



Laboratory Study on The Effect of Iron Powder Additive on Increasing the Compressive Strength of Bentonite Clay Soil

Hamed Yousefi^{1*}, Seyed Morteza Marandi², Salaheddin Hamidi³

¹ PhD Candidate of Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

² Professor of Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

³ Assistant Professor of Civil Engineering, Kaboudarahang Faculty of Technology and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2025.05.10

Revised: 2025.10.09

Accepted: 2025.10.26

Keyword:

Bentonite

Soil Stabilisation

Iron Powder

Clay Soil

UCS

*Corresponding Author:

Hamed Yousefi

Email:

Hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir

ABSTRACT

The presence of soft clay soils in different parts of the land and their poor geotechnical properties, such as low strength and high compressibility, pose significant challenges in construction over these soils. Volumetric instability of clay soils due to changes in the groundwater regime can cause serious damage to structures built upon them. To improve the performance of these soils, suitable methods should be employed. In this study, waste iron powder and cement additives were used to stabilise bentonite clay soil. The prepared samples were cured for 7 and 28 days, and tests including grain-size distribution, Atterberg limits, and uniaxial compressive strength were conducted. The results show that the uniaxial compressive strength of the 28-day samples was 6 and 12 times greater than that of the 7-day samples when stabilised with cement alone or iron powder alone, respectively. Additionally, the optimal percentages of iron powder and cement were 10% and 20% of the dry weight of the bentonite clay soil. These findings are particularly important from an environmental perspective, given the utilisation of waste iron powder, which otherwise causes environmental pollution, for soft clay soil stabilisation, and will be beneficial for projects constructed over such soils.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Loose fine-grained soils have various disadvantages such as low adhesion, significant swelling, settlement, and low compressive and shear strength. Loose clay soils are one of the loose fine-grained soils that cover a significant portion of the earth's surface, and engineers have always thought about improving this type of soil for various projects. Cement and lime are two traditional additives that have long been used to stabilize problematic soils. With the passage of time and technological advancement, many studies have been conducted by researchers in different parts of the world to find new methods to improve and increase the quality of loose clay soils. Considering the above-mentioned issues, this study focuses on stabilizing bentonite clay with different percentages of iron powder and cement.

Methodology

The clay soil used in this study is bentonite. The iron powder used was obtained from the Gol Gohar Steel and Iron Factory in Sirjan. The cement used is also type 2. Table 1 relates to the parameters of bentonite soil and Table 2 relates to the pattern of sample preparation for UCS testing.

Table 1. Geotechnical and geotechnical environmental properties of bentonite clay samples

Properties	Data
XRD Analysis	Montmorillonite, Carbonate, Quartz, Kaolinite
SSA (m ² /g)	151.8
pH	9.64
Clay (%)	78
Silt (%)	22
Sand (%)	0
Liquid limit (%)	160
Plastic Limit (%)	40
Plasticity Index (%)	120
Gs	2.86
Classification	CH

Results and discussion

Figures 1 and 2 are the results of the uniaxial compressive strength test of samples prepared from a combination of bentonite soil and cement with percentages of (0, 5, 10 and 20) and bentonite soil and iron powder with percentages of (0, 5, 10 and 20). According to the figures, it can be seen that the uniaxial compressive strength of 28-day samples is several times that of 7-day samples. Also, the optimal percentage of cement and iron powder for stabilizing bentonite soil is 20 and 10 percent of the dry weight of bentonite soil, respectively.

Table 2. Laboratory sample preparation pattern and codes used

7-day sample	28-day sample	28 day sample combinations
B1-7	B1-28	Ben
B2-7	B2-28	Ben + 5% PFe

B3-7	B3-28	Ben + 10% PFe
B4-7	B4-28	Ben + 20% PFe
B5-7	B5-28	Ben + 5% Cem
B6-7	B6-28	Ben + 10% Cem
B7-7	B7-28	Ben + 20% Cem
B8-7	B8-28	Ben + 5% PFe + 5% Cem
B9-7	B9-28	Ben + 5% PFe + 10% Cem
B10-7	B10-28	Ben + 5% PFe + 20% Cem
B11-7	B11-28	Ben + 10% PFe + 5% Cem
B12-7	B12-28	Ben + 10% PFe + 10% Cem
B13-7	B13-28	Ben + 10% PFe + 20% Cem
B14-7	B14-28	Ben + 20% PFe + 5% Cem
B15-7	B15-28	Ben + 20% PFe + 10% Cem
B16-7	B16-28	Ben + 20% PFe + 20% Cem

In Figure 3, graphs A, B, and C, respectively, correspond to the results of uniaxial compressive strength tests of samples prepared from a combination of bentonite, iron powder, and cement simultaneously. According to the graphs, it can be seen that as the curing time of the samples increases, the uniaxial compressive strength also increases. We also conclude that as the curing time of the samples increases, it is the chemical reaction that occurs between the constituent elements of the sample that determines the value of the uniaxial compressive strength, not the maximum percentage of iron powder and cement used to stabilize bentonite soil.

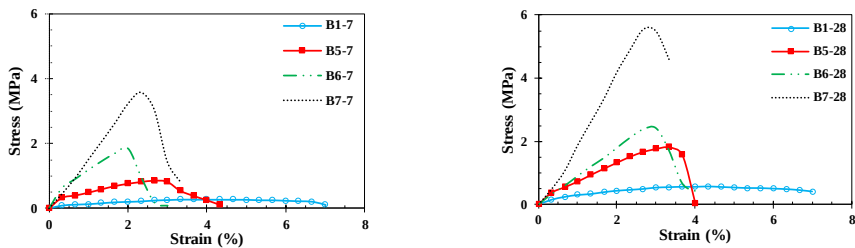


Figure 1. Stress-strain diagram of 7 and 28 day samples of cement-stabilized bentonite

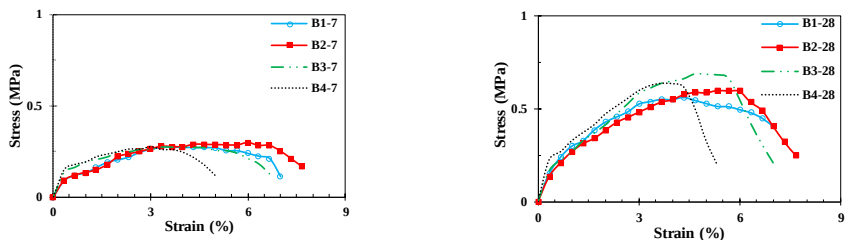
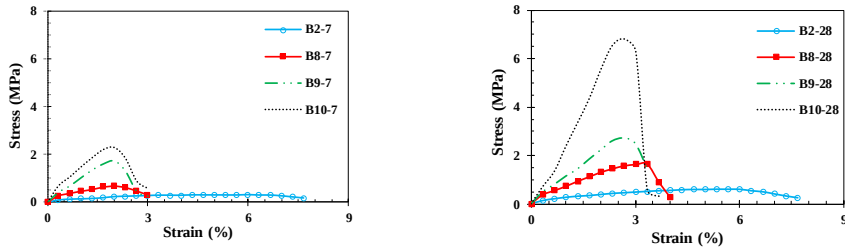
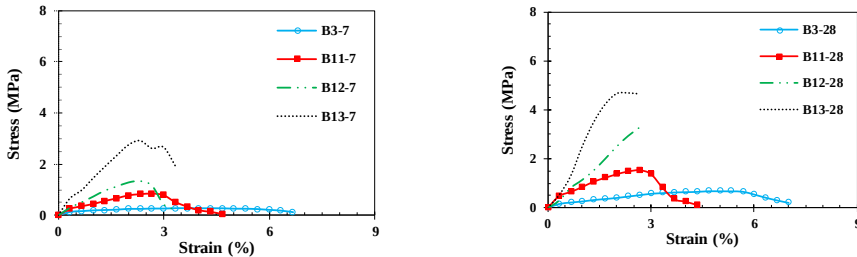


