/۷ و ۳۵/۷ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش یافته و پس از آن روند نزولی به خود می‌گیرند. بهبود مستمر مقاومت برشی تا این درصد بهینه، ناشی از تقویت مکانیسم انتقال تنش میان ذرات صلب و زاویه‌دار شیشه و ماتریس خاک است.

بررسی دقیق‌تر پارامتر چسبندگی نشان می‌دهد که مقدار آن از حدود ۴۸ kPa در حالت شاهد، با شیب تندی تا سطح ۹ درصد پودر شیشه افزایش یافته (حدود ۵۵kPa)، تا ۱۲ درصد تقریباً ثابت مانده و سرانجام در ۱۵ درصد با افت محسوسی مواجه می‌شود.



شکل ۸- تغییرات درصد مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک با مقادیر مختلف پودر شیشه

از آنجا که زمان عمل‌آوری در این آزمایش صفر بوده و امکان شکل‌گیری واکنش‌های پوزولانی وجود ندارد، این افزایش اولیه چسبندگی را نمی‌توان به تشکیل ژل‌های سیمانی نسبت داد؛ بلکه افزودن مقادیر مناسب پودر شیشه (محدوده ۹ تا ۱۲ درصد) موجب اصلاح دانه‌بندی، کاهش تخلخل و تراکم بهتر مخلوط شده که در نتیجه، نوعی چسبندگی ظاهری ناشی از قفل و بست

فیزیکی^{۱۶} ذرات ایجاد کرده است. این تفسیر با شواهد ریزساختاری ارائه‌شده در شکل ۷ نیز همخوانی دارد.

با این حال، در حضور ۱۵ درصد پودر شیشه، هر دو پارامتر مقاومت برشی افت محسوسی نشان می‌دهند. کاهش زاویه اصطکاک داخلی در این درصد، می‌تواند ناشی از تجمع بیش از حد ذرات پودر شیشه و احتمال بروز پدیده تماس مستقیم شیشه- شیشه باشد که با ایجاد سطوح لغزش آسان‌تر، مقاومت را کاهش می‌دهد. کاهش شدید چسبندگی نیز معلول غلبه ماهیت دانه‌ای، غیرچسبنده و غیرپلاستیک ذرات شیشه بر ماتریس خاک پایه است که تضعیف پیوندهای کلوئیدی میان ذرات رس را در پی دارد.

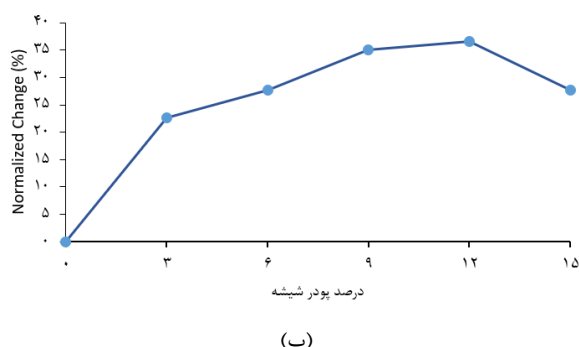
۵-۵- تأثیر پودر شیشه بر CBR

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پودر شیشه تا سطح ۱۲ درصد، مقدار CBR در نفوذ ۲/۵ میلی‌متر تا حدود ۳۷ درصد افزایش می‌یابد و پس از آن روندی کاهشی پیدا می‌کند. این بهبود ظرفیت باربری را می‌توان به جایگزینی بخشی از ذرات نرم و تغییرشکل‌پذیر خاک پایه با ذرات صلب، سخت و زاویه‌دار شیشه نسبت داد. حضور این ذرات در مخلوط، با اصلاح دانه‌بندی، پر کردن فضاهای خالی و ایجاد آرایش متراکم‌تر، قفل و بست دانه‌ای و اصطکاک داخلی را افزایش داده و در نتیجه، مقاومت مخلوط در برابر نفوذ را بهبود می‌بخشد. این مکانیزم اصلاح دانه‌ای و کاهش نسبی تخلخل، با شواهد ریزساختاری ارائه‌شده در شکل ۷ نیز سازگاری دارد.

