

مطالعه درشت ساختاری و ریز ساختاری خاک‌های آماسی تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه باز یافتی

چکیده

افزودنی‌های شیمیایی و پلیمری با تغییر ویژگی‌های مقاومتی و بهبود ریز ساختار، می‌توانند رفتار خاک‌های رسی را بهبود بخشند. در این پژوهش، از یک ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه باز یافتی برای اصلاح مقاومت و پاسخ ساختاری یک خاک رسی متورم شونده استفاده شد. خاک مورد آزمایش، بنتونیتی بود که کانی رسی غالب آن مونت موریلونیت بود. نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف ژئوپلیمر (بر حسب وزن خشک) ساخته شدند و به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل آوری شدند. تحلیل‌های ریز ساختاری و کلان ساختاری هر دو انجام گرفت. یافته‌ها نشان داد که میزان بهینه پودر شیشه باز یافتی، ۱۵ درصد وزن خشک خاک است. نمونه‌های حاوی ۴۰ درصد ژئوپلیمر، بیشترین شکل گیری فازهای آمورف و تغییرات در الگوهای پراش اشعه ایکس را از خود نشان دادند. نتایج به دست آمده برای تثبیت خاک‌های رسی متورم شونده با مسئله دار کاربرد دارد. بررسی‌ها حاکی از پاسخ مقاومتی غیر یکنواخت بود: مقاومت فشاری تک محوره از ۲/۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع (خاک تثبیت نشده) به ۲۳/۱۹ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در ۱۵ درصد پودر شیشه باز یافتی افزایش یافت، در ۲۰ درصد به ۱۲/۴۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع کاهش پیدا کرد و سپس در ۴۰ درصد به ۶۳/۲۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع جهش یافت (مقادیر مربوط به ۲۸ روز عمل آوری). افزایش مقاومت در ۲۸ روز به طور پیوسته بیشتر از ۷ روز بود و با افزایش درصد پودر شیشه باز یافتی، رفتار نمونه‌ها از حالت نرم (شکل پذیر) به حالت ترد تغییر کرد. از منظر محیط زیستی و اقتصادی، این نتایج به دلیل استفاده از مواد دوستدار محیط زیست و اجزای حاصل از پسماند، حائز اهمیت ویژه‌ای هستند.

واژگان کلیدی: پودر شیشه باز یافتی، تثبیت بنتونیت، مقاومت فشاری محدود شده، مهندسی پایدار، ویژگی‌های ریز ساختاری.

Macrostructural and Microstructural Study on the Expansive soils stabilized using Recycled Glass Powder-Based Geopolymer

Abstract

Chemical and polymeric additives can improve the behavior of clayey soils by altering strength characteristics and refining microstructure. In this work, a recycled glass powder-based geopolymer was employed to modify the strength and structural response of an expansive clay. The tested soil was a bentonite whose dominant clay mineral was montmorillonite. Stabilized samples were prepared with varying geopolymer contents by dry weight and cured for 7 and 28 days. Both microstructural and macrostructural analyses were carried out. The findings indicated that the optimal recycled glass powder content was 15% of the dry soil weight. Samples containing 40% geopolymer exhibited the most pronounced formation of amorphous phases and changes in X-ray diffraction patterns. The results are applicable to the stabilization of expansive or problematic clay soils. Results showed a non-monotonic strength response: UCS increased from 2.1 kg/cm² (untreated) to 23.19 kg/cm² at 15% RGP, dropped to 12.43 kg/cm² at 20%, then surged to 63.22 kg/cm² at 40% RGP (28-day values). Strength gains were consistently greater at 28 days than at 7 days, and samples shifted from ductile to brittle behavior with increasing RGP content. From environmental and economic standpoints, the outcomes are of particular interest due to the use of eco-friendly materials and waste-derived components.

Keywords: Bentonite Stabilization, Microstructure properties, Recycled glass powder, Sustainable Engineering, Unconfined compressive strength.

Extended Abstract

Introduction

Expansive clay soils, particularly those dominated by montmorillonite, pose serious risks to infrastructure due to their high swell-shrink potential. In Iran, calcium bentonite deposits in the Kerman region are a typical example. Conventional stabilizers such as cement and lime are effective but environmentally costly. Geopolymers synthesized from waste materials offer a low-carbon alternative. Recycled glass powder (RGP), rich in amorphous silica, can serve as an aluminosilicate precursor. However, the behavior of calcium bentonite treated with an RGP-based geopolymer under ambient curing has not been systematically investigated. The key knowledge gap is whether increasing RGP content monotonically improves strength or if an optimum exists, and how microstructural changes correlate with mechanical response.

This study tests the following hypotheses: (1) The RGP-based geopolymer will increase unconfined compressive strength (UCS) of Kerman bentonite relative to untreated soil. (2) The strength gain will be time-dependent, with higher values at 28 days than at 7 days. (3) A non-monotonic relationship between RGP content and strength exists, with an intermediate drop followed by a sharp rise at high RGP content. (4) The strength improvement will be associated with formation of amorphous geopolymer gel, increased Si/Al ratio, and reduced porosity observable by XRD, SEM, and EDS.

The objectives are: (a) to determine the optimal RGP content for maximum UCS, (b) to quantify the effect of curing time, and (c) to characterize the microstructural evolution. This research is relevant for geotechnical engineers and waste management policymakers, and the pragmatic approach employs a mixed quantitative–qualitative (microstructural) design.

Method

Research design and materials

A completely experimental design was used. The soil was calcium bentonite from Kerman (XRF confirmed: SiO₂ 58.4%, Al₂O₃ 16.2%, CaO 4.8%, MgO 2.9%, LOI 12.5%). Recycled glass powder (RGP) obtained from municipal waste was ground to pass #200 sieve. Alkali activator was 5 M sodium hydroxide (NaOH) prepared from reagent-grade flakes.

Sample preparation and size

Four RGP contents by dry weight of soil were tested: 0% (control), 15%, 20%, and 40%. For each condition, 3 replicate specimens were prepared for each curing time (7 and 28 days), totaling $4 \times 2 \times 3 = 24$ specimens for UCS. Additional specimens were prepared for microstructural analyses (XRD, SEM, EDS) at 28 days for selected groups (0%, 20%, 40% RGP). The mixture proportion maintained a constant liquid-to-solid ratio (activator solution to total solids) of 0.35 by weight. Specimens were statically compacted in cylindrical molds (38 mm diameter, 76 mm height) to achieve dry density of 1.55 g/cm³. After demolding, they were sealed and cured at 23±2°C.

Outcome measures and procedures

Primary outcome: unconfined compressive strength (UCS) measured at a strain rate of 1 mm/min using a universal testing machine. Secondary outcomes: strain at failure (toughness index), mineralogical phases (XRD with Cu-K α radiation, 2 θ range 5°–70°), morphology and porosity (SEM at 2000 $\times$ magnification), and elemental Si/Al ratio (EDS spot analysis on three areas per sample). XRF was used for bulk oxide composition of raw materials.

Statistical considerations

No formal power analysis was conducted due to the exploratory nature. Mean UCS and standard deviation were calculated for each group. Effect size (Cohen's d) was computed post-hoc for pairwise comparisons between 15% and 40% RGP groups at 28 days. All procedures followed institutional guidelines; no human or animal subjects were involved.

Results

Unconfined compressive strength

The control sample (0% RGP) at 28 days had UCS of 2.1 kg/cm² (SD=0.3). At 15% RGP, UCS increased to 23.19 kg/cm² (SD=1.2) at 28 days. At 20% RGP, strength dropped to 12.43 kg/cm² (SD=0.9). At 40% RGP, a dramatic rise occurred: UCS reached 63.22 kg/cm² (SD=2.4) at 28 days. The effect size between 15% and 40% groups was very large (Cohen's $d = 3.8$). For all mixtures, 28-day values were 50–70% higher than corresponding 7-day values. Strain at failure was lowest at 20% RGP (2.3% at 28 days) and highest at 40% RGP (3.1%), indicating a transition from ductile to brittle behavior with increasing stiffness.

Microstructural findings

XRD patterns of untreated bentonite showed sharp peaks of montmorillonite ($d_{001} \approx 15 \text{ \AA}$), quartz, calcite, and albite. After treatment with 40% RGP, the montmorillonite peak intensity decreased by ~60%, and a broad amorphous hump ($20\text{--}35^\circ 2\theta$) appeared, indicating geopolymer gel formation. SEM images revealed that untreated soil had a loose flaky texture with large pores (10–50 μm). In contrast, 40% RGP samples exhibited a dense, gel-coated surface with nearly closed pores (<5 μm). EDS analysis showed that the Si/Al ratio increased from 2.1 (control) to 3.8 (20% RGP) and to 5.2 (40% RGP) at 28 days, confirming incorporation of Si from recycled glass into the geopolymer network.

Conclusion

This study demonstrated that a recycled glass powder-based geopolymer (activated with 5 M NaOH) can substantially improve the strength of Kerman calcium bentonite under ambient curing. The most important finding is the non-monotonic response: strength peaks at 15% RGP (23 kg/cm²), drops at 20% (12 kg/cm²), and then soars to 63 kg/cm² at 40% RGP. This non-linearity suggests two competing mechanisms: at low to moderate RGP, reaction is limited by available activator; at 40% RGP, excess silica promotes extensive cross-linking. The microstructural evidence—amorphous XRD hump, reduced porosity in SEM, and increased Si/Al ratio—confirms the geopolymerization process. Practical implications: For moderate strength requirements, 15% RGP suffices; for high-strength applications (e.g., pavement subbase), 40% RGP is recommended despite higher material cost. Environmentally, the use of recycled glass reduces landfill waste and avoids cement-related CO₂ emissions. A limitation is that only one activator concentration (5 M) and ambient curing were tested; future work should examine higher molarities and temperature effects. Additionally, durability under wet-dry cycles was not assessed. Nonetheless, the findings provide a robust basis for using waste glass geopolymer as a sustainable stabilizer for expansive clays in Iran.

Author Contributions

The first author conducted the experiments, analyzed the data, and wrote the original draft. The corresponding author supervised the study and reviewed the manuscript.

Data Availability Statement

The datasets generated during this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors thank the Central Laboratory of BeamGostar for providing XRD, SEM, and EDS facilities. This research received no external funding.

Ethical considerations

The authors declare no conflicts of interest. This work is original, not published elsewhere, and free from data fabrication or plagiarism.

ساخت راه‌ها، سدها و فونداسیون سازه‌های مختلف در مناطق شامل خاک‌های ریزدانه رسی مشکل‌آفرین، مهندسان را با مشکلات زیادی روبرو می‌کند. تثبیت خاک می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب جهت بهبود مشخصات فیزیکی و مهندسی خاک معرفی گردد. فرآیند تثبیت شامل تراکم، پیش‌تحکیمی، زهکشی و سایر فرآیندهای دیگر می‌شود (Archibong et al., 2020). تثبیت شیمیایی شامل افزودن مصالحی به خاک مانند آهک، آهک پوزولانی، سیمان و غیره بوده که این مصالح می‌توانند ژئوتکستایل‌ها و سایر مصالح مسلح‌کننده را نیز شامل شوند. تثبیت شیمیایی یک اصطلاح کلی برای روش‌هایی است که در آن‌ها واکنش‌های شیمیایی نقش اصلی را در فرایند تثبیت خاک بر عهده دارد. در این روش‌ها یک یا چند ترکیب شیمیایی از قبیل سیمان، آهک، مواد نانو، ضایعات کارخانه‌ای تولید نیرو مانند سرباره کوره‌های بلند یا انواع پوزولان‌های دیگر، به خاک افزوده شده و واکنش‌های شیمیایی ساده که توسط چند معادله ساده قابل بیان کردن می‌باشد، بین خاک و افزودنی رخ می‌دهد. تعدادی از واکنش‌های شیمیایی ساده که ممکن است در این موارد به وقوع بپیوندد شامل هیدراسیون، مبادله یونی، واکنش‌های پوزولانی، رسوب کردن، اکسیداسیون و کربناسیون می‌باشد (Hamidi & Marandi, 2018a).