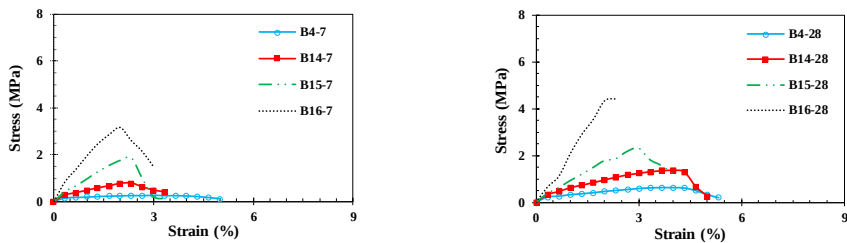
Figure 2. Stress-strain diagram of 7 and 28 day samples of bentonite stabilized with iron powder



A) Stress-strain diagram of bentonite soil stabilized with 5% iron powder and different percentages of cement



B) Stress-strain diagram of bentonite soil stabilized with 10% iron powder and different percentages of cement



C) Stress-strain diagram of bentonite soil stabilized with 20% iron powder and different percentages of cement

Figure 3. Stress-strain diagram of bentonite soil stabilized with iron powder and cement

Conclusion

This paper is a laboratory study of the stress-strain behavior of bentonite clay stabilized with different percentages of iron powder and cement. The main findings and conclusions of this study are as follows:

1- According to the results obtained, the average uniaxial compressive strength of 28-day samples stabilized with cement only is 58 percent higher than that of 7-day samples stabilized with cement only, and the average uniaxial compressive strength of 28-day samples stabilized with iron powder only is 120 percent higher than that of 7-day samples stabilized with iron powder only.

2- By examining the results obtained from samples in which bentonite soil stabilization was performed simultaneously with iron powder and cement, it was observed that the highest uniaxial compressive strength for 7-day samples was related to sample (B16-7) with a value of 3.174 MPa, which is the highest percentage of iron powder and cement used in this sample. However, this same sample (B16-7) with a curing period

of 28 days had a uniaxial compressive strength of 4.428 MPa, which is lower than the highest uniaxial compressive strength of 28-day samples related to sample (B10-28) with a value of 6.817 MPa and is far from it.



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزودنی پودر آهن بر افزایش مقاومت فشاری خاک رسی بنتونیت

حامد یوسفی^{۱*}، سید مرتضی مرندي^۲، صلاح‌الدین حمیدی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

کلید واژگان:

بنتونیت
تثبیت خاک
پودر آهن
خاک رس
مقاومت فشاری تک محوری

*نویسنده مسئول:

حامد یوسفی

پست الکترونیکی:

Hamed.yousefi@eng.uk.ac.ir

وجود خاک‌های رسی نرم در نقاط مختلف سطح زمین و نیز دارا بودن ویژگی‌های ژئوتکنیکی ضعیف این نوع خاک‌ها، از جمله مقاومت کم و تراکم‌پذیری زیاد، در اغلب اوقات اجرای سازه‌های مختلف بر روی این نوع خاک‌ها را با مشکل مواجه خواهد ساخت. ناپایداری حجمی خاک‌های رسی در اثر تغییرات رژیم آب‌های زیرزمینی می‌تواند آسیب جدی به سازه‌های احداث شده بر روی این نوع خاک‌ها وارد نماید. در همین راستای به منظور بهبود عملکرد این خاک‌ها، به روش‌های متناسب بهسازی می‌گردند. در پژوهش حاضر جهت تثبیت خاک رس بنتونیت از افزودنی‌های پودر آهن دورریز و سیمان استفاده شد. نمونه‌های تهیه شده در دو بازه زمانی ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شده و آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ۲۸ روزه در نمونه‌هایی که فقط با سیمان و یا فقط با پودر آهن تثبیت شده بود به ترتیب ۱۲ و ۲۰ برابر نمونه‌های ۷ روزه بود. همچنین مقدار درصد بهینه پودر آهن و سیمان، به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی خشک خاک بنتونیت تعیین شد. نتایج پژوهش بواسطه‌ی استفاده از دورریزهای مضر پودر آهن که باعث آلودگی محیط زیست و بخصوص آلودگی شدید هوا می‌شود از دیدگاه زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت بوده و در پروژه‌هایی که بر روی خاک رس سست اجرا می‌شود کاربرد خواهد داشت.



مقدمه

خاک‌های ریزدانه سست دارای معایب مختلفی نظیر تورم قابل توجه، نشست و مقاومت فشاری و برشی ناچیز می‌باشند [۱-۲]. خاک‌های رسی سست یکی از خاک‌های ریزدانه سست می‌باشند که بخش قابل توجهی از سطح زمین را پوشانده‌اند و مهندسین برای اجرای پروژه‌های مختلف همواره به فکر به‌سازی این نوع از خاک‌ها بوده‌اند. سیمان و آهک دو ماده افزودنی سنتی است که از دیرباز برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مورد استفاده قرار گرفته است. با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی مطالعات زیادی توسط محققین در نقاط مختلف جهان برای یافتن روش‌های جدید به‌سازی و افزایش کیفیت خاک‌های رسی سست انجام شده است [۳-۱۰].

ساریده و دوتا (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر خاکستر بادی با درصد وزنی ۵ تا ۲۰ درصد وزن خشک خاک رس پرداختند. نمونه‌های تهیه شده به مدت ۷، ۱ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها تأثیر کمی در نتایج بدست آمده دارد و همچنین مشاهده شد که مدول برشی خاک رس افزایش و نسبت میرایی نظیر با افزایش درصد خاکستر بادی کاهش می‌یابد [۱۱].

الناس و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی ترکیب دو ماده افزودنی پودر شیشه و ضایعات آلومینیوم با درصدهای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک، با خاک رس پرداختند. براساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، افزودن پودر شیشه باعث کاهش و افزودن ضایعات آلومینیوم باعث افزایش مقاومت خاک رس می‌شود [۱۲].

دبناس و چوسکی (۲۰۲۲)، به بررسی اثرات سرباره مس بر خواص ژئوتکنیکی خاک رس پرداختند. به این ترتیب که سرباره مس را با مقادیر (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) چگالی خشک خاک ترکیب نموده و پس از عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بر روی نمونه‌ها انجام شد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، وجود سرباره مس تأثیر قابل توجهی بر (UCS) خاک رس دارد. همچنین مشاهده شد که افزودن سرباره مس باعث کاهش میزان رطوبت بهینه و همچنین افزایش حداکثر چگالی خشک خاک خواهد شد [۱۳].

توران و همکاران (۲۰۲۲) با انجام یک سری از آزمایش‌ها به بررسی رفتار خاک رس با افزودن خاکستر بادی فعال شده با سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم پرداختند. نمونه‌ها به دو صورت خاک رس تثبیت شده با خاکستر بادی بدون فعال‌کننده شیمیایی و با فعال‌کننده شیمیایی تهیه شده و برای انجام آزمایش‌ها به مدت ۷، ۱ و ۲۸ روز عمل‌آوری شد. نتایج بدست آمده نشان داد که در نمونه‌های دارای فعال‌کننده شیمیایی سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های بدون فعال‌کننده شیمیایی داشته است [۱۴].

محمدزاده و توفیق (۲۰۲۲)، به بررسی امکان اصلاح پارامترهای مقاومتی و دوام خاک رس با ژئوپلیمر حاصل از پودر شیشه بازیافتی پرداختند. بدین منظور آزمایش‌های (UCS)، نسبت باربری کالیفرنیا، ذوب-یخبندان و تر-خشک شدن بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده انجام شد. همچنین برای مقایسه نتایج، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های اصلاح شده با ۱۰ درصد سیمان پرتلند تیپ ۲ نیز انجام شد. براساس نتایج آزمایش‌های (UCS)، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با ژئوپلیمر چهار برابر نمونه‌های اصلاح شده با سیمان پرتلند است. همچنین براساس نتایج آزمایش‌های تر-خشک شدن، نمونه‌های اصلاح شده با سیمان پرتلند دوام بیشتری نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری از خود نشان داد [۱۵].