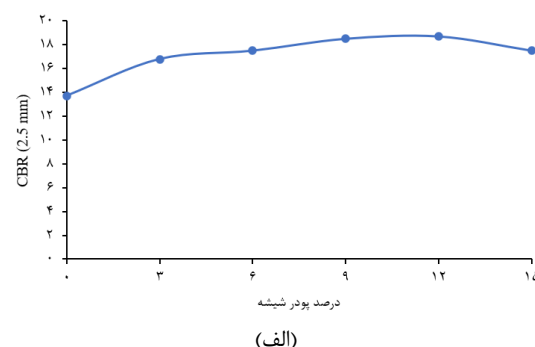
با این حال، در درصد ۱۵ پودر شیشه، مقدار CBR کاهش می‌یابد. این افت عملکرد، ناشی از غلبه رفتار دانه‌ای، غیرچسبنده و غیرپلاستیک ذرات شیشه بر ماتریس خاک پایه است. در این شرایط، کاهش سهم

¹⁶- Interlocking

تنش‌های موضعی می‌شود؛ در نتیجه، ظرفیت باربری مخلوط نسبت به مقدار بهینه کاهش می‌یابد.



ذرات رسی و تضعیف پیوستگی مخلوط، همراه با افزایش تماس مستقیم شیشه با شیشه، موجب تسهیل لغزش بین ذره‌ای و کاهش توان مجموعه در تحمل و توزیع



شکل ۹- تغییرات CBR با درصد‌های مختلف پودر شیشه (الف) مقدار اندازه‌گیری شده و (ب) مقادیر نرمال شده نسبت به خاک پایه

۵-۶- تأثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری

با توجه به نمودار شکل ۱۰، افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری در درصد‌های مختلف پودر شیشه بازیافتی حاصل هم‌افزایی سه مکانیزم اصلی اثر پرکنندگی، قفل و بست ذرات و واکنش‌های ژل‌ساز وابسته به زمان عمل‌آوری است. در نمونه‌های بدون عمل‌آوری، ذرات ریز و سخت پودر شیشه با پر کردن حفرات بین ذرات خاک باعث کاهش تخلخل و افزایش دانسیته خشک شده و هم زمان به دلیل زاویه‌دار بودن، درگیری مکانیکی و اصطکاک داخلی را افزایش می‌دهند؛ بنابراین بخشی از افزایش اولیه مقاومت را می‌توان به بهبود فیزیکی ریزساختار نسبت داد. با گذشت زمان عمل‌آوری (۲۸ و ۶۰ روز)، به علت حل‌شدن تدریجی سیلیس/آلومینای موجود در سطح ذرات شیشه در محیط قلیایی و برهم‌کنش آن با یون‌های موجود در خاک، محصولات ژل‌مانند سیلیکاتی و آلومینوسیلیکاتی (ژل‌های اتصال‌دهنده) به تدریج تشکیل و رشد می‌کنند؛ این ژل‌ها با پل‌زنی بین ذرات، پر کردن حفرات ریزتر و ایجاد پیوندهای داخلی، ساختار را یکپارچه‌تر کرده و موجب افزایش بیشتر مقاومت در سنین بالاتر می‌شوند. این فرآیند تکاملی و متراکم‌تر شدن اسکلت خاک با افزایش سن عمل‌آوری، با مشاهدات ریزساختاری ارائه شده در شکل ۷ و همچنین تغییرات نسبت‌های عنصری در نتایج EDS (شکل ۱۱) که

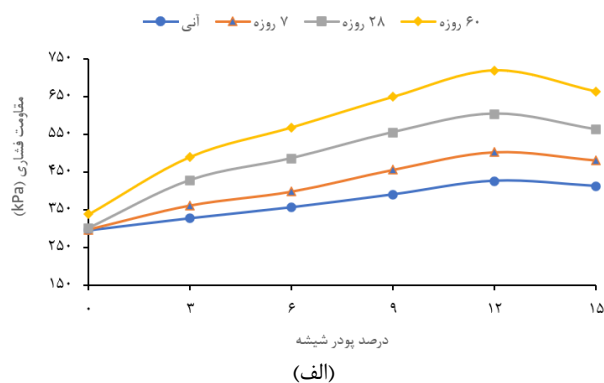
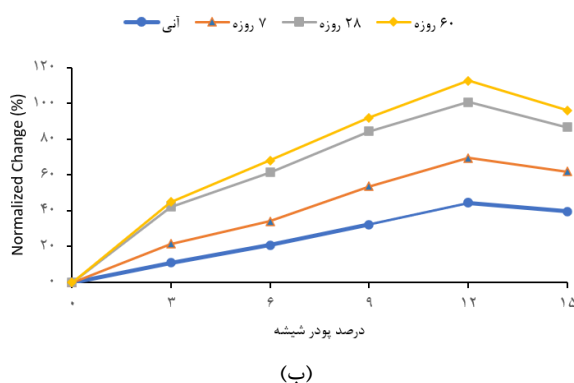
نتایج ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۱۰- الف نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها، چه بدون عمل‌آوری و چه با عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۶۰ روزه، با افزایش مقدار پودر شیشه تا حدود ۱۲ درصد افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی داشته است. بیشترین مقدار بهبود مقاومت در نمونه‌های حاوی ۱۲ درصد پودر شیشه مشاهده شد؛ به گونه‌ای که در این درصد بهینه، مقاومت بدون عمل‌آوری حدود ۴۲ درصد، مقاومت ۷ روزه حدود ۶۷ درصد، مقاومت ۲۸ روزه حدود ۱۰۰ درصد و مقاومت ۶۰ روزه حدود ۱۴۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که زمان عمل‌آوری نقش مؤثری در افزایش مقاومت فشاری دارد.

