



University Of Qom



Assessing Flexural Behavior of Stabilized and Reinforced Clay

Mahmood Reza Abdi^{1✉}, Elham Abbasi², Mahdi Safdari Seh Gonbad³

1. Corresponding author, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: abdi@kntu.ac.ir
2. Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: Elham.abbasi@email.kntu.ac.ir
3. Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: m.safdari@email.kntu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 Jan 2025
Revised 06 Apr 2025
Accepted 21 Apr 2025
Published 22 Apr 2025

Keywords:
Kaolinite Clay,
Polypropylene Fiber,
Lime,
Three-Point Bending Test,
Curing.

ABSTRACT

In this study, the flexural behavior of stabilized and reinforced clay was investigated. For this purpose, kaolinite, lime at weight dosages of 1%, 3%, and 5%, as well as polypropylene fibers of 6 mm and 12 mm in length, and weight contents of 0.15%, 0.25%, and 0.35% were utilized. Samples were cured in a laboratory environment at 20-25°C for periods of 7 and 28 days. For quantitative and qualitative evaluations, three-point bending tests and scanning electron microscopy were employed. Results indicated that stabilization increased the flexural strength and brittleness of kaolinite, while simultaneous reinforcement and stabilization improved both strength and ductility. Furthermore, findings demonstrated that flexural strength and strain at maximum stress are directly related to fiber content, fiber length, lime dosage, and curing time. Specifically, increasing fiber content from 0.15% to 0.35%, fiber length from 6 mm to 12 mm, raising lime dosage from 1% to 5%, and extending curing period from 7 days to 28 days improved the flexural strength of the stabilized and reinforced samples by 6%-18%, 20%-43%, 141%-178%, and 5%-17%, respectively. Similarly, strain corresponding to maximum stress was enhanced by 10%-25%, 28%-74%, 88%-161%, and 10%-34%. Qualitative analyses revealed that stabilization improves interactions at soil-fibers interfaces.

Cite this article: Abdi MR, Abbasi E, Safdari Seh Gonbad M. Assessing Flexural Behavior of Stabilized and Reinforced Clay. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 51-67. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12150.1596>



Introduction

Soils are acknowledged as materials that exhibit adequate compressive and shear strengths; however, they inherently possess insufficient tensile and flexural strengths. Given that all structures must be founded on soil substrates, the stability of these materials is essential for the safe operation of the structures built upon them. In this regard, geotechnical engineers have utilized chemical stabilization techniques to improve soil stability and strength. Although chemical stabilization markedly enhances soil strength, it concurrently induces brittleness and reduces ductility. Consequently, researchers have proposed and explored the approach of simultaneous stabilization and reinforcement of soils. A review of the existing technical literature reveals that investigations have predominantly focused on the compressive, shear, tensile, and California Bearing Ratio (CBR) characteristics of stabilized and reinforced soils, while the assessment of flexural behavior has been relatively neglected. This is particularly important, as earth materials are often subjected to flexural stresses in various construction applications, including landfill lining and capping, backfilling behind retaining walls, and road and railway embankments. To address the limited research conducted in this area, the present study investigates the flexural behavior of stabilized and reinforced clay.

Materials and Methods

In this investigation, kaolinite clay, characterized by its mechanical properties outlined in Table 1, is used for sample preparation. Lime is incorporated at weight percentages of 1, 3, and 5% for stabilization purposes, while polypropylene fibers, with physical properties detailed in Table 2, are utilized at weight contents of 0.15, 0.25, and 0.35%, with lengths of 6 mm and 12 mm for reinforcement. For brevity, kaolinite, lime, and polypropylene fibers are denoted by the symbols *K*, *L*, and *PP*, respectively.

To prepare the samples, kaolinite, water, lime, and polypropylene fibers were first

weighed according to the dimensions of the mold (a rectangular cube measuring 160×40×40mm), maximum dry density, optimal moisture content, and required weight contents. The materials were then poured into a tray and mixed manually. Following this, the mixture was transferred to a mixer for an additional 10 minutes. The materials were returned to the tray, where water was gently sprayed onto them while mixing by hand. Subsequently, the resulting mixture was placed into a pre-lubricated mold to facilitate sample removal and was statically compacted using a hydraulic jack. To prevent moisture evaporation, the samples were immediately enclosed in plastic bags and cured in a controlled chamber at temperatures ranging from 20 to 25 °C for 7 and 28 days. Upon completion of the curing process, the samples were removed from the plastic bags and subjected to a three-point bending test in accordance with ASTM C1609/C1609M-12 standard. Following these tests, fragments from the failure planes of the samples were collected, and micrographs of their surfaces were obtained using a scanning electron microscope.

Table 1. Mechanical properties of *K*

Property	Value
Particle Size < 0.075 mm (%)	100
Specific Gravity	2.6
Plastic Limit (%)	26
Liquid Limit (%)	45
Maximum Dry Density (g/cm ³)	1.46
Optimum Moisture Content (%)	24.3

Table 2. Physical properties of *PP* fibers

Property	Value
Diameter (μm)	18-25
Density (g/cm ³)	0.91
Tensile Strength (MPa)	350-400

Results and Discussion

Figs. 1 and 2 present the stress-strain diagrams of reinforced and stabilized specimens subjected to different curing periods. The results indicate that reinforcing and stabilizing the samples increased both flexural strength and ductility due to the bridging phenomenon. It is observed that at both curing times, increasing the fiber content and length improved the flexural strength and

ductility of the samples. This improvement is attributed to the strengthening of the bridging phenomenon, which results from an increase in the number of bridges and the fiber pull-out force. For example, increasing the *PP* content from 0.15 to 0.25 and then to 0.35%, resulted

in increases in flexural strength of 3-7% and 6-18%, respectively, while ductility increased by 5-15% and 10-25%, respectively. Similarly, increasing the fiber length from 6 mm to 12 mm led to increases in flexural strength and ductility of 20-43% and 28-74%, respectively.