جعفری و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تثبیت خاک رس با الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان و آهک پرداختند. افزودنی‌هایی با درصدهای مختلف به خاک رس اضافه شده و پس از تهیه نمونه‌ها، نمونه‌ها به مدت ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس نمونه‌ها مورد آزمایش (UCS) قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که وجود الیاف در خاک رس باعث افزایش (UCS) و کرنش گسیختگی شد و همچنین مقدار بهینه الیاف ۰/۴ درصد تعیین شد [۱۶].

عمر و همکاران (۲۰۲۳) با انجام آزمایش (UCS) به بررسی تثبیت خاک رس با کمک پودر سنگ مرمر پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن پودر سنگ مرمر به خاک رس باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت خاک رس شده است [۱۷].

باکام و همکاران (۲۰۲۳) به مطالعه تثبیت خاک رس با افزودن خاکستر بادی (به صورت ثابت ۲۰ درصد وزنی خاک) و پوسته تخم مرغ (با درصدهای صفر، ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی خاک) پرداختند و آزمایش‌های برش مستقیم و (UCS) را روی نمونه‌های تهیه و عمل آوری شده انجام دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های تثبیت شده با درصد بیشتری از پودر پوسته تخم مرغ دارای مقاومت برشی و فشاری بیشتری در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای کم از پودر پوسته تخم مرغ می‌باشد [۱۸].

آقایان و دبیری (۲۰۲۴) بر اساس مجموعه‌ای از آزمایش‌ها به بررسی تأثیر همزمان آهک هیدراته و خاکستر زغال سنگ بر رفتار و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس پرداختند. در همین راستا آهک هیدراته را با درصدهای ۴، ۶ و ۷ و خاکستر ذغال سنگ را با درصدهای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ با خاک رس مخلوط کرده و به مدت ۲۸ روز عمل آوری شد. نتایج مطالعات انجام شده بیانگر آن است که مخلوط ۷٪ آهک هیدراته با ۵۰٪ خاکستر ذغال سنگ پس از عمل آوری ۲۸ روزه ترکیب مناسب جهت تثبیت خاک رس می‌باشد؛ زیرا مقاومت فشاری تک محوری را ۱/۸۷ برابر و مقاومت برشی را ۱/۳۴ برابر افزایش داده است [۱۹].

چاودری و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی اثر نانو سیلیس و سیمان بر خواص ژئوتکنیکی خاک رس بنتونیتی به صورت جداگانه و ترکیبی پرداختند. در نمونه‌های تهیه شده، نانو سیلیس به میزان ۰/۲ تا ۱ درصد و سیمان ۴ تا ۸ درصد وزن خشک بنتونیت بود که بعد از انجام آزمایش‌ها دریافتند که ترکیب ۰/۸ درصد نانو سیلیس به همراه ۴ درصد سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری میزان تنش محوری، تنش کششی و نسبت باربری خاک رس بنتونیت دچار افزایش چشمگیری شده است [۲۰]. پرورش و همکاران (۲۰۲۴) مواد افزودنی نانو سیمان را با درصدهای ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی خاک، جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه بادی مخلوط شده با بنتونیت مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل آوری شده و سپس تحت آزمایش‌های تراکم، (UCS)، برش مستقیم و نسبت باربری کالیفرنیا قرار گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بهترین حالت ترکیب ۰/۶ درصد نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه در خاک مخلوط ماسه بادی به همراه ۱۵ درصد بنتونیت می‌باشد [۲۱].

همانگونه که مشاهده شد مطالعات زیادی در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با افزودنی‌های مختلف انجام شده است. اما علی‌رغم مطالعات زیادی که انجام شده است، تاکنون مطالعات جامعی توسط محققین بر روی تأثیر افزودن پودر آهن با حضور سیمان جهت تثبیت خاک‌های رسی انجام نشده است. از این رو در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، نمونه‌هایی از خاک رس بنتونیت (Bent) با (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰) درصد از پودر آهن (PFe) و سیمان (Cem) به صورت تکی و ترکیبی تهیه و در زمان‌های مختلف عمل آوری شد و سپس روی نمونه‌ها آزمایش مقاومت فشاری تک محوری انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این بخش از مطالعات به ترتیب به تشریح مواد و مصالح مورد استفاده، الگوی آزمایش‌ها و نحوه تهیه نمونه‌ها پرداخته شده است.

مواد مورد استفاده

خاک رسی مورد استفاده در این مطالعه بنتونیت می‌باشد که به صورت پودر (شکل ۱-الف) است. نمونه‌ی رسی بنتونیت با نام بنتونیت فلات ایران شناخته می‌شود و محصول شرکت ایران باریت می‌باشد که در جدول (۱) ویژگی‌های

ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی آن ارائه شده است. همچنین پودر آهن مورد استفاده به عنوان ماده افزودنی جهت تثبیت خاک رس به رنگ سیاه (شکل ۱-ب) می باشد که از کارخانه توسعه فولاد و آهن گل گوهر در شهرستان سیرجان، استان کرمان تهیه شده است. لازم به ذکر است پودر آهن مصرف شده در این مطالعه محصول جانبی و دورریز کارخانه های گندله سازی و تولید آهن می باشد که باعث آلودگی محیط زیست و بخصوص آلودگی شدید هوا می شود و این امر باعث به وجود آمدن بیماری های تنفسی حاد در مردم ساکن آن منطقه و بخصوص کارکنان آن کارخانه ها می شود. لذا بازگرداندن این مواد به چرخه استفاده مجدد هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ زیست محیطی دارای اهمیت زیادی می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر، مشخص شد که می توان از پودر آهن جهت تثبیت خاک های رسی استفاده نمود و با انجام این کار باعث جلوگیری از آلودگی های زیست محیطی و گسترش بیماری ها شد. برای شناسایی پارامترهای تشکیل دهنده پودر آهن ابتدا از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد و سپس آنالیز EDS بر روی مواد رد شده از الک ۲۰۰ انجام شد. نمودار آنالیز EDS پودر آهن در شکل (۲) و آنالیز شیمیایی آن بر حسب درصد وزنی (W%) و درصد مولی (A%) در جدول (۲) ارائه شده است. سیمان مورد استفاده نیز از نوع تیپ ۲ می باشد (شکل ۱-ج) که از کارخانه سیمان صوفیان در ۲۰ کیلومتری شهر تبریز، استان آذربایجان شرقی تهیه شده و آنالیز شیمیایی آن در جدول (۳) ارائه شده است.



ج) سیمان



ب) پودر آهن



الف) بنتونیت

شکل ۱. تصاویر مواد و مصالح مورد استفاده در این مطالعه.

جدول ۱. ویژگی های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه رسی بنتونیت.

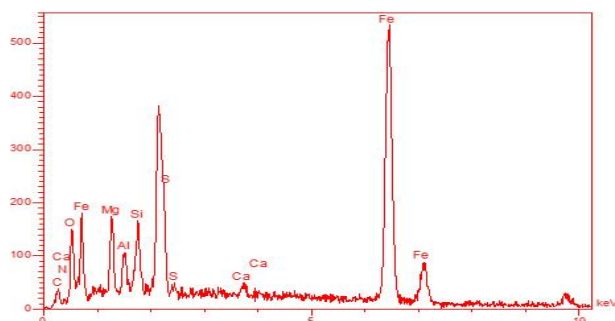
پارامترها	مقدار/مشخصات
کانی های اصلی در آنالیز XRD	مونت موریلونیت، کربنات، کوارتز و کانولینیت
سطح ویژه (متر مربع بر گرم)	۱۵۱/۸
PH	۹/۶۴
رس (%)	۷۸
سیلت (%)	۲۲
ماسه (%)	۰
حد روانی (%)	۱۶۰
حد خمیری (%)	۴۰
شاخص خمیری (%)	۱۲۰
چگالی ویژه	۲/۸۶
طبقه بندی (روش متحد)	CH

جدول ۲. آنالیز شیمیایی پودر آهن مورد استفاده.

عناصر	درصد مولی A(%)	درصد وزنی W(%)
کربن	۲۲/۸۰	۸/۰۲
نیتروژن	۲/۹۸	۱/۲۲
اکسیژن	۱۵/۴۹	۷/۳۵
منیزیم	۶/۳۲	۴/۵۰
آلومینیوم	۲/۸۲	۲/۲۳
سیلیس	۴/۰۱	۳/۳۰
سولفوریک اسید	۱/۱۶	۱/۰۹
کلسیم	۰/۵۱	۰/۶۰
آهن	۴۳/۹۲	۷۱/۸۰

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان تیپ ۲ مورد استفاده.