همان‌گونه که در شکل ۱۰- ب مشاهده می‌شود، در درصد بهینه پودر شیشه (۱۲ درصد)، افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نرمال‌شده تا سن عمل‌آوری ۲۸ روز قابل‌توجه است؛ با این حال، در بازه ۲۸ تا ۶۰ روز مقدار افزایش مقاومت به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که بخش عمده واکنش‌های پوزولانی و تشکیل محصولات سیمانی‌کننده در سامانه خاک-شیشه عمدتاً در ۲۸ روز نخست رخ داده و پس از آن، فرآیند به سمت کاهش نرخ واکنش حرکت کرده است.

نشان‌دهنده مشارکت ذرات شیشه در واکنش‌های درازمدت است، همخوانی دارد.

جدول ۵- نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها در درصد‌های مختلف پودر شیشه و زمان‌های عمل‌آوری مختلف (واحد kPa)

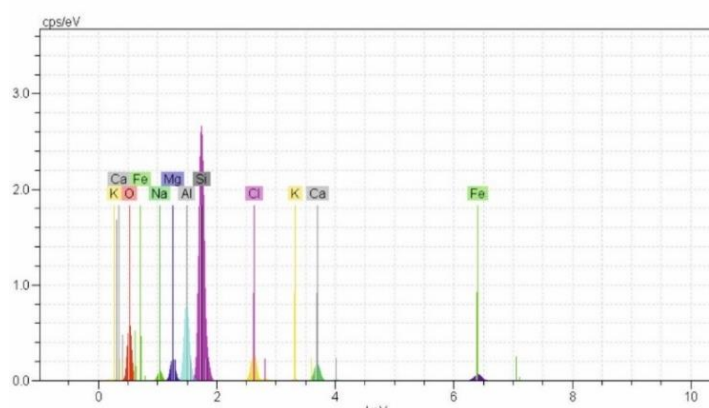
زمان عمل‌آوری	درصد پودر شیشه افزودنی					
	صفر	۳	۶	۹	۱۲	۱۵
آنی	۲۹۵	۳۲۷	۳۵۶	۳۹۰	۴۲۶	۴۱۲
۷ روزه	۲۹۷	۳۶۱	۳۹۸	۴۵۶	۵۰۳	۴۸۱
۲۸ روزه	۳۰۱	۴۲۸	۴۸۶	۵۵۵	۶۰۴	۵۶۲
۶۰ روزه	۳۳۸	۴۹۰	۵۶۸	۶۴۹	۷۱۹	۶۶۳



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری با درصد‌های مختلف پودر شیشه در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت (الف) مقدار اندازه‌گیری شده و (ب) مقادیر نرمال شده نسبت به خاک پایه

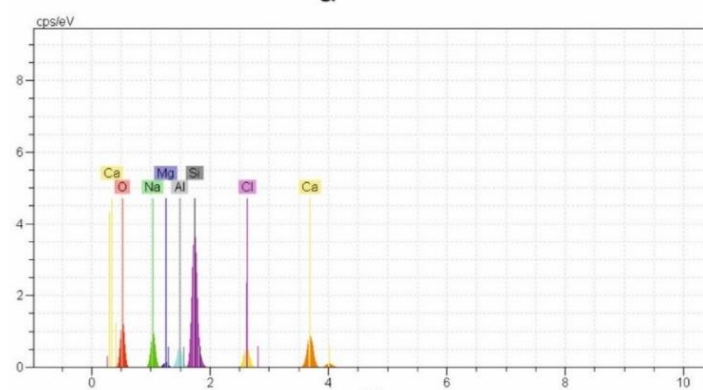
فعال‌ساز، واکنش‌های انحلال پوزولانی با سرعت به مراتب کمتری پیش می‌روند. از سوی دیگر، نتایج نشان دادند که استفاده از مقادیر بالاتر پودر شیشه (مانند ۱۵ درصد) موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. علت این کاهش آن است که پودر شیشه یک ماده بدون خاصیت چسبندگی ذاتی است و تنها بخشی از آن در درصد‌های پایین‌تر وارد واکنش‌های پوزولانی می‌شود. اما در مقادیر بالاتر از حد بهینه، مقدار مازاد پودر شیشه در واکنش‌ها شرکت نکرده و به دلیل کاهش چسبندگی در سطح تماس ذرات خاک و شیشه، موجب افت انسجام مخلوط می‌گردد. در نتیجه، افزودن ۱۵ درصد پودر شیشه باعث کاهش انسجام و در پی آن کاهش مقاومت فشاری خاک شده است. این نتایج با مطالعات بلایی و همکاران، جاناکچی و همکاران و ابراهیم و همکاران همخوانی و مطابقت دارد [۱۴، ۱۷ و ۳۲].