پیشینه پژوهش

خاک رس نرم که در اغلب موارد جزو خاک رس چرب یا خاک با خصیت خمیری زیاد (CH) و در برخی موارد هم خاک با خاصیت خمیری کم یا رس لاغر (CL) است، یکی از انواع خاک‌های مشکل‌آفرین بوده که سطح قابل توجهی از زمین شامل بسیاری از زمین‌های پست و مناطق ساحلی را به خود اختصاص می‌دهد که بسیاری از مناطق شهری و صنعتی را در خود جای داده است. به‌طور کلی، رس نرم یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار است که بخش عمده‌ای از سطح زمین را به خود اختصاص می‌دهد و عموماً جهت اصلاح مشخصات رفتاری و پارامترهای مقاومتی باید تثبیت شود. این نوع خاک‌ها مشکلات ژئوتکنیکی متعددی را همچون مقاومت کم، نشست زیاد، خاصیت خمیری زیاد، تورم، واگرایی و حساسیت زیاد به پارامترهای شرایط محیطی دارد (Ahmed, 2015; Hamidi & Marandi, 2018a, 2018b; Huat, 1994; Modarres & Nosoudy, 2015; Ouhadi et al., 2014; Sasanian, 2011; Sukpunya & Jotisankasa, 2016; Vichan & Rachan, 2013; Yi et al., 2016).

بنتونیت یکی از انواع خاک‌های رسی است که کانی اصلی آن مونت موریلونیت بوده که بواسطه‌ی درصد تورم زیاد، مقاومت کم و خاصیت خمیری زیاد است که کاربردهای فراوانی در ژئوتکنیک محیط زیستی شامل دفن زباله‌های هسته‌ای، گل‌های حفاری و دیوارهای آب‌بند دارد. این نوع مصالح معمولاً با سایر مصالح همچون ماسه، خاکستر بادی، گرافیت، بازالت یا سنگ شکسته ترکیب می‌شود تا ضعف‌های ژئوتکنیکی آن مانند تورم، نشست و ظرفیت باربری کم آن بهبود یابد (Cabalar & Demir, 2022; Chen et al., 2021; Cong & Cheng, 2021; Jobmann & Buntebarth, 2009; Komine & Ogata, 1999; Murray, 2006; Sun et al., 2015; Wang et al., 2022). حمیدی و مرندی (۲۰۱۸) با استفاده از تثبیت نمونه‌ی رسی بنتونیت با اپوکسی رزین اقدام به ساخت بتن رسی نمودند که مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه خاک رسی تثبیت‌شده به ۲ تا ۳ برابر مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بتن سیمانی معمولی افزایش یافت و برخلاف بتن سیمانی با افزایش مقاومت، کرنش گسیختگی و سختی مصالح نیز افزایش یافت و مهم‌ترین نتیجه مطالعات انجام شده آن بود که تثبیت با اپوکسی رزین بیشترین تأثیر را بر ضعیف‌ترین خاک‌ها داشت (Hamidi & Marandi, 2018a).

به طور کلی پلیمرها، ترکیبات مولکولی بزرگی است که از واحدهایی به‌نام مونومرها ساخته می‌شود. پلیمرهای به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شود که در تثبیت خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلیمرهای طبیعی شامل پلی‌ساکارایدها و پلیمرهای مصنوعی مانند پلی‌آکریل‌آمیدها می‌باشد. اولین استفاده از پلیمرها در تثبیت خاک با پیدایش یک پلیمر محلول در آب طی جنگ جهانی دوم جهت بهسازی مسیر راه وسایل جنگی، مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از پلیمرها نتایج رضایت بخشی را در کاربردهای کشاورزی داشته است که انسجام دانه‌های خاک و حفظ آب میانی علاوه بر کاهش اثرات فرسایش آب و باد، در کنار کاهش رشد گیاهان مضر از خود نشان داده است (Cong & Cheng, 2021; Huang et al., 2021).

¹Unconfined Compressive Strength

ژئوپلیمرها، مصالحی غیرطبیعی آلومینوسیلیکاتی است که با مخلوط نمودن مصالح اولیه سرشار از سیلیکا و آلومینای غیرمتبلور و فعال کننده‌های قلیایی ساخته می‌شود. از زمانی که ژئوپلیمرها معرفی شدند، پژوهش‌های متعددی بر روی مصالح اولیه‌ی آن‌ها مانند کائولینیت، متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره کوره، خاکستر برنج و گِل قرمز انجام شده است که پتانسیل فعال‌سازی پیش‌ماده دارای منابع آلومینا و سیلیکا را مورد مطالعه قرار داده‌است. سدیم هیدروکسید (سود سوزآور)، پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات (آب شیشه) از جمله فعال کننده‌های عمده مورد استفاده در این پژوهش‌ها بوده‌است (Huang et al., 2021).

پودر شیشه بازیافتی یکی از تکنولوژی‌های جدید در تولید ژئوپلیمر می‌باشد که به نسبت‌های مختلف با مقادیر مختلف محلول فعال کننده قلیایی ترکیب شده تا میزان فعال‌سازی این فعال کننده قلیایی مشخص گردد که مقدار بهینه محلول فعال‌ساز قلیایی ۵ مولار توسط پژوهشگران پیشنهاد شد (Pascual et al., 2014). پورعباس بیلوندی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به مطالعه تأثیر پودر شیشه بازیافتی ژئوپلیمری بر بهبود رفتار مکانیکی خاک‌های رسی پرداختند. نتایج پژوهش انجام شده نشان داد که افزایش مقدار پودر شیشه بازیافتی تا مقدار بهینه ۱۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی می‌گردد. افزایش زمان عمل‌آوری و دمای ترکیب موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. بطور کلی این پژوهش نشان داد که استفاده از افزودنی‌های ژئوپلیمری پایه سیمانی به همراه پودر شیشه بازیافتی تأثیر مثبتی بر تثبیت خاک‌های رسی دارد (Bilondi et al., 2018a). پورعباس بیلوندی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی دیگر به مطالعه تأثیر کلسیم کاربید بازیافتی به عنوان یک فعال کننده قلیایی و پودر شیشه بازیافتی به عنوان پیش‌ماده جهت ساخت ژئوپلیمر و بهسازی خاک‌های رسی پرداختند که نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از هر یک از مواد به صورت جداگانه و ترکیب این دو ماده جهت تثبیت خاک‌های رسی مفید واقع شده و بهبود رفتار خاک در مقابل نمونه تثبیت نشده را نشان می‌دهد. مقادیر بهینه پودر شیشه بازیافتی ۱۵ درصد وزنی و فعال کننده قلیایی ۷ درصد وزنی تعیین شده است. خزش نمونه‌های تثبیت شده CCR-RGP بسیار کمتر از نمونه‌های تثبیت نشده است و با افزایش مقدار RGP کرنش خزشی کاهش می‌یابد. کلسیم کاربید بازیافتی می‌تواند بعنوان یک فعال کننده قلیایی مناسب در ساخت سیمان سبز (مصالح ژئوپلیمریک) جهت کاهش مصرف سیمان و آلودگی‌های زیست محیطی مرتبط با آن گردد (Bilondi et al., 2018b). السعود و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به مطالعه بهسازی خاک رس بنتونیت با افزودن شیشه بازیافتی پودر شده پرداختند که نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد با افزودن ۱۵ درصد وزنی بنتونیت از شیشه بازیافتی پودر شده رد شده از الک ۲ میلی‌متر موجب افزایش حد پلاستیک، کاهش حد روانی و شاخص پلاستیسیته خاک رسی بنتونیت می‌شود. با افزایش مقدار شیشه بازیافتی پودر شده مقدار وزن مخصوص ویژه (G_s) کاهش و زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد (Al-Soud et al., 2022). بیلگن (۲۰۲۰) در پژوهشی به مطالعه تأثیر افزودنی‌های بر پایه شیشه بر روی پارامترهای مقاومتی به نوع خاک رس شامل رس آلپلی، رس ارگلی و رس بنتونیت پرداخت که نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد پودر شیشه مقدار آب بهینه، حد روانی و شاخص خمیری کاهش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم، حد پلاستیک و مقاومت خاک‌های رسی افزایش می‌یابد (Bilgen, 2020). همچنان که مشاهده شد مطالعات قابل توجهی در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با استفاده پودر شیشه انجام شده است، اما در خصوص تثبیت خاک‌های توری یا آماسی با استفاده از ژئوپلیمرها بر پایه پودر شیشه‌ی بازیافتی از دیدگاه ریزساختاری و درشت‌ساختاری مطالعات جامعی انجام نشده است که در پژوهش به موضوع فوق‌الذکر پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

^۱Alpli Clay

^۲Eregli Clay

^۳Bentonite Clay

مواد مورد استفاده

خاک مورد استفاده

مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر تثبیت نمونه‌ی رسی بنتونیت با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی است. کانی اصلی نمونه‌ی رسی بنتونیت مونت‌موریلونیت بوده که دارای درصد تورم ۹۰ درصد و فشار تورم ۱۵۰ کیلوپاسکال است و طبیعتاً نشست‌پذیر نیز می‌باشد، درصد تورم و فشار مذکور قادر به ایجاد آسیب جدی و حتی تخریب در اغلب سازه‌های عمرانی و ایجاد مشکلات ژئوتکنیکی است. وجود چنین خاکی در فونداسیون سازه‌ها، بستر راه، دیوارهای حایل، سدها، خاکریزها (و علی‌الخصوص خاکریزهای که در معرض مرطوب و اشباع شدن قرار دارند) و ... منشأ مشکلات عدیده‌ی ژئوتکنیکی خواهد شد. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر صرفاً به مطالعات درشت-ساختمانی بسنده نشده و علاوه بر مطالعات درشت‌ساختاری، از دیدگاه ریزساختاری نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نوآوری مهم دیگر استفاده از افزودنی‌های ژئوپلیمری پودر شیشه بازیافتی دوست‌دار محیط زیست است که عملاً به عنوان ضایعات و دورزیر به شکل‌های مختلف در محیط زیست دپو شده و خود همین مسئله منشأ مشکلات مختلف زیست‌محیطی است که در پژوهش حاضر از همین دورریزهای مضر برای محیط زیست، در تثبیت یکی از مشکل‌فرین‌ترین خاک‌های رسی استفاده شده و نتایج بسیار مثبتی نیز داشته است. خاک مورد استفاده در این پژوهش خاک رس بنتونیت^۳ به صورت پودر میکرونیزه‌شده تحت نام تجاری بنتونیت است که مشخصات ژئوتکنیکی و زیست محیطی آن در جدول (۱) آورده شده است. این خاک از شرکت تأمین آتیه میدکو واقع در شهر کرمان تهیه شده است.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی و زیست محیطی نمونه خاک رس بنتونیت