پارامترها	مقدار/مشخصات
اکسید سیلیسیم	۲۱/۷۰
اکسید آلومینیوم	۵/۲۲
اکسید فریک	۳/۷۴
اکسید کلسیم	۶۴/۴۴
اکسید منیزیم	۲/۲۲
افت در اثر احتراق	۱/۳۶
سولفیت	۲/۰۰
باقیمانده نامحلول	۰/۶۲
اکسید سدیم	۰/۲۲
اکسید پتاسیم	۰/۵۸
یون کلرید	۰/۰۱۰
آهک آزاد	۱/۳۵
فاکتور اشباع آهک	۹۰/۹۰
مدول سیلیسیم	۲/۴۲
مدول آلومینا	۱/۴۰
سیلیکات تری کلسیم	۵۱/۳۰
سیلیکات دی کلسیم	۲۳/۵۲
آلومینات تری کلسیم	۷/۵۰
آلومینوفریت تتراکلسیم	۱۱/۳۷
نسبت آهک به سیلیس	۲/۹۷
آلیت و بلیت کل	۷۴/۸۱



شکل ۲. نمودار آنالیز EDS پودر آهن.

الگوی انجام آزمایش‌ها و نحوه تهیه نمونه‌ها

هدف از انجام پژوهش حاضر تثبیت خاک رس بنتونیت با افزودن پودر آهن و سیمان به آن است. آزمایش‌های انجام شده دانه‌بندی، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری بوده و روش ساخت نمونه‌ها دانسیته-کنترل می‌باشد که پودر آهن با درصدهای (۵، ۱۰ و ۲۰) و سیمان با درصدهای (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰) با خاک رس بنتونیت مخلوط و ترکیب شده است. در جدول (۴) الگوی ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. براساس روش دانسیته-کنترل دانسیته خشک و درصد رطوبت در تمامی نمونه‌ها، به ترتیب $1/5$ و 35 درصد، یکسان در نظر گرفته شد که پارامترها و متغیرهای مهم دانسیته و در صد رطوبت موجب تغییر در نتایج آزمایش‌ها نگردد و صرفاً تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده بررسی گردد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، نمونه‌ی رسی بنتونیت به صورت خشک، ابتدا فقط با درصدهای مختلفی از پودر آهن و سپس با درصدهای مختلفی از سیمان و در نهایت به طور همزمان با درصدهای مختلفی از پودر آهن و سیمان مخلوط شد و این کار تا زمانی که مخلوط ظاهری یکنواخت و همگن پیدا کند ادامه داده شد. در مرحله بعدی رطوبت مورد نظر به ترکیب اضافه و به طور کامل مخلوط شد به صورتی که رطوبت نقاط مختلف نمونه یکسان شده و نمونه همگن گردد. سپس مخلوط بدست آمده از لحاظ وزنی به ۳ قسمت مساوی تقسیم و در ۳ مرحله در قالب آزمون تک محوری به ارتفاع $7/62$ و قطر $3/81$ سانتیمتر بر اساس استاندارد (ASTM, D2166) متراکم شد [۲۲]. لازم به ذکر است چون در این مطالعه نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت، بنابراین الگوی ارائه شده در جدول (۴) برای ساخت نمونه‌ها، در ۲ سری تهیه شد. همچنین تمامی نمونه‌های تهیه شده جهت انجام آزمایش به مدت ۷ و ۲۸ روز در داخل نایلون‌های زیپ کیپ نگهداری و عمل آوری شد که رطوبت نمونه‌ها ثابت بماند.



شکل ۳. تصاویر نمونه‌های تهیه شده و عمل آوری آن‌ها.

جدول ۴. الگوی تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و کدهای مورد استفاده.

کد نمونه ۷ روزه	کد نمونه ۲۸ روزه	ترکیبات نمونه ۷ و ۲۸ روزه
B1-7	B1-28	Ben
B2-7	B2-28	Ben + 5% PFe
B3-7	B3-28	Ben + 10% PFe
B4-7	B4-28	Ben + 20% PFe
B5-7	B5-28	Ben + 5% Cem
B6-7	B6-28	Ben + 10% Cem
B7-7	B7-28	Ben + 20% Cem
B8-7	B8-28	Ben + 5% PFe + 5% Cem
B9-7	B9-28	Ben + 5% PFe + 10% Cem
B10-7	B10-28	Ben + 5% PFe + 20% Cem
B11-7	B11-28	Ben + 10% PFe + 5% Cem
B12-7	B12-28	Ben + 10% PFe + 10% Cem
B13-7	B13-28	Ben + 10% PFe + 20% Cem
B14-7	B14-28	Ben + 20% PFe + 5% Cem
B15-7	B15-28	Ben + 20% PFe + 10% Cem
B16-7	B16-28	Ben + 20% PFe + 20% Cem

تجزیه و تحلیل نتایج

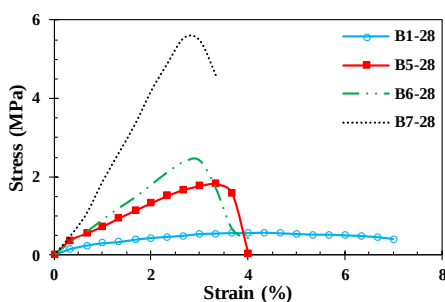
در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج پارامترهای مکانیکی شامل پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج نمونه رسی بنتونیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان

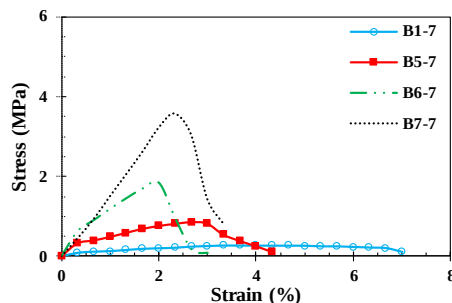
در شکل (۴) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های خاک رس بنتونیت تثبیت شده با سیمان نشان شده است. همانگونه که ذکر شد برای تثبیت نمونه‌ها از درصد‌های (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰) در صد سیمان استفاده گردید. نمودارهای نشان داده شده در شکل (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده می‌باشد. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش شکل (۴) می‌توان بیان نمود که با افزودن سیمان به خاک بنتونیت پارامترهای مقاومتی خاک در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته است. همچنین با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۴)، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری خاک بهبود یافته و افزایش چشمگیری از خود نشان داده است [۴]. بر روی نمودار شکل (۴-الف) که مربوط به نمونه‌های ۷ روزه می‌باشد نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B5-7) نسبت به نمونه (B1-7) و نمونه (B6-7) نسبت به (B1-7) و نمونه (B7-7) نسبت به (B1-7) به ترتیب ۲۱۲، ۵۶۶ و ۱۱۹۱ درصد افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که به ازای هر ۵ درصد افزایش سیمان در ترکیب نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری بیش از ۲ برابر نسبت به مقاومت فشاری نمونه قبلی افزایش یافته است. بررسی نمودار شکل (۴-ب) که مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه می‌باشد، نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B5-28)، (B6-28) و (B7-28) نسبت به (B1-28) به ترتیب ۲۲۴، ۳۳۱ و ۸۸۶ درصد افزایش یافته است. این امر نشان دهنده افزایش چندین برابری مقاومت فشاری تک محوری به ازای هر ۵ درصد افزایش مقدار سیمان در نمونه‌ها است. همچنین با بررسی نمودارهای (الف و ب) شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان در نمونه‌ها، کرنش کاهش می‌یابد و رفتار نمونه‌ها حالت خطی پیدا می‌کنند.