اگرچه روند صعودی مقاومت فشاری تک‌محوری قابل توجه است، اما در مقایسه با پژوهش‌هایی که از فعال‌سازهای قلیایی قوی بهره برده‌اند، تفاوت محسوسی نشان می‌دهد. به طور مثال، محمدزاده و همکاران گزارش کردند که افزودن ۱۵ درصد پودر شیشه همراه با محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) ۳ مولار، مقاومت ۲۸ روزه را تا ۳۵ برابر نسبت به خاک پایه افزایش می‌دهد. علت اصلی این تفاوت در عملکرد مکانیکی را می‌توان به سطح pH حاکم بر محیط واکنش نسبت داد. در غیاب فعال‌سازهای قلیایی قوی، پودر شیشه در ترکیب با آب تنها قادر است pH محیط منفذی را به محدوده ۱۰ تا ۱۱ برساند که شرایط فعال‌سازی ضعیفی را فراهم می‌کند [۲۱]. در حالی که حضور فعال‌سازهای قوی مانند NaOH با بالا بردن ناگهانی pH (فراتر از ۱۳) منجر به انحلال سریع چارچوب آلومینوسیلیکاتی و تسریع در تشکیل فازهای چسباننده قوی می‌شود، در سیستم بدون



Spectra: SMPLE S-0-EDS A.spx

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	39.18	59.23	72.45
Sodium	K series	0.89	1.35	1.15
Magnesium	K series	1.52	2.29	1.85
Aluminium	K series	4.85	7.33	5.32
Silicon	K series	15.14	22.88	15.95
Chlorine	K series	1.93	2.92	1.61
Potassium	K series	0.03	0.05	0.02
Calcium	K series	1.32	1.99	0.97



Spectra: SMPLE SG12-60-EDS B.spx

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	42.36	65.31	77.10
Sodium	K series	3.97	6.11	5.00
Magnesium	K series	0.59	0.92	0.71
Aluminium	K series	1.95	3.00	2.09
Silicon	K series	10.85	16.73	11.26
Chlorine	K series	1.08	1.67	0.88
Calcium	K series	4.06	6.25	2.92

شکل ۱۱- طیف های EDS نمونه a: S-0 (خاک پایه) و نمونه b: SG12-60 (خاک بهسازی شده با درصد شیشه ۱۲ درصد و زمان

عمل‌آوری ۶۰ روز)

۷-۵- تأثیر پودر شیشه بر ویژگی های تحکیمی خاک

همچنین، تأثیر زمان عمل‌آوری بر کاهش C_c کاملاً مشهود است. در هر درصد ثابت از ماده افزودنی، با افزایش زمان عمل‌آوری از صفر به ۶۰ روز، مقدار شاخص تراکم به طور چشمگیری افت می‌کند به‌طوری که میزان شاخص فشردگی در درصد بهینه پودر شیشه برای نمونه‌های بدون زمان عمل‌آوری ۲۷ درصد و برای نمونه‌هایی با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز و ۶۰ روز به ترتیب ۴۰ و ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در تراکم‌پذیری را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: نخست، جایگزینی ذرات نرم‌تر خاک با ذرات سخت‌تر و غیرقابل انعطاف‌تر شیشه که اسکلت صلب‌تری ایجاد می‌کنند و دوم، وقوع واکنش‌های پوزولانی. سیلیکای آمورف موجود در پودر شیشه در حضور رطوبت و در طول زمان، ژل‌های سیمانی تشکیل می‌دهد که حفرات خاک را پر کرده و ذرات را به یکدیگر متصل می‌کند، در نتیجه مقاومت خاک در برابر تنش‌های