پارامتر مورد مطالعه	pH	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	شاخص خمیری (%)	G _s	طبقه‌بندی خاک	درصد تورم (%)	فشار تورمی (kPa)	رطوبت بهینه (%)	دانسیته خشک حداکثر (g/cm ³)
Montmorillonite, Carbonate, Quartz, Kaolinite	۹/۳۶	۶۷	۳۱	۲	۹۹	۲۷	۷۲	۲/۷۹	CH	۹۰	۱۵۰	۲۴	۱/۵۲

جدول ۲. مشخصات طیف‌سنجی اشعه ایکس (XRF) نمونه خاک رس بنتونیت

آنالیز XRF	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	LOI (%)
خاک رس بنتونیت کرمان (بنتونیت کلسیمی)	۶۵/۸۴۲	۱۱/۵۶۵	۳/۷۸۴	۲/۲۳۶	۲/۱۷۹	۲/۱۷۱	۰/۸۴۵	۰/۴۷۶	۰/۰۵۱	۰/۰۷۱	۱۰/۶

پودر شیشه بازیافتی (RGP)^۱

پودر شیشه بازیافتی از دورریزهای شیشه‌بری‌های واقع در شهر کرمان که در چاله آب‌شویی خود این ضایعات را جمع‌آوری می‌کردند، تهیه شد. این مواد ابتدا به دلیل رطوبت بالا در دمای محیط خشک شدند سپس جهت استفاده از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد و ذرات

^۱Recycled Glass Powder

ریزتر از ۷۵ میکرون آن در به عنوان ماده پایه ژئوپلیمر استفاده گردید، ماده حاصل که در شکل (۱) قابل مشاهده است، یک پودر نرم و سفید رنگی خواهد بود. آنالیز شیمیایی XRF پودر شیشه بازیافتی در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۱. پودر شیشه بازیافتی رد شده از الک شماره ۲۰۰

جدول ۳. آنالیز شیمیایی XRF پودر شیشه بازیافتی

ترکیب شیمیایی مقدار (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI
	۷۱/۶۹۹	۱/۰۸۴	۰/۲۱۵	۸/۵۷۹	۳/۶۵۹	۱۱/۹۵۷	۰/۲۰۴	۰/۰۹۱	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۲/۲۶

فعال کننده^۱

فعال کننده مورد استفاده در پژوهش حاضر که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۴) آورده شده است، هیدروکسید سدیم یا سود سوزآور^۲ است که بر مبنای مطالعات گذشته مقدار غلظت محلول را ۵ مولار ثابت در نظر گرفته شد. هیدروکسید سدیم ماده‌ای جامد پولکی شکل و سفید رنگی است، با دمای ذوب ۱۳۹۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. این ماده، به آسانی می‌تواند به آسانی رطوبت هوا را جذب نماید. این ماده همچنین به عنوان یک ماده قلیایی قوی، در صنایع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل خاصیت قلیایی زیاد (pH=۱۴)، این ماده از رایج‌ترین مواد مورد استفاده برای تهیه محلول قلیایی در فرآیند تولید ژئوپلیمرها می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و شیمیایی هیدروکسید سدیم

فرمول شیمیایی	چگالی (g/mol)	خلوص (%)	جرم مولی (g/mol)	pH
NaOH	۲/۱۳	۹۸	۴۰	۱۴

^۱Activator

^۲NaOH

روش انجام آزمایش

آزمایش‌های انجام شده و روش انجام آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده (UCS) بر طبق استاندارد ASTM D2166/2166M-24 انجام شده است. مقاومت فشاری تک محوری عبارتست از حداکثر نیروی وارد بر سطح به هنگام شکست نمونه، که معمولاً با نماد q_u یا UCS نشان داده می‌شود. معمولاً هدف از این آزمایش اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری خاک‌های چسبنده دست‌نخورده یا دست‌خورده است. این آزمایش به دو روش کنترل تنش^۱ و کنترل کرنش^۲ انجام می‌شود که در پژوهش حاضر از روش کنترل کرنش استفاده شده است. آزمایش تک محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده (C_u) خاک‌های چسبنده نیز می‌باشد (ASTM, 2024). در پژوهش انجام شده به منظور مطالعه ویژگی‌های ریزساختاری خاک‌های رسی تثبیت شده و تثبیت نشده توسط ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی از آزمایش‌های پراش اشعه ایکس^۳ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ استفاده شده است. به منظور آنالیز رفتار ریزساختاری نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر تعدادی تصاویر SEM به همراه آنالیز EDS از سطح شکسته شده نمونه‌های منتخب (شکسته شده در آزمایش فشاری تک-محوری)، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه دستگاه آنالیز شیمیایی تهیه گردید.

روش آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش ابتدا خاک بنتونیت تهیه شده را با درصد رطوبت بهینه مخلوط نموده و سپس به تهیه نمونه بدون افزودنی یا همان نمونه شاهد پرداخته شده است. روش ساخت نمونه‌ها به روشی دانسیته کنترل بوده که در آن دانسیته‌ی خشک و یا به عبارت دیگر مقدار ماده جامد نمونه‌ها و نیز درصد رطوبت تمام نمونه‌ها ثابت بوده است؛ بدین صورت که درصد پودر شیشه مورد نظر جایگزین جرم متناظر خاک شده و سپس به خاک خشک اضافه و کاملاً مخلوط می‌گردد و بعد از آن محلول سدیم هیدروکسید ۵ مولار به مخلوط خشک خاک و پودر شیشه افزوده شده و تا رسیدن به یک خاک همگن که به همه جای آن رطوبت رسیده باشد، اختلاط ادامه یافت. داخل قالب استاندارد آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده طلق پلاستیکی قرار داده شد به طوری که نمونه داخل طلق پلاستیکی کوبیده شده، سپس خاک مخلوط شده در ۳ لایه در قالب ریخته شده و هر لایه با چکش ساخته شده با انرژی چکش آزمایش تراکم استاندارد به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده گردید. در انتها سطح نمونه صاف، قالب از هم جدا شده و نمونه به همراه طلق پلاستیکی بیرون آورده و توسط سلفون دورپیچ می‌گردد و داخل پلاستیک زیپ‌دار قرار داده شد تا عمل آوری انجام شده و در سن مورد نظر مورد آزمایش قرار گرفت. این مراحل برای درصد‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی خاک بنتونیت خشک انجام شد.

نام‌گذاری نمونه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش بعضی حروف به اختصار مخفف و معرف ماده‌ای می‌باشد که به‌طور خلاصه این حروف لاتین و اعداد در جدول (۵) مشخص شده‌اند.

جدول ۵. حروف قراردادی در این پژوهش

علامت اختصاری	B یا Bent	۷ یا ۲۸	G	۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۴۰
تعریف	بنتونیت (Bentonite)	زمان عمل‌آوری	ژئوپلیمر (Geopolymer)	درصد ژئوپلیمر

^۱Stress Control

^۲Strain Control

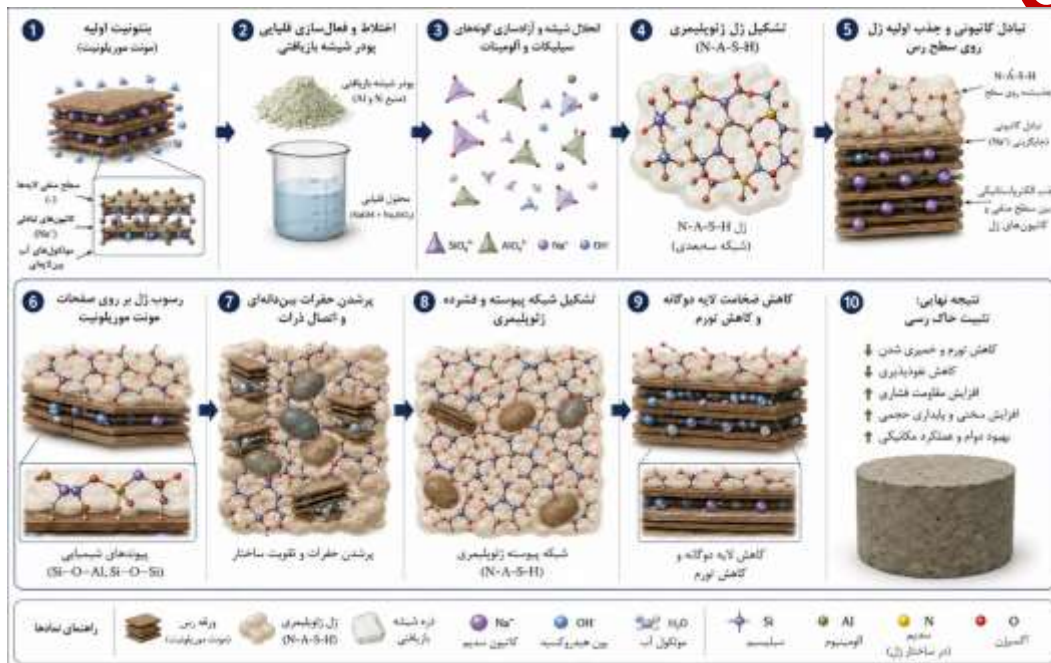
^۳X-Ray powder Diffraction (XRD)

^۴Scanning Electron Microscope (SEM or FESEM)

به عنوان نمونه B7G20 خاک بنتونیت تثبیت شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی با زمان عمل آوری ۷ روز، می باشد.

یافته های پژوهش و بحث

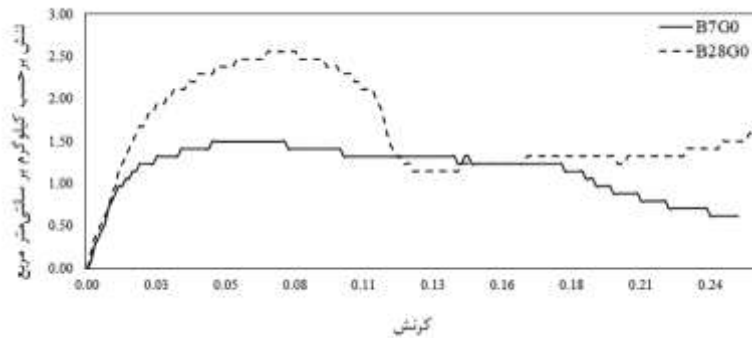
براساس آزمایش های صورت گرفته بر روی نمونه های تثبیت شده و تثبیت نشده خاک بنتونیت، می توان تأثیر درصدهای مختلف پودر شیشه بازیافتی را بر رفتار مقاومتی خاک رسی بنتونیت مشاهده نمود. نتایج این مطالعات انجام شده در دو بخش درشت ساختاری و ریزساختاری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت که مکانیزم تثبیت خاک رسی بنتونیتی حاوی مونت موریلونیت با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی و جانشینی ژئوپلیمر بر روی سطح دانه های رسی در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک مکانیزم تثبیت خاک رسی بنتونیتی حاوی مونت موریلونیت با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی و جانشینی ژئوپلیمر بر روی سطح دانه های رسی