با مقایسه نمودارهای (الف و ب) شکل (۴) با یکدیگر، نتیجه‌گیری می‌شود که مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B1-28) نسبت به نمونه (B1-7) و مقاومت فشاری نمونه (B5-28) نسبت به (B5-7) و نمونه (B6-28) نسبت به (B6-7) و نمونه (B7-28) نسبت به (B7-7) به ترتیب ۱۰۳، ۱۱۰، ۳۱ و ۵۵ درصد افزایش یافته است. بنابراین

می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه نمودار (الف و ب) شکل (۴) با یکدیگر مشاهده شد که با افزایش درصد سیمان در ترکیب نمونه‌ها و همچنین با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، نه تنها کرنش نمونه‌ها کاهش نیافته است بلکه کرنش نمونه (B6-28) نسبت به نمونه (B6-7) افزایش نیز یافته است. همچنین با مقایسه نمودارهای (الف و ب) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه سیمان برای تثبیت خاک بنتونیت، ۲۰ درصد وزنی خشک خاک بنتونیت می‌باشد.

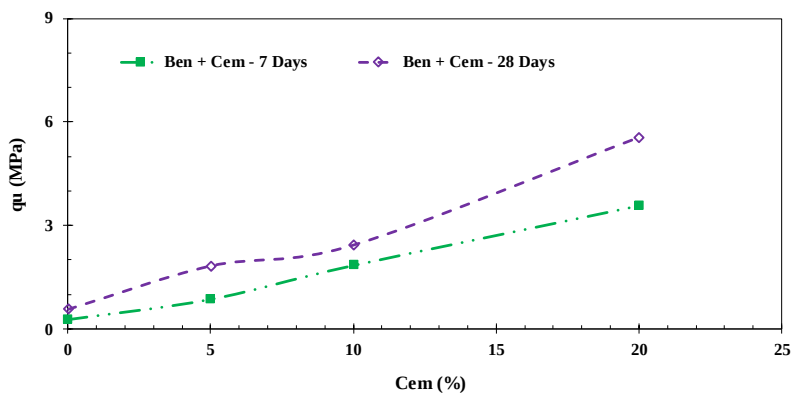


ب: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



الف: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ روزه

شکل ۴. نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه بنتونیت تثبیت شده با سیمان.



شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با درصد‌های مختلف سیمان.

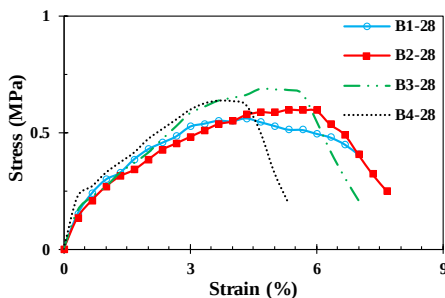
در نمودار شکل (۵)، محور قائم مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u) نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه تثبیت شده با سیمان و محور افقی درصد سیمان است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار درصد سیمان ترکیبی در نمونه‌ها و همچنین با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج نمونه‌های رسی بنتونیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف پودر آهن

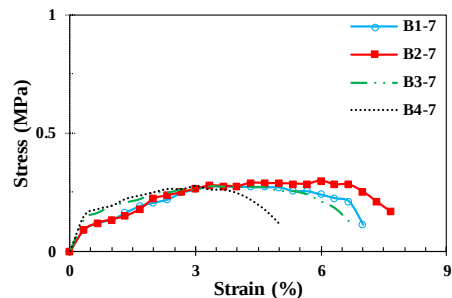
شکل (۶) مربوط به نمودارهای تنش-کرنش خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن می‌باشد. برای تثبیت نمونه‌ها پودر آهن با مقادیر (۰، ۱۰ و ۲۰) درصد وزنی خشک خاک بنتونیت اضافه شده است. نمودار (الف و ب) شکل (۶)

به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده می‌باشد. با توجه به نمودار (الف) در شکل (۶)، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (B2-7)، (B3-7) و (B4-7) نسبت به (B1-7) به ترتیب ۰، ۷ و ۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده برای مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ۷ روزه، مشاهده می‌شود که نمونه‌های (B2-7)، (B3-7) و (B4-7) نسبت به (B1-7) افزایش چندانی ندارد. با بررسی نمودار (ب) در شکل (۶)، مشاهده شد که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (B2-28)، (B3-28) و (B4-28) نسبت به (B1-28) به ترتیب ۷، ۲۳ و ۱۴ درصد افزایش یافته است. یعنی به ازای افزایش هر ۵ درصد مقدار پودر آهن در نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش (الف و ب) شکل (۶) با یکدیگر مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه (B1-28) نسبت به (B1-7)، نمونه (B2-28) نسبت به (B2-7)، نمونه (B3-28) نسبت به (B3-7) و نمونه (B4-28) نسبت به (B4-7)، ۱۰۳، ۱۰۲، ۱۴۹ و ۱۲۹ درصد افزایش یافته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار بهینه پودر آهن برای تثبیت خاک بنتونیت، ۱۰ درصد وزن خشک خاک بنتونیت می‌باشد. همچنین با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش (الف و ب) شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، نه تنها کرنش نمونه‌ها کاهش نیافته بلکه مقدار آن افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که افزایش مقدار درصد پودر آهن در نمونه‌ها و همچنین افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، علاوه بر اینکه باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک بنتونیت می‌شود، بلکه همزمان باعث افزایش شکل‌پذیری خاک تثبیت شده نیز می‌شود.



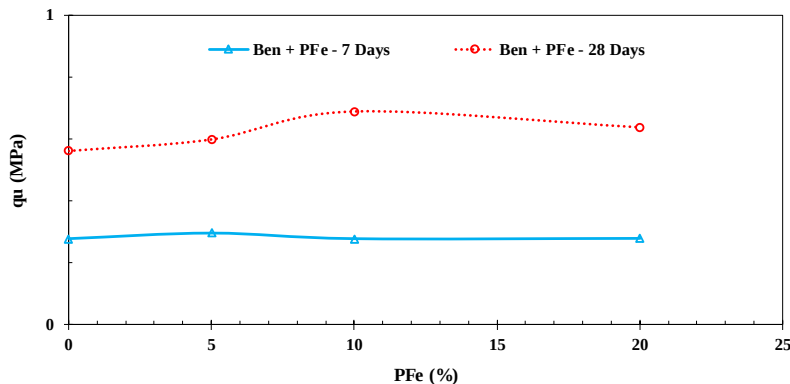
ب: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



الف: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ روزه

شکل ۶. نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن.

در نمودار شکل (۷)، محور قائم مقاومت فشاری (qu) تک‌محوری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه تثبیت شده با پودر آهن و محور افقی مقدار درصد پودر آهن است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار درصد پودر آهن، مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه تقریباً با هم برابر بوده و تقریباً به صورت یک خط با شیب صفر است.



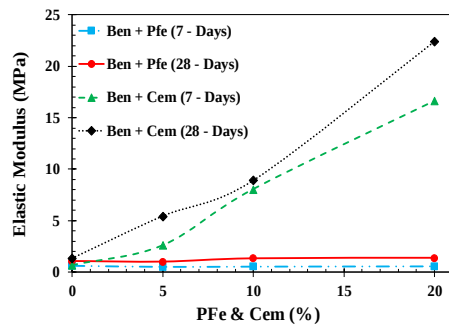
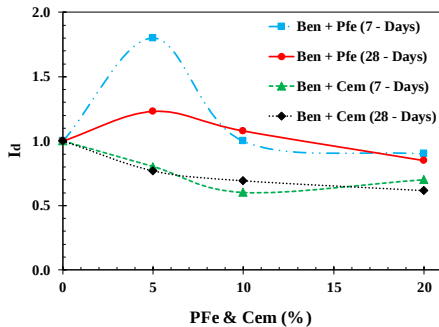
شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با درصد‌های مختلف پودر آهن.