ویژگی‌های تحکیمی خاک مورد مطالعه، قبل و بعد از بهسازی با درصدهای مختلف پودر شیشه، با استفاده از آزمایش اودومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات تحکیمی نمونه‌ها از طریق اعمال بارهای استاتیکی متوالی و ثبت تغییر شکل‌های حاصل تعیین شد. پارامترهای شاخص فشردگی (C_c)، شاخص تورم (C_s) محاسبه و در شکل ۱۲ نمایش داده شد. بررسی منحنی‌های مربوط به شاخص فشردگی نشان می‌دهد که افزودن پودر شیشه تأثیر قابل توجهی در کاهش تراکم‌پذیری خاک دارد. با افزایش درصد پودر شیشه تا حدود ۱۲ درصد، مقدار C_c در تمامی زمان‌های عمل‌آوری روند نزولی پیوسته‌ای را تجربه می‌کند.

سایر محققین نظیر ابراهیم و همکاران مطابقت دارد [۳۲].

۶- مطالعات ریزساختاری

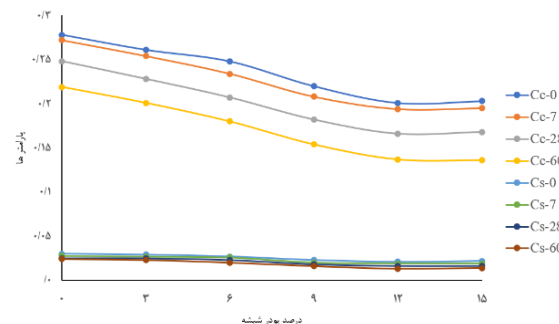
به منظور بررسی اثر پودر شیشه و زمان عمل‌آوری بر ویژگی‌های ریزساختاری خاک، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^{17}) از نمونه خاک شاهد (S-0)، نمونه خاک بهسازی‌شده با ۱۲ درصد پودر شیشه و بدون زمان عمل‌آوری (SG12-0) و نمونه خاک بهسازی‌شده با ۱۲ درصد پودر شیشه پس از ۶۰ روز عمل‌آوری (SG12-60) تهیه و مقایسه شد. دلیل انتخاب این نمونه‌ها، ارزیابی هم‌زمان تأثیر افزودن پودر شیشه و نیز نقش زمان عمل‌آوری در تحول ریزساختار خاک بود.

مطابق شکل ۷، نمونه خاک شاهد (S-0) دارای ساختاری نسبتاً متخلخل، ناهمگن و با آرایش نامنظم ذرات پولکی شکل است. در این نمونه، فضاهای خالی بین ذرات به وضوح مشاهده می‌شود و پیوستگی بین‌ذره‌ای محدود است. در مقابل، در نمونه (SG12-0) با افزودن ۱۲ درصد پودر شیشه، تا حدی کاهش منافذ و بهبود آرایش ذرات مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ریز شیشه باشد. با این حال، در نبود زمان عمل‌آوری کافی، ساختار نمونه هنوز به‌طور کامل متراکم و یکپارچه نشده است.

در نمونه (SG12-60)، تغییرات ریزساختاری بارزتر است. تصاویر SEM این نمونه کاهش محسوس تخلخل، افزایش یکنواختی سطح، و ایجاد ساختاری متراکم‌تر و پیوسته‌تر را نشان می‌دهند که در تصویر $V-f$ به وضوح قابل مشاهده است. این تحول می‌تواند ناشی از تداوم برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی و توسعه واکنش‌های پوزولانی در طول زمان عمل‌آوری باشد؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر اثر پرکنندگی اولیه پودر شیشه، تشکیل

فشاری افزایش و نشست کاهش می‌یابد. کاهش شاخص فشردگی (C_c) که نشان‌دهنده صلبیت بیشتر اسکلت خاک است، با مشاهده ریزساختار فشرده‌تر و پیوسته‌تر در نمونه‌های عمل‌آوری‌شده (شکل ۷)، به‌خوبی توجیه می‌شود.

از آنجا که واکنش‌های پوزولانی زمان‌بر هستند، گذشت زمان (به‌ویژه تا ۲۸ و ۶۰ روز) باعث تکمیل این واکنش‌ها، تشکیل پیوندهای سیمانی قوی‌تر و در نتیجه، ایجاد ساختاری متراکم‌تر و مقاوم‌تر در برابر نشست می‌شود.