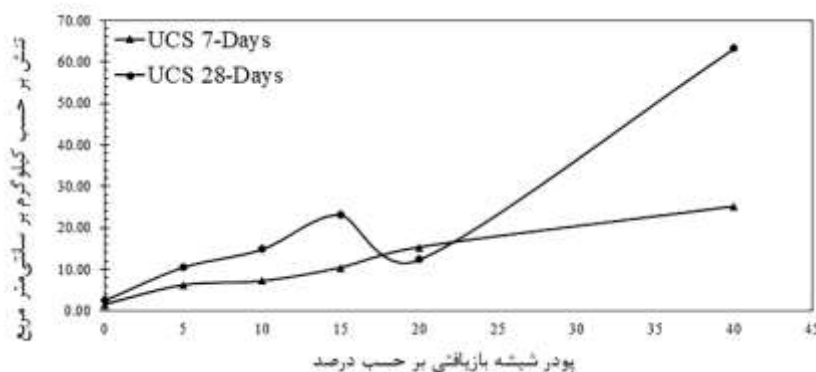
تجزیه و تحلیل نتایج درشت ساختاری

نمودار تنش-کرنش خاک رسی بنتونیت تثبیت نشده در شکل (۳) قابل مشاهده است. این نمودار نشان می دهد که مقاومت نمونه ۲۸ روز این خاک ابتدا افزایش یافته تا به مقدار ۲/۵۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برسد و سپس در کرنش خمیری حدودی ۱۲/۸ درصد حالت خمیری دارد، بدین صورت که با افزایش مقدار تغییر شکل یا کرنش محوری، مقدار تنش محوری تقریباً ثابت و حتی مقدار کمی نیز افزایش داشته است. در همین راستا مقدار چقرمگی نمونه خاک بنتونیت تثبیت شده که از مساحت زیر نمودار تنش-کرنش بدست می آید، ۰/۴۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع برای نمونه های ۲۸ روز می باشد. همچنین نسبت سطح زیر نمودار تنش-کرنش پس از پیک به سطح زیر نمودار تنش-کرنش پیش از قله برابر ۴/۵۹۱ برای نمونه های ۷ روز و ۲/۳۳۷ برای نمونه های ۲۸ روز است که نشان دهنده کاهش شکل پذیری نمونه ی مورد مطالعه است.



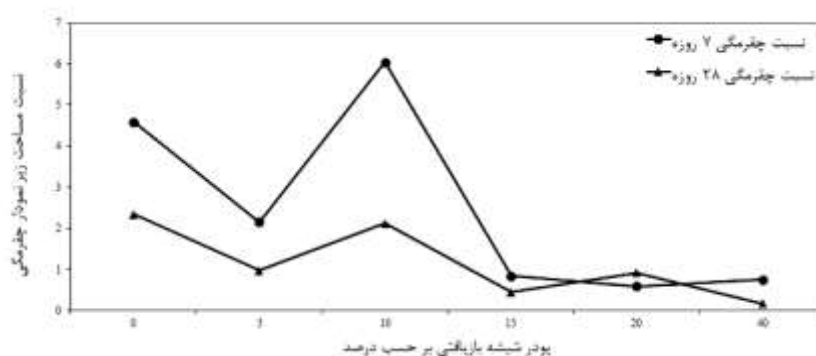
شکل ۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز بتونیت تثبیت‌نشده

در شکل (۴) مقاومت خاک تثبیت‌شده در نمونه‌های ۷ روز با افزایش درصد ژئوپلیمر همواره در حال افزایش است اما در نمونه‌های ۲۸ روز حداکثر مقاومت در نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه بازیافتی است که به مقدار ۲۳/۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است و پس از آن در میزان ۲۰ درصد ژئوپلیمر مقاومت به ۱۲/۴۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش می‌یابد. اما با افزایش درصد ژئوپلیمر به ۴۰ درصد این مقاومت بسیار افزایش یافته است. در شکل (۴) نمودار تغییرات مقاومت نمونه‌های ۲۸ روز عمل‌آوری شده برحسب درصد افزودنی بیان می‌شود که این تغییرات شامل افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد ژئوپلیمر تا ۱۵ درصد بوده، این مقاومت با افزایش درصد ژئوپلیمر به ۲۰ درصد کاهش یافته و سپس با افزایش درصد ژئوپلیمر به ۴۰ درصد این مقاومت افزایش می‌یابد در نمونه‌های ۲۸ روز تثبیت‌شده با پودر شیشه به استثنای درصد ۲۰، مقاومت فشاری تابعی صعودی با افزایش درصد پودر شیشه است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مقاومتی و درشت ساختاری پودر شیشه در تثبیت خاک رس بتونیت دارای کانی مونت موریلونیت است.



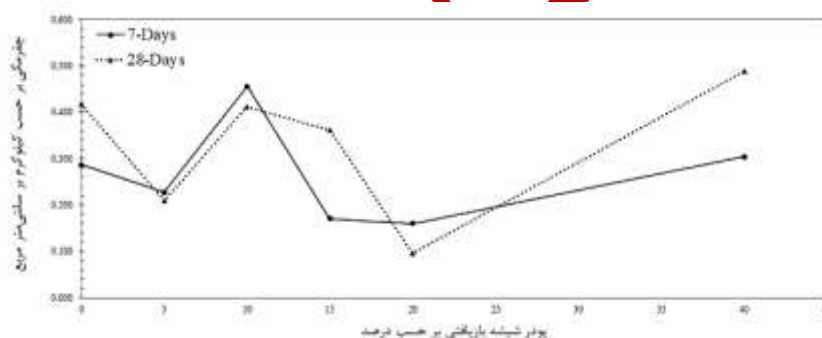
شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز برحسب درصد ژئوپلیمر

با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که بهبود چقرمگی معمولاً با افزایش شکل‌پذیری همراه است. خاک بتونیت تثبیت‌شده با پودر شیشه می‌تواند تغییر شکل‌های بیشتری را قبل از ترک‌خوردگی تحمل کند، که برای کاربردهایی مانند سدهای خاکی، پی‌سازی و به‌سازی خاک حائز اهمیت است. افزایش چقرمگی از ۷ به ۲۸ روز نشان‌دهنده بهبود تدریجی خواص مکانیکی با گذشت زمان است که ناشی از پیشرفت واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون است.



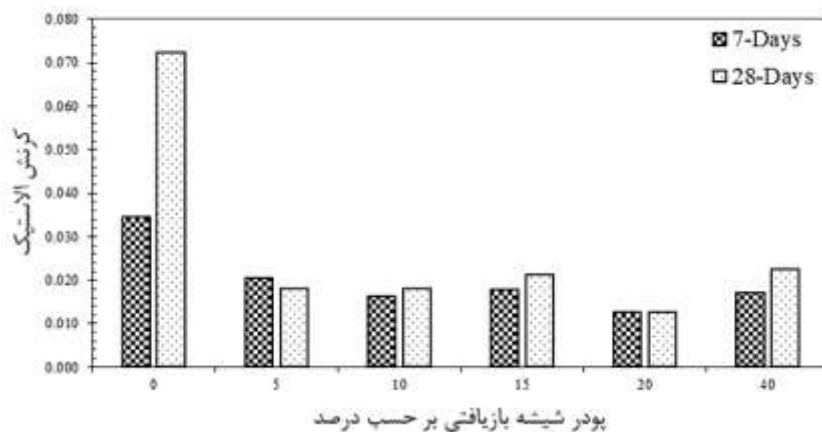
شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت چترمگی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز قبل از مقاومت حداکثر به بعد از آن برحسب درصدهای مختلف ژئوپلیمر

با توجه به آنکه شکل‌پذیری با مفهوم چترمگی رابطه مستقیم دارد یعنی با افزایش مقدار چترمگی، نمونه شکل‌پذیرتر خواهد بود که می‌توان از این مفهوم جهت تعیین شکل‌پذیری نمونه‌ها استفاده نمود. در شکل (۶) که نمودار مقدار چترمگی نمونه‌ها با درصدهای مختلف پودر شیشه را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل‌پذیری نمونه‌ها با ۵ درصد وزنی پودر شیشه دچار افت شدیدی شده که این افت شکل‌پذیری در نمونه‌های دارای ۲۰ درصد وزنی پودر شیشه به کمترین مقدار خود رسیده است اما در نمونه‌های ۷ روز با ۱۰ درصد وزنی و در نمونه‌های ۲۸ روز با ۴۰ درصد وزنی پودر شیشه شکل‌پذیری بیشترین مقدار خود را دارد که این خود نشان از تأثیر زمان عمل‌آوری بر شکل‌پذیری بهتر نمونه‌ها بوده است.



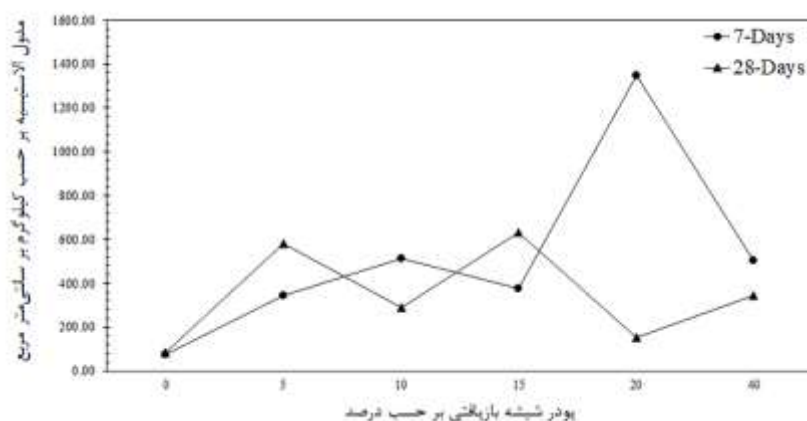
شکل ۶. نمودار تغییرات چترمگی در مقابل درصد افزودنی ژئوپلیمر

با توجه به شکل (۷) تغییرات کرنش الاستیک در نمونه‌های ۷ روز با افزایش درصد ژئوپلیمر کاهش می‌یابد که این کاهش در نمونه‌های ۲۸ روز بسیار چشمگیرتر بوده است. نمونه بدون ژئوپلیمر با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز از نمونه مشابه با زمان عمل‌آوری ۷ روز کرنش بیشتری را تحمل نموده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود با افزودن ۲۰ درصد ژئوپلیمر به نمونه رسی بنتونیت کرنش به کمترین مقدار خود در هر دو زمان عمل‌آوری رسیده است. نتایج مذکور نشان از سخت‌تر شدن نمونه‌ها داشته که موجب کاهش کرنش و در نتیجه شکست ترد و سریع نمونه‌ها گردیده است.



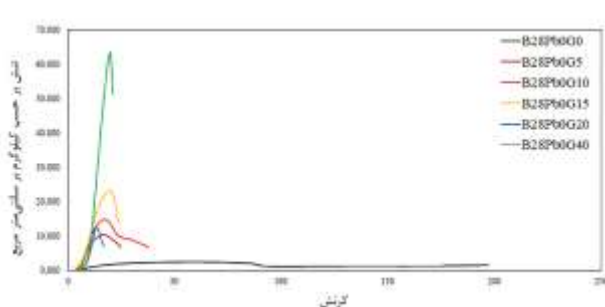
شکل ۷. نمودار تغییرات کرنش الاستیک در مقابل درصد افزودنی ژئوپلیمر

تغییرات مدول الاستیسیته در شکل (۸) نشان می‌دهد که در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز نسبت به نمونه تثبیت‌نشده، مدول الاستیسیته افزایش یافته است اما این افزایش در درصدهای مختلف وزنی ژئوپلیمر به نسبت یکدیگر شامل کاهش نیز می‌باشد. به عنوان نمونه در نمونه‌های ۷ روز بیشترین افزایش مدول الاستیسیته در نمونه حاوی ۲۰ درصد ژئوپلیمر بوده که در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز بیشترین مقدار مدول الاستیسیته مربوط به نمونه ۱۵ درصد ژئوپلیمر می‌باشد که این نشان از اهمیت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها و تأثیرات آن بر نتایج مربوطه می‌باشد.