تحلیل تأثیر سیمان و پودر آهن بر مدول الاستیسیته و شکل پذیری نمونه‌های خاک بنتونیت

در شکل‌های (۴ و ۶) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان به صورت تکی نشان داده شده است. مدول الاستیسیته شیب قسمت خطی نمودار تنش-کرنش در ناحیه الاستیک می‌باشد [۲۳]. شکل (۸-الف) مربوط به نمودار مدول الاستیک نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان است. بر اساس نمودار شکل (۸-الف) مشاهده شد که مدول الاستیسیته در نمونه‌هایی که فقط با پودر آهن تثبیت شده‌اند بعد از مقدار درصد بهینه پودر آهن کاهش یافت. و در نمونه‌هایی که فقط با سیمان تثبیت شده‌اند با افزایش مقدار درصد سیمان در نمونه‌ها و با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی بین ترکیبات کانی‌های رسی و سیمان به خوبی انجام شده که این امر باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته در نمونه‌ها شده است. و این نتیجه با نتایج مطالعات (حمیدی و مرندي، ۲۰۱۸) مطابقت دارد [۴]. ولی در نمونه‌هایی که فقط با پودر آهن تثبیت شده‌اند با افزایش مقدار درصد پودر آهن به بیش از مقدار بهینه، پودر آهن مانع از واکنش مناسب با خاک بنتونیت شده است که این امر باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته در نمونه‌ها شده است. جهت بررسی مقدار شکل پذیری نمونه‌های تهیه شده، از ضریب افزایش شکل پذیری که در رابطه (۱) به آن اشاره شده است، استفاده می‌شود [۲۴]:

$$I_d = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{cu}} \quad \text{فرمول ۱}$$

در رابطه (۱)، I_d بیانگر ضریب افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها، ε_{ct} مربوط به کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌های تثبیت شده با پودر آهن و سیمان و ε_{cu} مربوط به کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌های تثبیت نشده است. بر اساس نمودار شکل (۸-ب)، با افزایش مقدار پودر آهن در نمونه‌ها، میزان شکل‌پذیری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. که این افزایش تغییر شکل در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با میزان پودر آهن ۵ درصد اتفاق افتاده است. و با افزایش مقدار سیمان در نمونه‌ها، نمودار نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه نزولی است که بیانگر کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها است.



شکل ۸. الف) نمودار مدول الاستیسیته و ب) نمودار شاخص شکل پذیری.

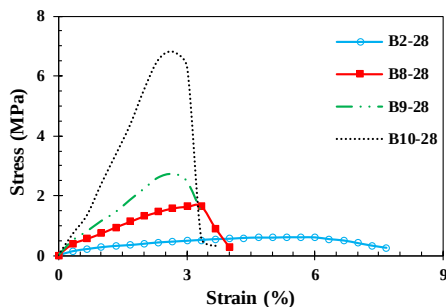
تجزیه و تحلیل نمونه رسی بنتونیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و پودر آهن

در این بخش به بررسی و مقایسه نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های تهیه شده از خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلفی از پودر آهن و سیمان پرداخته شده است. در نمودارهای (الف و ب) شکل (۹) که به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه می‌باشند، مقدار پودر آهن به صورت ثابت ۵ درصد می‌باشد و فقط مقدار سیمان با درصد‌های (۵۰، ۱۰ و ۲۰) در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارهای (الف و ب) شکل (۹)، مشاهده می‌شود که با افزودن سیمان به نمونه‌های حاوی ۵ درصد پودر آهن، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد ولی محدوده کرنش نمونه‌ها به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. و همچنین در نمودار (الف) مقدار درصد سیمان تأثیری در محدوده کرنش نمونه‌ها ندارد، چون کرنش هر ۳ نمونه (B8-7)، (B9-7) و (B10-7) در یک محدوده قرار دارند. در نمودار (ب) شکل (۹) نیز کرنش نمونه‌ها در یک محدوده خیلی نزدیک به هم قرار دارد. در نمودار (الف) شکل (۹)، مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B8-7)، (B9-7) و (B10-7) نسبت به (B2-7)، به ترتیب ۱۲۹، ۴۸۷ و ۶۷۰ درصد افزایش یافته است. و این امر نشان دهنده افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ازای افزایش هر ۵ درصد سیمان ترکیبی در نمونه‌ها می‌باشد. و در نمودار (ب) شکل (۹) که مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه می‌باشد، مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B8-28)، (B9-28) و (B10-28) نسبت به (B2-28)، به ترتیب ۱۷۷، ۳۵۵ و ۱۰۳۸ درصد افزایش یافته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ازای افزایش هر ۵ درصد سیمان ترکیبی در نمونه‌ها می‌باشد.

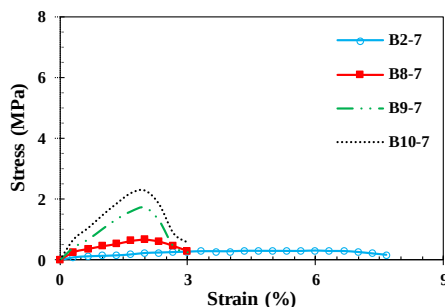
با مقایسه نمودارهای (الف و ب) شکل (۹) با یکدیگر، مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B2-28) نسبت به (B2-7)، نمونه (B8-28) نسبت به (B8-7)، نمونه (B9-28) نسبت به (B9-7) و نمونه (B10-28) نسبت به (B10-7) به ترتیب ۱۰۲، ۱۴۴، ۵۷ و ۱۹۸ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در ضمن با اینکه نمونه‌ها افزایش مقاومت زیادی پیدا کرده، اما همچنان رفتار غیرخطی خود را حفظ کرده و رفتار نمونه‌ها شکل‌پذیر است.

در شکل (۱۰) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ی رسی بنتونیت تثبیت شده با ۱۰ درصد پودر آهن و (۵۰، ۱۰ و ۲۰) درصد سیمان نشان داده شده است. نمودار (الف و ب) شکل (۱۰)، به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه عمل آوری شده می‌باشند. با توجه به نمودارهای (الف و ب) شکل (۱۰)، با افزایش مقدار سیمان ترکیبی در نمونه‌ها مقاومت فشاری تک محوری افزایش و کرنش کاهش می‌یابد. در نمودار (الف) شکل (۱۰)، مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B11-7)، (B12-7) و (B13-7) نسبت به (B3-7)، به ترتیب ۲۰۷، ۳۸۸ و ۹۵۲ درصد افزایش یافته است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار درصد سیمان در نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها تا نزدیک به ۱۰ برابر نیز افزایش و همزمان کرنش نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در نمودار (ب) شکل (۱۰) نیز مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B11-28)، (B12-28) و (B13-28) نسبت به (B3-28)، به ترتیب ۱۲۳، ۳۷۹ و ۵۸۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین با افزایش درصد سیمان کرنش نمونه‌ها کاهش یافته و رفته رفته نمونه‌ها رفتار تردتر از خود نشان می‌دهد.



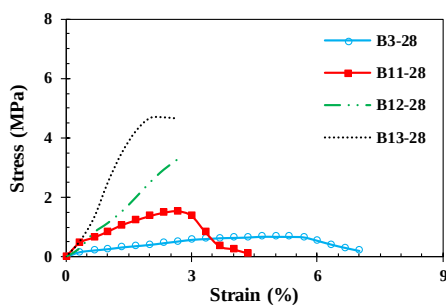
ب: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



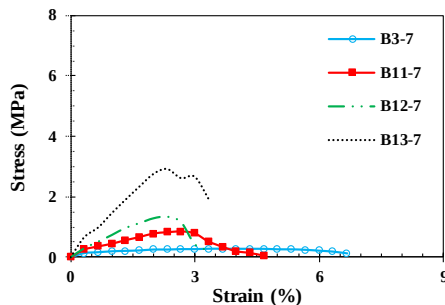
الف: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ روزه

شکل ۹. نمودار تنش کرنش خاک بنتونیت تثبیت شده با ۵ درصد پودر آهن و درصدهای مختلف سیمان.

با مقایسه نمودارهای (الف و ب) شکل (۱۰) با یکدیگر مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک محوری نمونه (B3-28) نسبت به (B3-7)، نمونه (B11-28) نسبت به (B11-7)، نمونه (B12-28) نسبت به (B12-7) و نمونه (B13-28) نسبت به (B13-7) به ترتیب ۱۴۹، ۸۱، ۱۴۴ و ۶۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان اظهار داشت که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت فشاری تک محوری در تمامی نمونه‌ها افزایش و در ۲ نمونه (B12-28) و (B13-28) کرنش کاهش یافته و رفتار این ۲ نمونه حالت خطی پیدا کرده و نمونه‌ها ترد شده است.