شکل ۱۲- تأثیر پودر شیشه بر پارامترهای تحکیمی خاک مورد مطالعه (C_c): شاخص فشردگی و C_s : شاخص تورم و اعداد (صفر، ۲۸ و ۶۰) زمان عمل‌آوری می‌باشد)

با گذر از مرز ۱۲ درصد و رسیدن به ۱۵ درصد پودر شیشه، شیب تغییرات C_c تقریباً افقی شده و روند کاهشی متوقف می‌گردد. این امر نشان می‌دهد که ۱۲ درصد پودر شیشه، درصد بهینه برای این خاک است. افزودن بیش از حد پودر شیشه تأثیر مضاعفی در بهبود شرایط تحکیمی ایجاد نمی‌کند.

روند منحنی‌های مربوط به شاخص تورم در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که افزایش درصد پودر شیشه و همچنین افزایش زمان عمل‌آوری، باعث کاهش اندک و نامحسوس در شاخص تورم می‌شود. این یعنی بهسازی خاک با پودر شیشه، پتانسیل تورم و بازگشت خاک را نیز تا حدودی کاهش می‌دهد، هرچند تأثیر آن به اندازه تأثیر روی شاخص تراکم چشمگیر نیست. این یافته‌ها با نتایج

¹⁷- Scanning Electron Microscope

قطعی و تفکیک دقیق فازهای ژلی تشکیل شده، مستلزم بهره‌گیری از آزمون‌های مکمل خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودن پودر شیشه بازیافتی در مقادیر ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی نسبت به وزن خشک خاک، بر بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی یک خاک رسی بنتونیتی ارزیابی شد. بدین منظور، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت برشی، CBR، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که:

۱- با افزودن پودر شیشه، حدود اتربرگ خاک کاهش یافت؛ به‌طوری‌که در اختلاط ۱۵ درصد، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به‌ترتیب ۸/۶، ۸ و ۹/۵ درصد کاهش نشان دادند.

۲- بر اساس، نتایج آزمایش تراکم، افزودن پودر شیشه موجب کاهش رطوبت بهینه و افزایش دانسیته خشک حداکثر شد. مقدار بهینه پودر شیشه ۱۲ درصد به‌دست آمد؛ به‌طوری‌که در این حالت، دانسیته خشک حداکثر خاک حدود ۳/۵ درصد افزایش و رطوبت بهینه ۱۳/۳ درصد کاهش یافت. این رفتار را می‌توان به اثر پرکنندگی ذرات ریز شیشه و بهبود آرایش دانه‌ها نسبت داد؛ در حالی‌که در درصد‌های بالاتر، غلبه ماهیت دانه‌ای و وزن مخصوص کمتر پودر شیشه، از ادامه روند بهبود جلوگیری کرد.

۳- مقادیر مقاومت برشی و CBR خاک با افزودن پودر شیشه افزایش یافت و بیشترین بهبود در حدود ۱۲ درصد مشاهده شد. در این حالت، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و CBR به‌ترتیب ۳۵/۷، ۱۴/۷ و ۳۷ درصد افزایش یافتند؛ با این حال، در درصد ۱۵ افت عملکرد مشاهده شد که می‌تواند ناشی از غلبه رفتار غیرچسبنده و

محصولات ثانویه چسباننده نیز موجب پرشدن بخشی از فضاها و خالی و تقویت پیوند بین ذرات شده است. بنابراین، بهبود همگنی سطح و افزایش قفل و بست بین‌دانه‌ای در نمونه (SG12-60) با روند افزایشی نتایج مقاومت مکانیکی همخوانی دارد.

به‌منظور بررسی تغییرات شیمیایی همراه با بهسازی خاک، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS^{18}) برای نمونه شاهد بدون افزودنی (S-0) و نمونه بهسازی‌شده حاوی ۱۲ درصد پودر شیشه پس از ۶۰ روز عمل‌آوری (SG12-60) انجام شد. نتایج این تحلیل به‌صورت مقایسه‌ای برای ارزیابی تغییرات نسبی در ترکیب عنصری فاز زمینه و بررسی احتمال تشکیل محصولات ثانویه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آنالیز شبه‌کمی EDS نشان داد که نسبت اتمی Si/Al در نمونه شاهد (S-0) در حدود ۳ بوده که همراه با مقدار ناچیز سدیم و نسبت بسیار پایین Ca/Si (حدود ۰/۰۶)، بیانگر غلبه فازهای آلومینوسیلیکاتی اولیه خاک رس است [۳۳]. در مقابل، در نمونه بهسازی‌شده پس از ۶۰ روز عمل‌آوری (SG12-60)، افزایش نسبت‌های اتمی $Si/Al=5/39$ ، $Na/Al=2/39$ و $Ca/Si=0/26$ ثبت گردید. این تغییرات شیمیایی نمایانگر انحلال تدریجی ذرات پودر شیشه در محیط فعال‌شده و رهاسازی گونه‌های سیلیکاتی، سدیمی و کلسیمی در آب منفذی است که بستر لازم را برای واکنش‌های پوزولانی ثانویه فراهم می‌سازد.