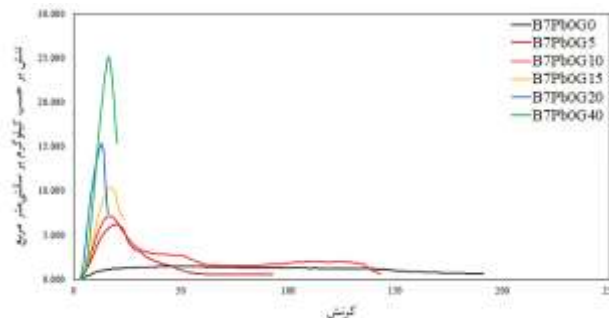


شکل ۸. نمودار تغییرات مدول الاستیسیته در مقابل درصد ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی

در شکل (۹) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های با زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز که نشان از افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد ژئوپلیمر است. نمونه‌های دارای ۴۰ درصد ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی در هر دو زمان عمل‌آوری دارای بیشترین مقاومت فشاری است اما همان‌طور که قبلاً مورد بحث قرار گرفت درصد بهینه ژئوپلیمر ۱۵ درصد برای زمان عمل‌آوری ۷ روز و ۲۰ درصد برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روز می‌باشد.



الف) نمونه‌های ۲۸ روز



ب) نمونه‌های ۷ روز

شکل ۹. نمودارهای تنش-کرنش خاک بنتونیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی

تجزیه و تحلیل نتایج ریزساختاری^۱

نتایج ریزساختاری در این بخش به سه قسمت تقسیم شده است: الف) تفسیر نمودار پراش پرتوی اشعه ایکس (XRD)، ب) تفسیر تصاویر میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) و ج) تفسیر عکس و نمودار طیف سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDS یا EDX). این نمودارها و عکس‌های ریزساختاری بیان می‌کنند که استفاده از ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی ساختار خاک را به صورت مجتمع در می‌آورد (Hamidi & Marandi, 2018a).

تفسیر نمودار پراش پرتوی اشعه ایکس (XRD)

شناسایی فازها و تحلیل ریزساختاری

به منظور بررسی تحولات کانی‌شناسی و شناسایی سازوکار افزایش مقاومت در نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با ژئوپلیمر، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی سه نمونه شاهد (صفر درصد) و تثبیت شده با ۲۰ و ۴۰ درصد ژئوپلیمر پس از سپری شدن دوره عمل‌آوری ۲۸ روز انجام شد. الگوهای پراش حاصل در شکل (۱۰) برای نمونه‌های B28G0 (خاک بدون حضور ژئوپلیمر)، B28G20 (تثبیت شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر) و B28G40 (تثبیت شده با ۴۰ درصد ژئوپلیمر) به ترتیب با رنگ‌های قرمز، آبی و سبز نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که به منظور جداسازی بهتر الگوها و افزایش وضوح بصری، خط پایه^۲ هر یک از نمودارها به صورت عمودی جابه‌جا شده و بنابراین مقادیر شدت مطلق (شمارش) قابل مقایسه مستقیم بین سه نمونه نیست و تفسیر باید بر مبنای شدت نسبی قله‌ها نسبت به زمینه هر نمودار صورت گیرد.

بر اساس تطبیق زوایای پراش (2θ) با کارتهای استاندارد JCPDS، فازهای کانی‌شناسی اصلی شناسایی شده در نمونه‌ها شامل مونتموریلونیت (در حدود زوایای ۶ و ۲۰ و ۳۶ درجه)، کوارتز (در حدود زوایای ۲۲، ۲۶/۶، ۴۰، ۴۳/۵ و ۵۰/۵ درجه)، فلدسپار از نوع آلبیت (در حدود زوایای ۲۷/۹ و ۳۶ درجه) و کلسیت (در حدود زاویه ۲۹/۵ درجه) است. این ترکیب کانی‌شناسی با ماهیت خاک بنتونیتی، که غالباً از کانی‌های رسی گروه اسمکتیت (مونت موریلونیت) به همراه مقادیری کوارتز، فلدسپار و کربنات‌های همراه تشکیل شده، همخوانی کامل دارد.

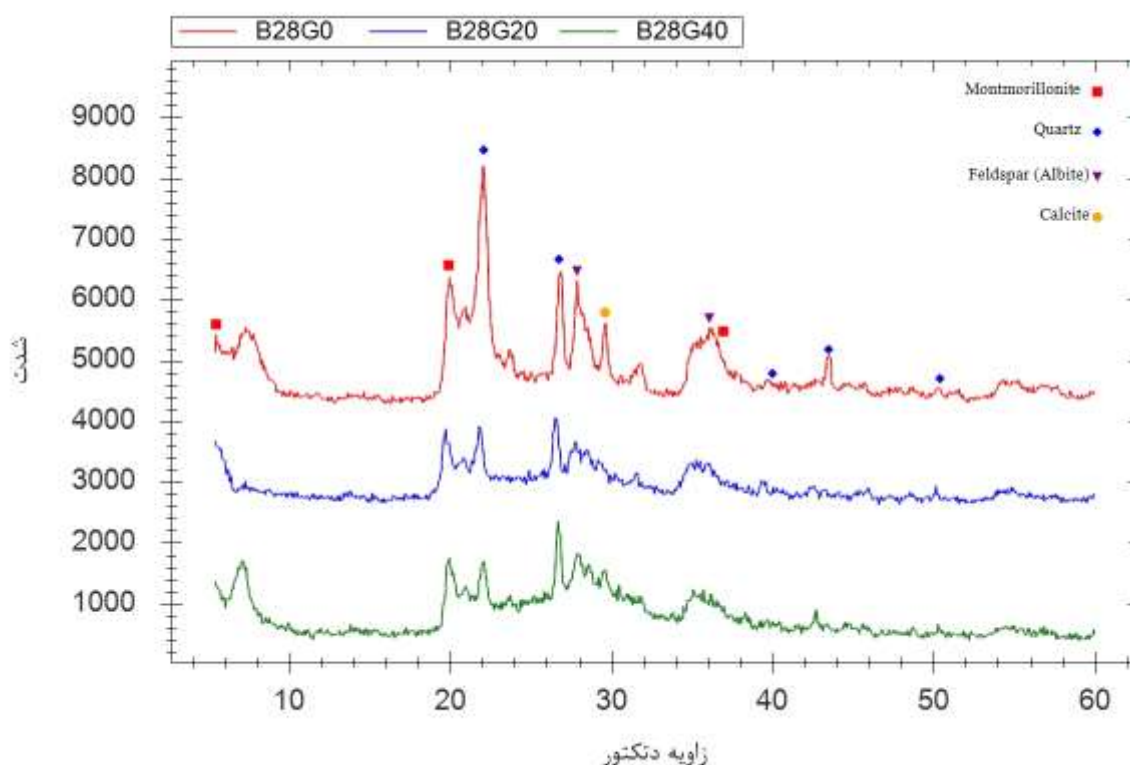
مقایسه سه الگوی پراش نشان می‌دهد که با افزایش درصد ژئوپلیمر از صفر به ۲۰ و سپس ۴۰ درصد، شدت نسبی قله‌های مشخصه مونت‌موریلونیت، به‌ویژه قله با زاویه کم (حدود ۶ درجه) و قله‌ای که با ناحیه ۲۰ درجه همپوشانی دارد، به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و

^۱Microstructure

^۲Energy Dispersive Spectroscopy

^۳Baseline

در نمونه B28G40 ضعیف‌تر و پهن‌تر از نمونه شاهد ظاهر می‌شود. این پهن‌شدگی و افت شدت، نشانه روشنی از کاهش نظم بلورین ساختار لایه‌ای مونت‌موریلونیت و در واقع مصرف‌شدن بخشی از این کانی رسی فعال در واکنش‌های ژئوپلیمری-پوزولانی است. در مقابل، قله‌های مربوط به کوارتز و فلدسپار (آلبیت) در هر سه نمونه با موقعیت زاویه‌ای تقریباً ثابت باقی مانده و صرفاً کاهش اندکی در شدت نسبی آن‌ها مشاهده می‌شود. این رفتار با ماهیت شیمیایی این دو کانی، که در محیط قلیایی حاصل از فعال‌سازی ژئوپلیمر نسبتاً بی‌اثر و کم‌واکنش هستند، مطابقت دارد و تأیید می‌کند که تغییرات مشاهده‌شده در الگوی پراش عمدتاً ناشی از دگرگونی فاز رسی فعال (مونت‌موریلونیت) و نه اسکلت کانی غیرفعال خاک است. نکته قابل‌توجه دیگر، افزایش برجستگی و پهنای زمینه پیوسته در بازه زاویه‌ای تقریبی ۱۰ تا ۳۵ درجه در نمونه‌های B28G20 و به‌ویژه B28G40 است. این افزایش زمینه آمورف، که با کاهش هم‌زمان شدت قله‌های بلورین مونت‌موریلونیت همراه است، شاهدهی غیرمستقیم اما معتبر بر تشکیل فاز جدید ژل آلومینوسیلیکاتی آمورف (از نوع N-A-S-H و یا C-A-S-H) در اثر واکنش بین سیلیس و آلومینای آزادشده از تخریب سطحی کانی‌های رسی با محلول فعال‌ساز قلیایی ژئوپلیمر است. از آنجا که این ژل به دلیل نداشتن نظم بلورین بلندبرد، در الگوی پراش پرتو ایکس به‌صورت قله تیز ظاهر نمی‌شود، حضور آن عمدتاً از طریق افزایش شدت زمینه در محدوده زاویه‌ای مذکور استنباط می‌شود. همچنین ظهور و تقویت نسبی قله کلسیت در حدود زاویه ۲۹/۵ درجه در نمونه‌های تثبیت‌شده را می‌توان به رسوب کربنات کلسیم ثانویه ناشی از واکنش کربناسیون کلسیم آزادشده از فرآیند فعال‌سازی قلیایی با CO_2 محیط یا با کربنات‌های موجود در محلول فعال‌ساز نسبت داد که خود عاملی کمکی در پرشدن حفرات و افزایش پیوستگی ماتریس خاک به شمار می‌آید.



شکل ۱۰. نمودار پراش پرتوی اشعه ایکس نمونه بنتونیت ۷ روز تثبیت شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی

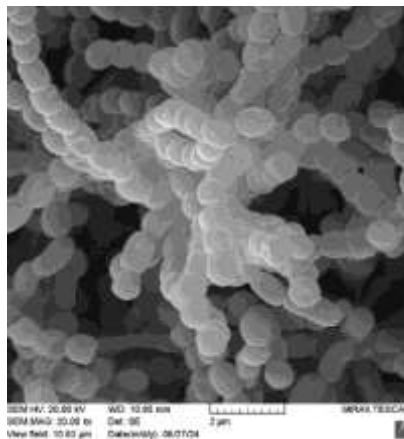
تحلیل مقایسه‌ای با مواد مرجع

در مقایسه با بنتونیت تثبیت نشده، نمونه تثبیت شده با ژئوپلیمر کاهش ۲۵ الی ۳۰ درصدی در شدت پیک (۰۰۱) مونت‌موریلونیت را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تخریب جزئی ساختار کریستالی رسی به ساختار فولکوله یا مجتمع است. انقباض فاصله بین صفحه‌ای از ۱۶/۲ به ۱۶/۰۸ آنگستروم، نشان‌دهنده تبادل کاتیونی و اصلاح بین لایه‌ای ناشی از فرآیند فعال‌سازی قلیایی است.