ب: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه

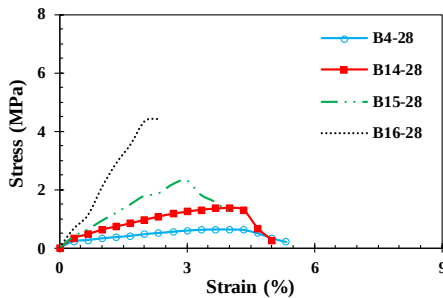


الف: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ روزه

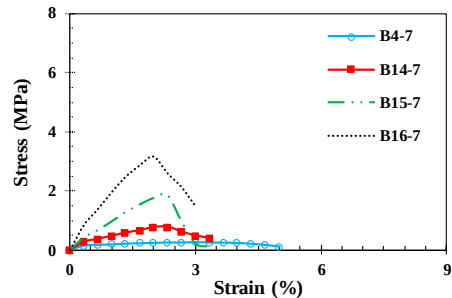
شکل ۱۰. نمودار تنش کرنش خاک بنتونیت تثبیت شده با ۱۰ درصد پودر آهن و درصدهای مختلف سیمان.

نمودارهای (الف و ب) شکل (۱۱) مربوط به نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با ۲۰ درصد پودر آهن به صورت ثابت و (۵، ۱۰ و ۲۰) درصد سیمان است. نمودار (الف) شکل (۱۱) نمونه‌های ۷ روز عمل‌آوری شده و نمودار (ب)

شکل (۱۱) نمونه‌های ۲۸ روز عمل‌آوری شده می‌باشد. در نمودار (الف) شکل (۱۱)، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (B14-7)، (B15-7) و (B16-7) نسبت به (B4-7)، به ترتیب ۱۸۱، ۵۶۷ و ۱۰۴۲ درصد افزایش یافته است. در نمودار (ب) شکل (۱۱) که مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه می‌باشد، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (B14-28)، (B15-28) و (B16-28) نسبت به (B4-28)، به ترتیب ۱۱۵، ۲۶۲ و ۵۹۴ درصد افزایش یافته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها به ازای افزایش هر ۵ درصد سیمان ترکیبی در نمونه‌ها می‌باشد.



ب: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



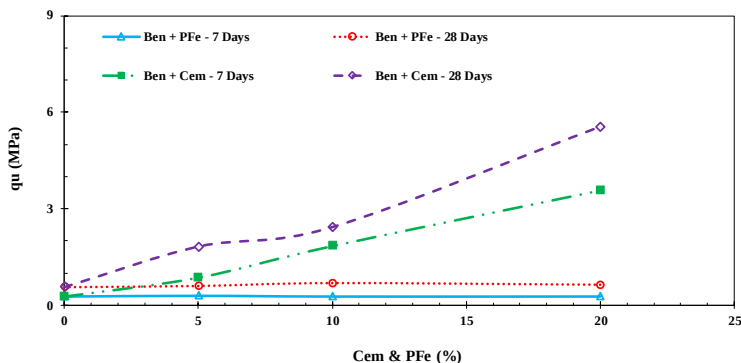
الف: نمودار تنش کرنش نمونه‌های ۷ روزه

شکل ۱۱. نمودار تنش کرنش خاک بنتونیت تثبیت شده با ۲۰ درصد پودر آهن و درصدهای مختلف سیمان.

با مقایسه دو نمودار (الف و ب) شکل (۱۱) با یکدیگر مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه (B4-28) نسبت به (B4-7)، نمونه (B14-28) نسبت به (B14-7)، نمونه (B15-28) نسبت به (B15-7) و نمونه (B16-28) نسبت به (B16-7) به ترتیب ۱۲۹، ۷۶، ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش یافته است. با بررسی نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها و همچنین کرنش نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

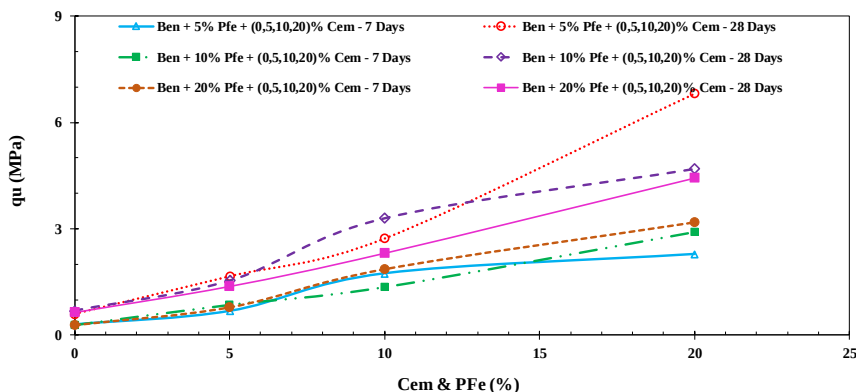
مقایسه نتایج

در این بخش به تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته شده است. در نمودار شکل (۱۲)، مقاومت فشاری تک‌محوری (qu) حاصل از نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰) درصد پودر آهن و سیمان ارائه شده است. محور افقی مقدار درصد پودر آهن (PFe) و سیمان (Cem) و محور قائم (qu) را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل (۱۲)، نمونه‌های ۲۸ روزه دارای مقاومت فشاری تک‌محوری زیادی نسبت به نمونه‌های ۷ روزه است. همچنین بیشترین مقاومت بدست آمده در نمونه‌هایی می‌باشد که با سیمان تثبیت شده‌اند. نتایج مشابهی توسط چاودری و همکاران [۲۰] نیز با افزودن (۴، ۶ و ۸) درصد سیمان و (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰) درصد نانو سیلیس به خاک بنتونیت بدست آمده؛ به این شکل که مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بیشتر از نمونه‌های ۷ روزه بود و همچنین بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری بدست آمده در نمونه‌ای بود که دارای بیشترین درصد سیمان بود یعنی با افزایش درصد سیمان موجود در نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز افزایش یافت. مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با پودر آهن تقریباً در یک خط راست با شیب صفر قرار دارند و حتی با افزودن بیش از ۱۰ درصد پودر آهن، مقاومت فشاری روند کاهشی نیز پیدا کرده است.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات مقاومت فشاری خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان بصورت مجزا.

در نمودار شکل (۱۳) نیز بیشترین مقاومت فشاری تک محوری حاصل از نمونه‌های خاک بنتونیت که به صورت همزمان با پودر آهن و سیمان با درصدهای (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰) تثبیت شده‌اند نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری نیز افزایش می‌یابد. همچنین متوسط مقاومت فشاری تک محوری منحنی قرمز رنگ نسبت به آبی ۱۳۶ درصد و منحنی بنفش نسبت به سبز رنگ ۹۰ درصد و منحنی صورتی رنگ نسبت به قهوه‌ای ۴۴ درصد افزایش داشته است. همچنین بیشترین و کمترین مقاومت فشاری تک محوری بدست آمده برای نمونه‌هایی که هم زمان از دو افزودنی پودر آهن و سیمان در آن‌ها استفاده شده است به ترتیب در نمونه‌های ۷ روزه (B16-7) و (B3-7) و در نمونه‌های ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های (K10-28) و (B2-28) است. طبق مطالعات چاودری و همکاران [۲۰] نیز، نمونه‌های خاک بنتونیت که بطور همزمان با سیمان و نانو سیلیس با درصدهای مختلف ترکیب شده‌اند، با افزایش مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد و همچنین مشاهده کردند که در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌ای که دارای بیشترین مقدار سیمان می‌باشد، دارای بیشترین مقاومت فشاری تک محوری نیز است.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات مقاومت فشاری خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان بصورت ترکیبی.