بر این اساس، داده‌های حاصل از تحلیل توأم SEM/EDS با احتمال شکل‌گیری فازهای ژل‌مانند آلومینوسیلیکاتی و کلسیم‌دار ثانویه (نظیر ساختارهای مشابه با ژل‌های N-A-S-H و C-(N)-A-S-H) سازگاری دارد. با این حال، با توجه به ماهیت موضعی و محدودیت‌های ذاتی آزمون‌های نقطه‌ای SEM/EDS در ارزیابی سامانه‌های ناهمگن خاک-افزودنی، شناسایی

¹⁸- Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy

غیرپلاستیک شیشه و افزایش تماس مستقیم ذرات شیشه با یکدیگر باشد.

۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که با افزودن مقدار بهینه ۱۲ درصد پودر شیشه، مقاومت نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۶۰ روز به ترتیب ۲ و ۲/۴ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. هرچند این روند نشان‌دهنده اثر مثبت پودر شیشه است، اما میزان بهبود در مقایسه با سامانه‌هایی که با فعال‌سازهای قلیایی قوی مانند NaOH اصلاح شده‌اند، کمتر است. این تفاوت را می‌توان به قلیائیت محدود پودر شیشه در محیط بدون فعال‌ساز و وابستگی واکنش‌ها به زمان عمل‌آوری نسبت داد.

۵- نتایج تحکیم و مشاهدات SEM/EDS، در کنار یکدیگر، بیانگر آن است که انحلال تدریجی پودر شیشه می‌تواند به تشکیل محصولات ثانویه ژل‌مانند و چسباننده در بافت خاک منجر شود؛ با این حال، شناسایی قطعی نوع این فازها تنها با SEM/EDS امکان‌پذیر نیست و برای تأیید نهایی، انجام آزمون‌های تکمیلی ضروری است. از دیدگاه ژئوتکنیکی، این تغییرات ریزساختاری می‌توانند در بهبود رفتار تحکیمی و افزایش پیوستگی ذرات مؤثر باشند.

۶- به‌طور کلی، پودر شیشه در این خاک دو نقش اصلی ایفا کرد: نخست، نقش فیزیکی از طریق اثر پرکنندگی و کاهش تخلخل که در بهبود تراکم، مقاومت برشی و CBR مؤثر بود؛ و دوم، نقش شیمیایی/واکنشی محدود از طریق آزادسازی تدریجی گونه‌های سیلیکاتی و سدیمی که در بلندمدت می‌تواند به تقویت پیوندهای درونی و بهبود مقاومت فشاری کمک کند. بنابراین، عملکرد مطلوب این افزودنی حاصل هم‌افزایی اثرات کوتاه‌مدت فیزیکی و اثرات تدریجی ریزساختاری در سنین بالاتر است.

با وجود نتایج امیدوارکننده این پژوهش، تعمیم آن با محدودیت‌هایی همراه است؛ زیرا مطالعه حاضر تنها بر یک نوع خاک رسی بنتونیتی متمرکز بود و ارزیابی آن بر روی خاک‌های دیگر با ویژگی‌های دانه‌بندی، پلاستیسیته و کانی‌شناسی متفاوت انجام نشد. همچنین، به‌دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی، امکان شناسایی قطعی فازهای ثانویه با آزمون‌های پیشرفته‌تر فراهم نبود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر پودر شیشه بر انواع دیگر خاک‌ها، دوام بلندمدت و نیز آزمون‌های مکمل مانند XRD، FTIR و FESEM مورد بررسی قرار گیرد تا قابلیت تعمیم نتایج با دقت بیشتری ارزیابی شود.