تفسیر عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل (۱۱) نمونه B28G0 بنتونیت تثبیت نشده با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، ساختاری لایه‌ای، پولکی و با تخلخل نسبتاً زیاد را نشان می‌دهد که مشخصه‌ی خاک‌های رسی و نمونه‌های رسی بنتونیت است. این ساختار می‌تواند منجر به نفوذپذیری زیاد و مقاومت مکانیکی پایین شود.

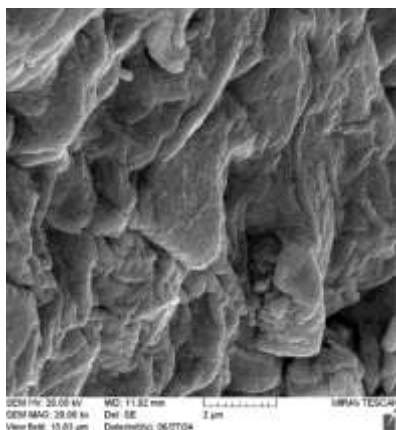
در نمونه‌های حاوی ژئوپلیمر (B28G40، B28G20، B7G40، B7G20)، با افزودن ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه باز یافتی، تغییرات چشمگیری در ریخت‌شناسی سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. تشکیل فازهای ژل‌مانند و کاهش تخلخل‌ها نشان‌دهنده واکنش‌های پوزولانی و ژئوپلیمرسازی است.



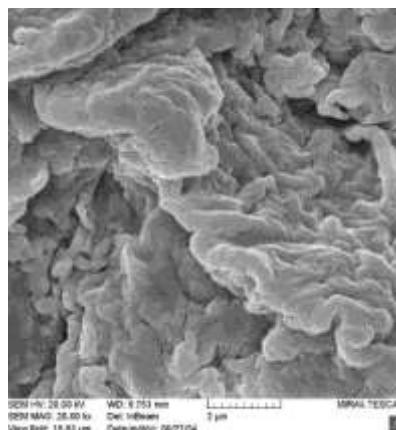
شکل ۱۱. عکس SEM نمونه بنتونیت تثبیت نشده ۲۸ روز

با توجه به شکل (۱۲) نمونه‌های با ۲۰ درصد ژئوپلیمر (B28G20 و B7G20)، هنوز دارای نواحی با ساختار لایه‌ای بنتونیت هستند، اما پوشش جزئی توسط فاز ژئوپلیمری مشاهده می‌شود. این پوشش بخشی از تخلخل‌ها را پر کرده و باعث بهبود پیوند بین ذرات می‌شود.





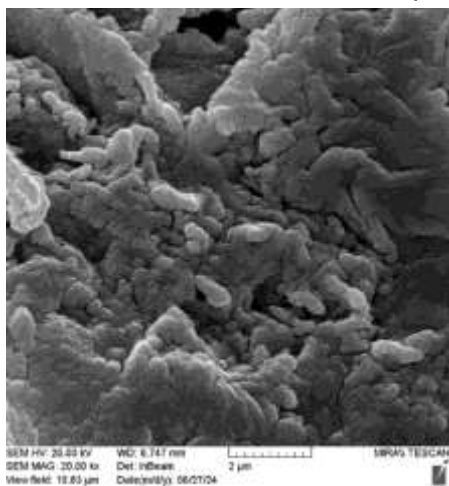
(ب) نمونه ۲۸ روز



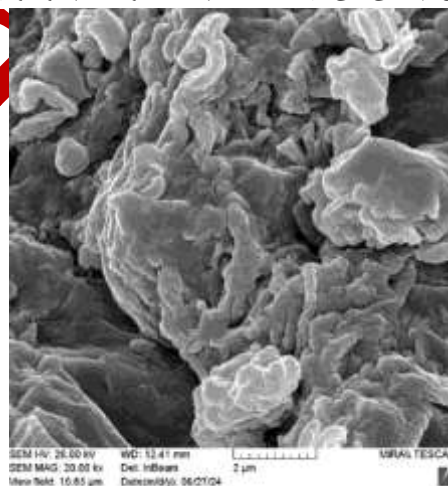
(الف) نمونه ۷ روز

شکل ۱۲. عکس SEM نمونه‌های بنتونیت تثبیت شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر

در نمونه‌های با ۴۰ درصد ژئوپلیمر (B7G40 و B28G40) در شکل (۱۳)، پوشش ژئوپلیمری کاملاً آشکارتر است و ساختار یکنواخت‌تر و فشرده‌تری تشکیل شده است. ذرات بنتونیت به طور کامل در ماتریس ژئوپلیمری محاط شده‌اند که منجر به کاهش قابل توجه تخلخل و افزایش چگالی می‌گردد که در نهایت موجب بهبود ویژگی‌های مقاومتی خواهد شد.



(ب) نمونه ۲۸ روز



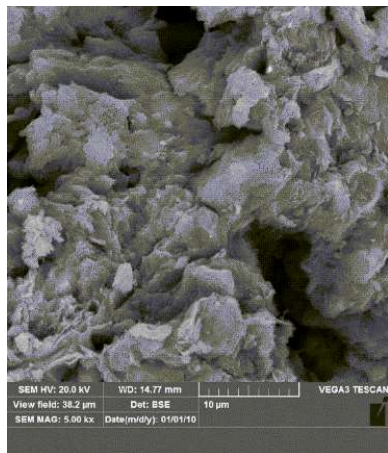
(الف) نمونه ۷ روز

شکل ۱۳. عکس SEM نمونه‌های بنتونیت تثبیت شده با ۴۰ درصد ژئوپلیمر

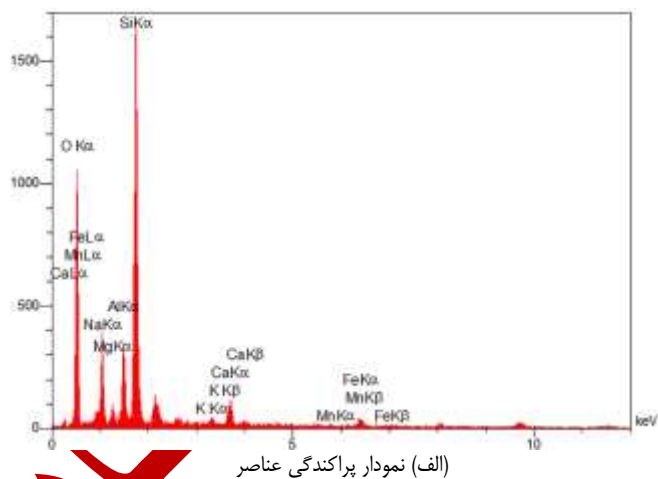
با توجه به شکل‌های (۱۲)-الف و (۱۳)-الف در زمان عمل‌آوری ۷ روز (B7G20 و B7G40)، اگرچه واکنش‌های اولیه ژئوپلیمراسیون رخ داده، اما ساختار هنوز کاملاً یکپارچه نیست و برخی نواحی واکنش‌نداده از بنتونیت قابل مشاهده است. در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (B28G20 و B28G40)، با افزایش زمان عمل‌آوری، پیشرفت واکنش‌های ثانویه و تبلور فازهای ثانویه (مانند C-S-H و C-A-S-H) مشهود است. این امر باعث افزایش یکپارچگی ماتریس و کاهش بیشتر تخلخل می‌شود. پودر شیشه بازیافتی به عنوان یک منبع سیلیس آمورف و قلیایی عمل کرده و در حضور فعال‌کننده (معمولاً ماده قلیایی) موجب تشکیل ساختارهای ژئوپلیمری می‌شود. این فرآیند منجر به کاهش تخلخل، افزایش مقاومت مکانیکی و پایداری عناصر آلاینده (در صورت وجود) می‌شود.

تفسیر عکس و نمودار طیف سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDS یا EDX)

در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزینی پودر شیشه بازیافتی (RGP) به عنوان منبع سیلیسیم بر نسبت سیلیسیوم به آلومینیوم (Si/Al) در ساختار ژئوپلیمر براساس بنتونیت کرمان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل‌های (۱۴) الی (۱۸) نمونه‌ها در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز و با درصدهای مختلف پودر شیشه (۰، ۲۰ و ۴۰ درصد) تهیه و توسط دستگاه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDS) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد پودر شیشه، نسبت Si/Al بطور معناداری افزایش یافته که حاکی از تشکیل فازهای ژئوپلیمری غنی از سیلیس و بهبود ریزساختار است.

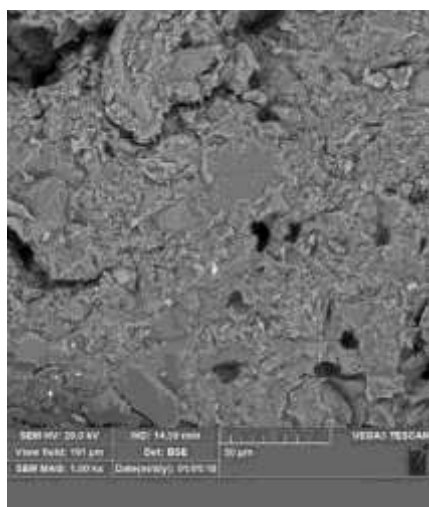


(ب) عکس محدوده مورد مطالعه

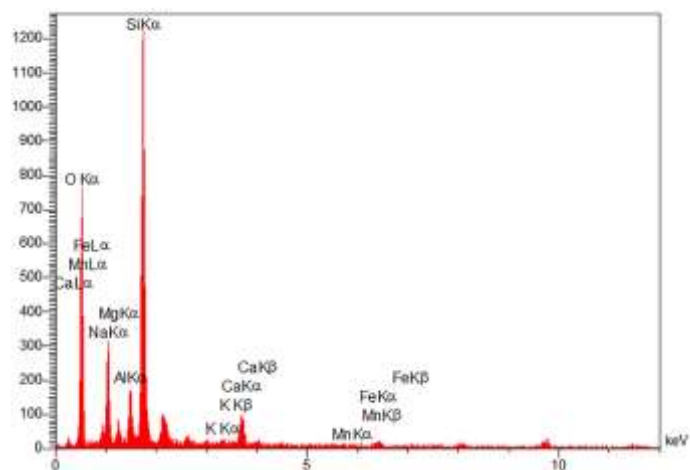


(الف) نمودار پراکندگی عناصر

شکل ۱۴. نمودار EDS خاک بنتونیت تثبیت‌شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر با زمان عمل‌آوری ۷ روز