نتیجه‌گیری

مهمترین یافته‌های این مطالعه عبارتند از:

- ۱- مشاهده گردید که متوسط UCS نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه در نمونه‌هایی که فقط با سیمان و سپس فقط با پودر آهن تثبیت شده‌اند به ترتیب ۵۸ درصد و ۱۲۰ درصد افزایش یافته است.
- ۲- مقدار بهینه پودر آهن و سیمان جهت تثبیت خاک بنتونیت، به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد وزن خشک خاک بنتونیت تعیین شد.
- ۳- در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه خاک بنتونیت تثبیت شده فقط با پودر آهن، با افزایش درصد پودر آهن تا مقدار بهینه آن، UCS افزایش و بعد از مقدار بهینه کاهش پیدا کرد.
- ۴- در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه خاک بنتونیت تثبیت شده فقط با سیمان، با افزایش درصد سیمان، UCS افزایش پیدا کرد. کمترین و بیشترین مقدار UCS در نمونه‌های ۷ روزه به ترتیب ۰/۲۷۷ و ۳/۵۷۵ مگاپاسکال و در نمونه‌های ۲۸ روزه ۰/۵۶۲ و ۵/۵۴۲ مگاپاسکال است.
- ۵- در نمونه‌های خاک بنتونیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان به طور همزمان، بیشترین مقدار UCS مربوط به نمونه‌های (B16-7) و (B10-28) به ترتیب با مقدار ۳/۱۷۴ و ۶/۸۱۷ مگاپاسکال است.
- ۶- بر اساس نتایج UCS و ضریب افزایش شکل‌پذیری (Id)، می‌توان بیان نمود که پودر آهن با سطح دانسیته بسیار زیاد، تا در صد بهینه نقش پرکنندگی حفرات را داشته و موجب افزایش پارامترهای مقاومتی شده، اما پس از آن همانند غلطک عمل نموده و باعث افزایش شکل‌پذیری و کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است؛ اما افزودن سیمان بواسطه‌ی انجام واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون سیمان در حضور بنتونیت و آب موجب افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری (رفتار ترد) نمونه‌ها شده است.
- ۷- استفاده از پودر آهن دورریز کاملاً توجیه اقتصادی داشته و از دیدگاه زیست‌محیطی بسیار مفید و حائز اهمیت خواهد بود.

تقدیر و تشکر

در این بخش از حضور جناب آقای مهندس حسن ربانی ارشد، مدیریت محترم شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی جهت فراهم نمودن بستر آزمایشگاه برای انجام این مطالعه و از آقای مهندس فردین اسدالهی کارشناس ارشد بخش ژئوتکنیک این مجموعه بی نظیر، جهت راهنمایی بنده در محیط آزمایشگاه تشکر نموده و آرزوی موفقیت روز افزون بر این مجموعه عظیم می‌نمایم.

فهرست منابع

- [1] Kirsch, K., & Bell, A. (2012). Ground Improvement. 3rd ed. London: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13678>.
- [2] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Amiri, M., & Ouhadi, M. H. (2014). Pozzolan consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science, 95, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.020>.
- [3] Pourakbar, S., & Huat, B. K. (2017). A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils. International Journal of Geotechnical Engineering, 11(2), 206-216. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>.
- [4] Hamidi, S., & Marandi, S. M. (2018). Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin. Applied Clay Science, 151, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.10.010>.
- [5] Bhavita Chowdary, V., Ramanamurthy, V., & Pillai, R. J. (2020). Experimental evaluation of strength and durability characteristics of geopolymer stabilised soft soil for deep mixing applications. Innovative Infrastructure Solutions, 6(1), 40. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00407-7>.

- [6] Chowdary, B., Ramanamurty, V., & Pillai, R. J. (2020). Fiber reinforced geopolymer treated soft clay – An innovative and sustainable alternative for soil stabilization. *Materials Today: Proceedings*, 32, 777-781. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.574>.
- [7] Corrêa-Silva, M., Miranda, T., Rouainia, M., Araújo, N., Glendinning, S., & Cristelo, N. (2020). Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122017>.
- [8] Imane, I., Souhila, R. B., Riad, B., & Inas, B. (2021). Use of Biopolymers in the Stabilization of Clay Soils. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 16(2), 37-53. <https://doi.org/10.2478/sspjce-2021-0015>.
- [9] Yousefi, H., & Marandi, S. M. (2022). The Effect of Geo-grid Plates on Vertical Displacement and Shearing Force on Foundation Using Finite Element Method and Two-dimensional PLAXIS Software. *Karafan Journal*, 19(3), 461-476. <https://doi.org/10.48301/Kssa.2021.275662.1411>. (In Persian)
- [10] Hatefi, M. H., Arabani, M., Payan, M., & Zanganeh Ranjbar, P. (2024). The influence of volcanic ash (VA) on the mechanical properties and freeze-thaw durability of lime kiln dust (LKD)-stabilized kaolin clayey soil. *Results in Engineering*, 24, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103077>.
- [11] Saride, S., & Dutta, T. (2016). Effect of Fly-Ash Stabilization on Stiffness Modulus Degradation of Expansive Clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001678).
- [12] Alnaas, F., Abdelrahman, S., & Altalhe, E. (2022). Comparative Assessment of Using Glass Powder and Aluminum Waste to Improve Unconfined Strength of Clay Soil. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Volume 11(Issue 9), pp. 808-812. <https://www.doi.org/10.21275/SR22915033452>.
- [13] Debnath, D., & Chouksey, S. (2022). Experimental study of strength behavior of soft soil stabilised with alkali activated copper slag. *Materials Today: Proceedings*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.106>.
- [14] Turan, C., Javadi, A. A., Vinai, R., & Russo, G. (2022). Effects of Fly Ash Inclusion and Alkali Activation on Physical, Mechanical, and Chemical Properties of Clay. *Materials*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/ma15134628>.
- [15] Mohammadzadeh, M., Toufigh, M., & Toufigh, V. (2022). Durability and Strength of Geopolymer with Recycled Glass Powder Base for Clay Stabilization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0681-5>.
- [16] Jafari, M. M., Bagheripour, M. H., & Lakzadeh, M. (2022). Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Properties of Lime and Cement Stabilized Soil. *Karafan Journal*, 19(1), 59-81. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.278961.1449>. (In Persian)
- [17] Umar, I., Lin, H., & Ibrahim, A. (2023). Laboratory Testing and Analysis of Clay Soil Stabilization Using Waste Marble Powder. *Applied Sciences*, 13, 9274. <https://doi.org/10.3390/app13169274>.
- [18] Bakam, D. L., Miao, Y.-H., Illo, F., Nidelle Sausten, F., & Gnanba Joelle Loic, A. (2023). Experimental Study on Strength Behaviour of Fly Ash and Eggshell Powder Stabilized Soft Clay. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26722.09927>.
- [19] Aghayan, Z., & Dabiri, R. (2024). The Effect of Lime and Coal Ash Mixture on the Geotechnical Properties of Clay for use in Engineering Embankments. *jeg*, 18(3), 382-410. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.10140410>. (In Persian)

- [20] Chaudhary, V., Yadav, J. S., & Dutta, R. K. (2024). Impact of Nano-Silica and Cement on Geotechnical Properties of Bentonite Soil. *Indian Geotechnical Journal*, 54(4), 1420-1437. <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00816-2>.
- [21] Parvaresh, R., Dabiri, R., & Ebrahimi Asl, S. (2024). Effect of Nano-Cement Particles on the Geotechnical Properties of Dune Sand-Bentonite Mixtures. *Ferdowsi Civil Engineering*, 37(2), 1-24. <https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.82076.1225>. (In Persian)
- [22] American Society for Testing and Materials. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM D2166-16). ASTM. https://store.astm.org/d2166_d2166m-16.html.
- [23] Golchinfar, N., & Abbasi, N. (2014). The Effects of Freezing and Thawing Cycles on Mechanical Properties of Fine-grained Soils Stabilized with Lime and Reinforced with Polypropylene Fiber. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 45(2), 1-12. <https://doi.org/10.22060/ceej.2014.306>. (In Persian)
- [24] Karaca, Z., & Onargan, T. (2012). A new approach to stone deformation: stone deformability index. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 165(3), 189-195. <https://doi.org/10.1680/coma.9.00031>.