References

- [1] Jawad T, Baqir A. Improvement of sandy soil properties by using bentonite. Kufa journal of Engineering. 2009; 1(1): 29-39.
- [2] Nath H, Kabir MH, Kafy AA, Rahaman ZA, Rahman MT. Geotechnical properties and applicability of bentonite-modified local soil as landfill and environmental sustainability liners. Environmental and Sustainability Indicators. 2023 Jun 1; 18: 100241. doi: 10.1016/j.indic.2023.100241
- [3] Scrivener KL, Kirkpatrick RJ. Innovation in use and research on cementitious material. Cement and concrete research. 2008 Feb 1; 38(2): 128-136. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025
- [4] Khale D, Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. Journal of materials science. 2007 Feb; 42(3): 729-746. doi: 10.1007/s10853-006-0401-4
- [5] Davidovits J. Geopolymer cement. A review. Geopolymer Institute, Technical papers. 2013 Jan; 21: 1-11.
- [6] Pascual AB, Tognonvi MT, Tagnit-Hamou A. Waste glass powder-based alkali-activated mortar. Int. J. Res. Eng. Technol. 2014 Aug; 3(13): 32-326.
- [7] Puertas F, Torres-Carrasco M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation. Cement and Concrete Research. 2014 Mar 1; 57: 95-104. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.12.005

- [8] Torres-Carrasco M, Palomo JG, Puertas F. Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de Construcción*. 2014 Mar 30; 64(314): e014. **doi: 10.3989/mc.2014.05213**
- [9] Vafaei M, Allahverdi A. High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. *Advanced Powder Technology*. 2017 Jan 1; 28(1): 215-222. **doi: 10.1016/j.appt.2016.09.034**
- [10] Torres-Carrasco M, Puertas FJ. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of cleaner production*. 2015 Mar 1; 90: 397-408. **doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.074**
- [11] Lai Z, Chen Y. Enhancing the mechanical and environmental performance of solidified soil using construction waste and glass micro-powder. *Heliyon*. 2024 Nov 30; 10(22): e40187. **doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40187**
- [12] Eberemu AO, Edeh JE, Gbolokun AO. The geotechnical properties of lateritic soil treated with crushed glass cullet. *Advanced Materials Research*. 2013 Dec 13; 824: 21-28. **doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.824.21**
- [13] Olufowobi J, Ogundoku A, Michael B, Aderinlewo O. Clay soil stabilisation using powdered glass. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2014 Oct; 9(5): 541-558.
- [14] Canakci H, Aram AL, Celik F. Stabilization of clay with waste soda lime glass powder. *Procedia engineering*. 2016 Jan 1; 161: 600-605. **doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.705**
- [15] Benny JR, Jolly J, Sebastian JM, Thomas M. Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2017; 6(5): 228-231.
- [16] Bilondi MP, Toufigh MM, Toufigh V. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and building Materials*. 2018 May 10; 170: 302-313. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049**
- [17] Blayi RA, Sherwani AF, Ibrahim HH, Faraj RH, Daraei A. Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*. 2020 Dec 1; 13: e00427. **doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00427**
- [18] Mohammadzadeh MA, Toufigh MM. Construction of recycled glass powder-based geopolymer and its application in resistance parameters to stabilize the clay. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2022 Jul 23; 54(5): 1885-1902. **doi: 10.22060/ceej.2021.19653.7306** [In Persian]
- [19] Ashiq SZ, Akbar A, Farooq K, Mujtaba H. Sustainable improvement in engineering behavior of Siwalik Clay using industrial waste glass powder as additive. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Jun 1; 16: e00883. **doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00883**
- [20] Ismael MM, Barwari MI, Ahmed AM, Aksoy HS. Improvement of Bentonite Soil Strength Using Glass Powder. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025 Dec 8; 15(6): 29208-29213. **doi: 10.48084/etasr.13247**
- [21] Disfani MM, Arulrajah A, Bo MW, Sivakugan N. Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. *Journal of Cleaner Production*. 2012 Jan 1; 20(1): 170-179. **doi: 10.1016/j.jclepro.2011.07.020**
- [22] ASTM D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2007.
- [23] ASTM D854-14. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2014.
- [24] ASTM D4318-17e1. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2017. **doi: 10.1520/D4318-17E01**
- [25] ASTM D698-78. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. West Conshohocken, PA: ASTM International. 1978.
- [26] ASTM D3080-04. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2012.
- [27] ASTM D1883-21. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021.
- [28] ASTM D1557-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2012.
- [29] ASTM D2166/D2166M-16. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2016.
- [30] ASTM D2435/D2435M. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2020.
- [31] Asiabanha A, Khamseh N, Hosseini Taleghani J. Bentonitic tuffs of the northern Qazvin: geochemical variations and genesis. *Kharazmi Journal of Earth Sciences*. 2026 Jun 8; 8(2): 143-163. **doi: 10.22034/KJES.2023.8.2.101572**

- [32] Ibrahim HH, Mawlood YI, Alshkane YM. Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021 Apr 21; 15(4): 496-503. **doi: 10.1080/19386362.2019.1647644**
- [33] He J. Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College Doctoral Dissertations. 2012; 164.