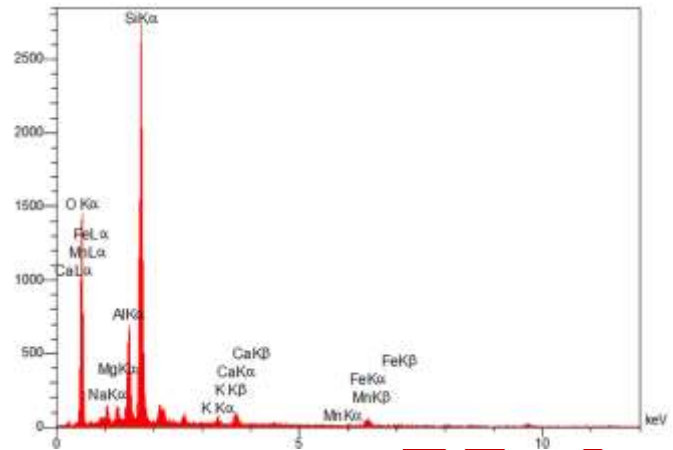
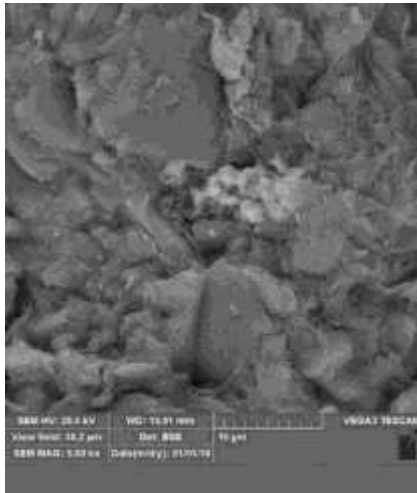


(ب) عکس محدوده مورد مطالعه



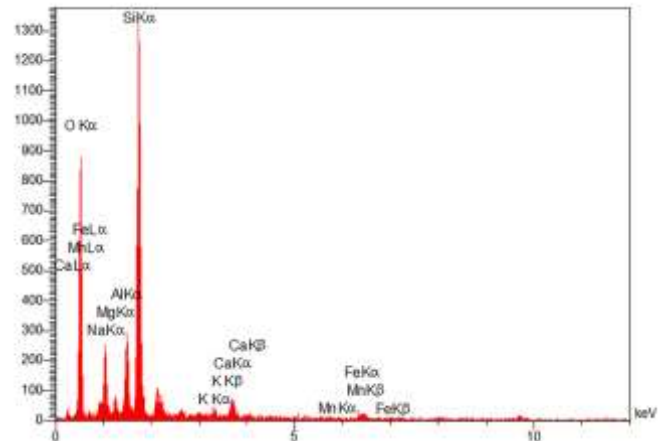
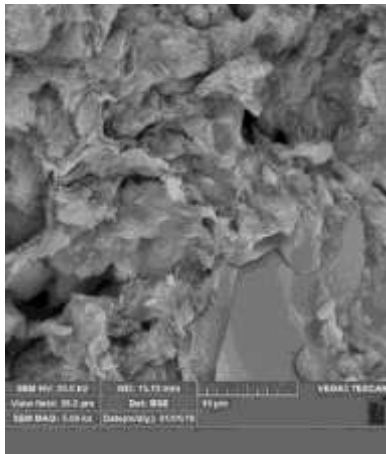
(الف) نمودار پراکندگی عناصر

شکل ۱۵. نمودار EDS خاک بنتونیت تثبیت‌شده با ۴۰ درصد ژئوپلیمر با زمان عمل‌آوری ۷ روز



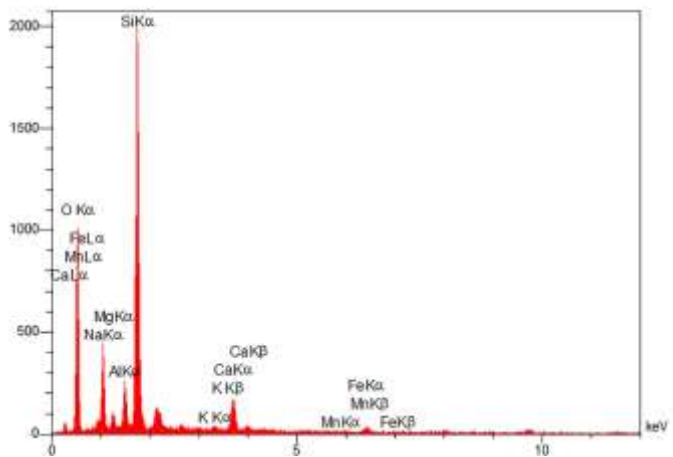
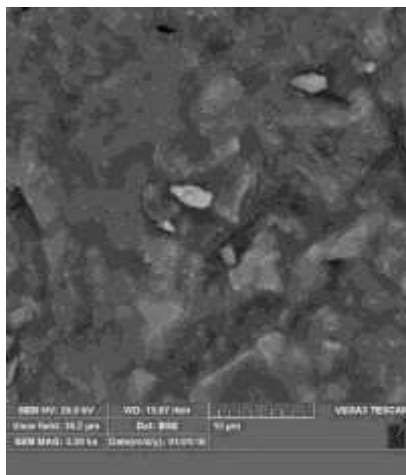
(ب) عکس محدوده مورد مطالعه

(الف) نمودار پراکندگی عناصر
شکل ۱۶. نمودار EDS خاک بنتونیت تثبیت نشده با زمان عمل آوری ۲۸ روز



(ب) عکس محدوده مورد مطالعه

(الف) نمودار پراکندگی عناصر
شکل ۱۷. نمودار EDS خاک بنتونیت تثبیت شده با ۲۰ درصد ژئوپلیمر با زمان عمل آوری ۲۸ روز



(ب) عکس محدوده مورد مطالعه

(الف) نمودار پراکندگی عناصر
شکل ۱۸. نمودار EDS خاک بنتونیت تثبیت شده با ۴۰ درصد ژئوپلیمر با زمان عمل آوری ۲۸ روز

محاسبه نسبت سیلیسیوم به آلومینیوم (Si/Al)

برای تعیین نسبت Si/Al از داده‌های EDS استخراج شده از شکل‌های (۱۴) الی (۱۸) استفاده شد. شدت پیک‌های مربوط به سیلیسیوم ($\text{SiK}\alpha$) و آلومینیوم ($\text{AlK}\alpha$) به عنوان شاخصی از غلظت این عناصر در نظر گرفته شده و نسبت Si/Al برای هر نمونه محاسبه گردید. لازم به ذکر است که در آنالیز EDS، این شدت‌ها می‌توانند نماینده‌ای از مقدار نسبی عناصر باشند، اگرچه برای مقادیر مطلق می‌بایست تصحیحات کمی صورت پذیرد. نتایج محاسبات در جدول (۶) خلاصه شده است.

جدول ۶. نتایج محاسبه نسبت Si/Al برای نمونه‌های مختلف بنتونیت ژئوپلیمری

نام نمونه	زمان عمل آوری	درصد پودر شیشه (RGP%)	شدت پیک $\text{SiK}\alpha$	شدت پیک $\text{AlK}\alpha$	نسبت Si/Al
B7G0	۷	۰	۱۱۰۰	۵۰۰	۲/۲۰
B7G20	۷	۲۰	۱۲۰۰	۴۰۰	۳/۰۰
B7G40	۷	۴۰	۱۲۰۰	۳۰۰	۴/۰۰
B28G0	۲۸	۰	۱۵۰۰	۵۰۰	۳/۰۰
B28G20	۲۸	۲۰	۱۳۰۰	۴۰۰	۳/۲۵
B28G40	۲۸	۴۰	۲۰۰۰	۵۰۰	۴/۰۰

تحلیل روند تغییرات نسبت Si/Al

با بررسی داده‌های جدول (۶)، دو روند اصلی قابل مشاهده است:

تأثیر درصد پودر شیشه (RGP): در هر دو زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روز، با افزایش درصد پودر شیشه از ۰ به ۴۰ درصد، نسبت Si/Al به طور پیوسته افزایش یافته است. برای نمونه ۷ روز، این نسبت از ۲/۲ در نمونه بدون پودر شیشه، به ۴ در نمونه با ۴۰ درصد پودر شیشه رسیده است. این افزایش مستقیم، ناشی از ورود سیلیسیم اضافی از پودر شیشه بازیافتی به سیستم واکنش ژئوپلیمری است. پودر شیشه حاوی مقادیر بالایی از سیلیس (SiO_2) است که در محیط قلیایی فعال شده و در تشکیل شبکه ژئوپلیمر $[\text{Si-O-Al-O}]$ مشارکت می‌کند.

در بررسی تأثیر سن نمونه (دوره عمل آوری)، مقایسه نتایج نمونه‌های شاهد (G0) در بازه‌های زمانی ۷ و ۲۸ روز حاکی از افزایش نسبت Si/Al از ۲/۲ به ۳ است. این روند می‌تواند متأثر از تداوم واکنش‌های ژئوپلیمرسازی و نیز انحلال تدریجی ذرات ریزدانه آلومینوسیلیکاتی موجود در بنتونیت باشد که در نهایت منجر به تعدیل بیشتر نسبت‌های شیمیایی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر می‌گردد. با این وجود، در نمونه‌های اصلاح شده با پودر شیشه (G20 و G40)، تأثیر دوره عمل آوری در مقایسه با درصد جایگزینی پودر شیشه، کمتر محسوس است. این امر حاکی از نقش غالب و زودرس پودر شیشه در تأمین سیلیس مورد نیاز برای فرآیند واکنش است که تا رسیدن به درصد بهینه اثرگذاری خود را حفظ نموده و پس از آن روند کاهشی خواهد یافت.

نسبت Si/Al یک پارامتر کلیدی در تعیین ویژگی‌های ریزساختاری و خواص نهایی ژئوپلیمرها است. به طور کلی، نسبت‌های Si/Al پایین (۱ تا ۲) منجر به تشکیل ساختار سه‌بعدی سخت‌تر (شبکه پلی‌سیلات) می‌شود، در حالی که نسبت‌های بالاتر (۲ تا ۴) تشکیل زنجیره‌های پلی‌مری درازتر (پلی‌سیلوکسات) را تسهیل می‌کنند که اغلب با چقرمگی بیشتر و نفوذپذیری کمتر مرتبط است. افزایش نسبت Si/Al از حدود ۲ به ۴ در این تحقیق، مشاهده می‌شود که منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت مکانیکی و دوام نمونه‌های ژئوپلیمری می‌گردد. این یافته با نتایج محققانی همچون علیزاده و همکاران (۱۴۰۰) که گزارش کردند افزایش نسبت Si/Al تا ۳/۵ باعث افزایش ۳۰ درصدی مقاومت فشاری در کامپوزیت‌های ژئوپلیمری شده است، هم‌خوانی دارد.

^۱Poly(sialate)

^۲Polysiloxo chains

تحلیل تطبیقی نتایج SEM، نسبت Si/Al و مقاومت فشاری تک محوری (UCS)

بررسی توأم داده‌های درشت‌ساختاری شکل (۳) و ریزساختاری اشکال (۱۱) تا (۱۳) و جدول (۵) نشان می‌دهد که روند غیرخطی مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روز با تغییرات ریخت‌شناسی سطح و توزیع فاز ژئوپلیمری قابل توجیه است. مقاومت فشاری نمونه شاهد (بدون ژئوپلیمر) ۲۸ روز برابر ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بود که با افزودن ۱۵ درصد ژئوپلیمر به ۲۳/۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافت؛ این افزایش با ساختار پرتخلخل و لایه‌ای شکل (۱۱) که به تدریج توسط فاز ژل مانند ژئوپلیمری پوشیده می‌شود، همخوانی دارد. با این حال، در نمونه حاوی ۲۰ درصد ژئوپلیمر، مقاومت به ۴۳/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش یافت، در حالی که نسبت Si/Al طبق جدول (۵) در همین درصد همچنان نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان می‌دهد (از ۳/۰۰ در نمونه B28G0 به ۲۵/۳ در نمونه B28G20). این ناهمخوانی ظاهری بین افزایش نسبت Si/Al و کاهش مقاومت را می‌توان مستقیماً در تصاویر SEM شکل (۱۲) مشاهده کرد؛ در این درصد، پوشش فاز ژئوپلیمری تنها به صورت جزئی و ناهمگن روی سطح ذرات بنتونیت شکل گرفته و نواحی قابل توجهی از ساختار لایه‌ای رسی همچنان بدون واکنش باقی مانده است. به بیان دیگر، در نمونه حاوی ۲۰ درصد ژئوپلیمر، مقدار سیلیس واکنش‌پذیر برای پوشش کامل و یکنواخت کل حجم نمونه کافی نبوده و همین امر به شکل‌گیری یک ریزساختار ناهمگن، متشکل از نواحی متراکم‌شده در کنار نواحی متخلخل و ضعیف باقی‌مانده، منجر شده است.

تمرکز تنش در مرزهای بین این دو نوع ناحیه، و نیز تخلخل موضعی باقی‌مانده در بخش‌های پوشش‌نیافته، محتمل‌ترین توضیح برای افت موضعی مقاومت است، نه کاهش سیلیس در دسترس؛ چرا که داده‌های EDS خلاف این را نشان می‌دهند. با افزایش درصد ژئوپلیمر به ۴۰ درصد، مقاومت به‌طور چشمگیری به ۲۲/۶۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسید که با بالاترین نسبت Si/Al برابر ۴/۰۰ طبق جدول (۵) و پوشش کامل و یکنواخت ذرات بنتونیت در ماتریس ژئوپلیمری در شکل (۱۳) کاملاً همخوانی دارد؛ در این حالت، مقدار کافی سیلیس واکنش‌پذیر برای محاط کردن کامل ذرات و پرشدن تقریباً کامل تخلخل‌ها در دسترس بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهبود مقاومت مکانیکی صرفاً تابعی خطی از نسبت Si/Al نیست، بلکه به‌شدت به یکنواختی توزیع فاز ژئوپلیمری در سطح مقطع نمونه وابسته است؛ افت مقاومت در ۲۰ درصد ژئوپلیمر ناشی از توزیع ناهمگن فاز پوشش‌دهنده و تخلخل موضعی باقی‌مانده است، نه کمبود سیلیس در دسترس، موضوعی که تنها از طریق مشاهدات ریزساختاری (SEM) و نه صرفاً داده‌های شیمیایی (EDS) قابل تشخیص است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر به شرح ذیل است:

- ۱- بررسی مقاومت فشاری خاک بنتونیت تثبیت‌شده با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی نشان داد که در زمان عمل‌آوری ۷ روز، مقاومت با افزایش درصد ژئوپلیمر بهبود می‌یابد، اما در دوره ۲۸ روز این روند غیرخطی بوده و نمونه حاوی ۱۵ درصد ژئوپلیمر (در خاک بنتونیت با کانی غالب مونت‌موریلونیت) به عنوان درصد وزنی بهینه، بیشترین مقاومت را نشان داد. افزایش درصد ژئوپلیمر به ۲۰ درصد در دوره ۲۸ روز باعث کاهش مقاومت شد که بیانگر اثر پیچیده زمان و ترکیب شیمیایی در رفتار رس تثبیت شده است.
- ۲- تغییرات کرنش الاستیک در نمونه‌های تثبیت‌شده تا رسیدن به درصد بهینه ۱۵ درصد وزنی کاهشی اما به محض رسیدن به درصد بهینه افزایش از خود نشان می‌دهد که این روند در زمان‌های عمل‌آوری مختلف عملکرد مشابهی دارد.
- ۳- شکل‌پذیری در نمونه‌های تثبیت‌شده در برابر نمونه‌های تثبیت‌نشده در هر دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز با افزایش مقدار پودر شیشه بازیافتی تا رسیدن به میزان ۲۰ درصد وزنی به کمترین مقدار خود رسیده است یعنی نمونه شکل‌پذیری کمتری از خود نشان می‌دهد.
- ۴- به‌طور کلی مدول الاستیسیته در نمونه‌های تثبیت‌شده با زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز به نسبت نمونه تثبیت‌نشده افزایش یافته است که در نمونه با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز با ۱۵ درصد ژئوپلیمر به بیشترین مقدار خود رسیده است. ۱۵ درصد هم ازدیدگاه فنی و

اجرایی قابل اجرا است و هم کاملاً توجیه اقتصادی دارد و به خوبی می‌توان در تثبیت خاک‌های رسی و نیز اجرای ستون‌های خاک سیمان مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) تغییرات ساختاری معناداری را در بنتونیت اصلاح‌شده با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی نشان می‌دهد. این تغییرات عمدتاً شامل کاهش شدت پیک‌های مشخصه مونت‌موریلونیت و همزمان ظهور پیک‌های جدید مربوط به فازهای ژئوپلیمری است. مهم‌ترین فاز تشکیل‌شده، کلسیم-آلومینوسیلیکات هیدراته (C-A-S-H) است که به‌عنوان محصول کلیدی واکنش، نقش اصلی در تثبیت و بهبود مقاومت مکانیکی ساختار دارد.

۶- افزایش درصد پودر شیشه بازیافتی تا ۴۰ درصد، عامل اصلی در افزایش نسبت Si/Al از محدوده ۲-۳ به حدود ۴ در ساختار ژئوپلیمر بود. اگرچه افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز نیز این نسبت را به‌طور مستقل افزایش داد، اما اثر آن در مقایسه با اثر درصد پودر شیشه کمتر بود. با افزایش درصد پودر شیشه، نسبت Si/Al بطور معناداری افزایش یافته که حاکی از تشکیل فازهای ژئوپلیمری غنی از سیلیس و بهبود ریزساختار خاک رس بنتونیت با کانی غالب مونت‌موریلونیت است.

۷- یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در پروژه‌های شهری و صنعتی جهت طراحی و ساخت لایه‌های آب‌بند رسی متراکم^۱ و دیوارهای آب‌بند^۲ در محل دفن پسماندها و همچنین در پروژه‌های راهسازی جهت تثبیت بستر خاکی‌ها و بهسازی زمین‌های رسی نرم با کانی غالب مونت‌موریلونیت، جایی که ترکیب مقاومت مکانیکی کافی با نفوذپذیری پایین و پایداری شیمیایی بلندمدت اهمیت اساسی دارد، به کار رود. از منظر پایداری، جایگزینی سیمان پرتلند با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه بازیافتی، ضمن حفظ یا بهبود عملکرد مکانیکی، به کاهش انتشار کربن و مدیریت پسماند شیشه در طرح‌های عمرانی کمک می‌کند که با اهداف ساخت‌وساز سبز و اقتصادی هم راستا است. همچنین، نتایج XRD و روند تغییرات نسبت Si/Al می‌تواند مبنایی برای تدوین معیارهای کنترل کیفیت میدانی در حین اجرای عملیات تثبیت خاک در کارگاه باشد.

۸- نتایج پژوهش حاضر از دیدگاه ژئوتکنیک زیست‌محیطی در مراکز دفن زباله کاربردهای ارزنده خواهد داشت.

References

- Ahmed, A. (2015). Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite. *Applied Clay Science*, 104, 27–35.
- Al-Soud, M. S., Fartossy, S. H., Jabur, A. R., Majeed, M. W., Madhloom, H. M., & Al-Ansari, N. (2022). Sustainable improvement of bentonite clay characteristics by adding pulverized waste glass. *GEOMATE Journal*, 23(95), 10–19.
- Archibong, G., Sunday, E., Akudike, J., Okeke, O., & Amadi, C. (2020). A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research| Sciences*, 6(3), 2488–9849.
- ASTM D2166/D2166M-24. (2024). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/D2166_D2166M-24.
- Bilgen, G. (2020). Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotechnical and geological engineering*, 38(3), 3163–3173.
- Bilondi, M. P., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2018a). Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and building materials*, 170, 302–313.
- Bilondi, M. P., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2018b). Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder–clay geopolymer. *Construction and building materials*, 183, 417–428.

^۱Compacted Clay Liner

^۲Cut-off-Walls

- Cabalar, A. F., & Demir, S. (2022). Geotechnical properties of a bentonite treated with waste glass grains. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 880.
- Chen, Y.-G., Cai, Y.-Q., Pan, K., Ye, W.-M., & Wang, Q. (2021). Influence of dry density and water salinity on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite–sand mixtures. *Acta Geotechnica*, 1–18.
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314.
- Hamidi, S., & Marandi, S. M. (2018a). Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin. *Applied Clay Science*, 151, 92–101.
- Hamidi, S., & Marandi, S. M. (2018b). Effect of clay mineral types on the strength and microstructure properties of soft clay soils stabilized by epoxy resin. *Geomechanics & engineering*, 15(2), 729–738.
- Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and building materials*, 305, 124685.
- Huat, B. B. (1994). Behaviour of soft clay foundation beneath an embankment. *Pertanika J. Sci. & Technol*, 2(2), 215–235.
- Jobmann, M., & Buntebarth, G. (2009). Influence of graphite and quartz addition on the thermo–physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste. *Applied Clay Science*, 44(3-4), 206–210.
- Komine, H., & Ogata, N. (1999). Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils and foundations*, 39(2), 83–97.
- Modarres, A., & Nosoudy, Y. M. (2015). Clay stabilization using coal waste and lime—Technical and environmental impacts. *Applied Clay Science*, 116, 281–288.
- Murray, H. H. (2006). Bentonite applications. *Developments in Clay Science*, 2, 111–130.
- Ouhadi, V., Yong, R., Amiri, M., & Ouhadi, M. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Applied Clay Science*, 95, 111–118.
- Pascual, A. B., Tognonvi, M. T., & Tagnit-Hamou, A. (2014). Waste glass powder-based alkali-activated mortar. *Int. J. Res. Eng. Technol*, 3(13), 32–36.
- Sasanian, S. (2011). *The behaviour of cement stabilized clay at high water contents*. The University of Western Ontario (Canada).
- Sukpunya, A., & Jotisankasa, A. (2016). Large simple shear testing of soft Bangkok clay stabilized with soil–cement-columns and its application. *Soils and foundations*, 56(4), 640–651.
- Sun, W.-j., Wei, Z.-I., Sun, D.-a., Liu, S.-q., Fatahi, B., & Wang, X.-q. (2015). Evaluation of the swelling characteristics of bentonite–sand mixtures. *Engineering Geology*, 199, 1–11.
- Vichan, S., & Rachan, R. (2013). Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash. *Soils and foundations*, 53(2), 272–281.
- Wang, Q., Meng, Y., Su, W., Ye, W., & Chen, Y. (2022). Analyzing of the hydration crack evolution in compacted GMZ bentonite with consideration of technological void ratio. *Construction and building materials*, 323, 126399.
- Yi, Y., Gu, L., Liu, S., & Jin, F. (2016). Magnesia reactivity on activating efficacy for ground granulated blastfurnace slag for soft clay stabilisation. *Applied Clay Science*, 126, 57–62.