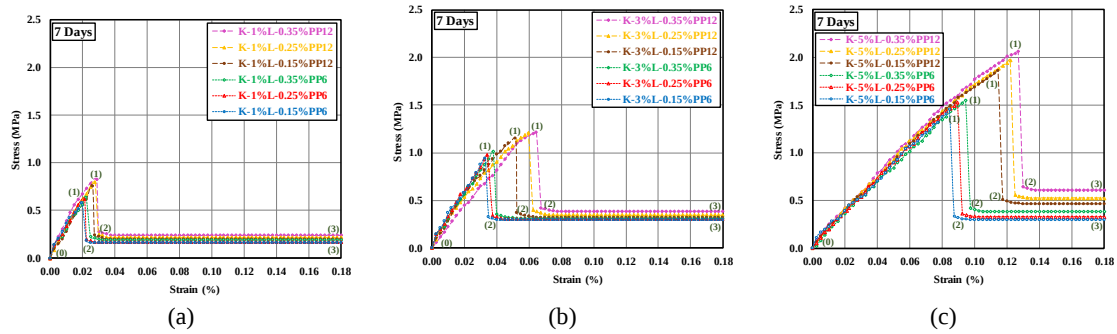


Fig. 1. Stress-strain diagrams of reinforced specimens stabilized with varying *L* content: a) 1, b) 3, and 5%, all cured for 7 days

Additionally, Figs. 1 and 2 demonstrate that flexural strength and ductility at both curing periods are influenced by *L* content. Specifically, increasing the *L* content from 1 to 3 and then to 5% enhances flexural strength by 47-76% and 141-178%, respectively, while the ductility is enhanced by 61-150% and 88-

161%, respectively. Comparing Figs. 1 and 2 reveals that both flexural strength and ductility are also affected by the curing period; specifically, increasing the curing period from 7 to 28 days improves flexural strength and ductility by 5-17% and 10-34%, respectively.

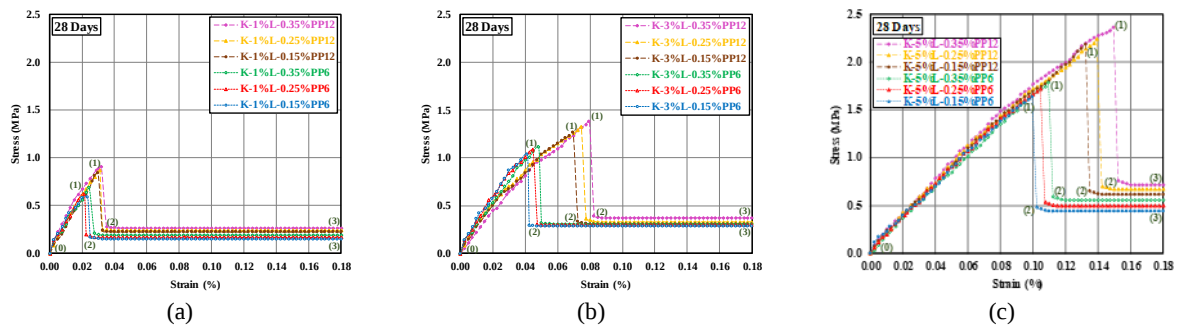


Fig. 2. Stress-strain diagrams of reinforced specimens stabilized with varying *L* content: a) 1%, b) 3%, and 5%, all cured for 28 days.

Contributions

A summary of the most important results obtained in this study is as follows:

1) Reinforcing *L*-stabilized *K* with *PP* fibers increases both flexural strength and ductility due to the bridging and stitching of the two sides of the failure zone together.

2) Increasing the content and length of *PP* fibers enhances the number of bridges formed and the required pullout force of the fibers, subsequently increasing the flexural strength and ductility of samples.

3) Due to the improved interaction of *PP* fibers with *L*-stabilized *K* compared to

untreated *K*, the flexural strength and ductility of the stabilized reinforced samples are significantly higher than those of the untreated reinforced samples.

Conflict of Interest

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

Authors' Contributions

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

بررسی رفتار خمشی رس تثبیت و تسلیح شده

محمودرضا عبدی^۱، الهام عباسی^۲، مهدی صفدری سه‌گنبد^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: abdi@kntu.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: Elham.abbasi@email.kntu.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: m.safdari@email.kntu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، رفتار خمشی رس تثبیت و تسلیح شده مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از رس کائولینیت، آهک با محتوای وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد، الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و مقادیر وزنی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ درصد استفاده گردیده است. نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۰ الی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند. برای ارزیابی‌های کمی و کیفی، به ترتیب آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و میکروسکوپ الکترونی روبشی به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان دادند که تثبیت باعث افزایش مقاومت خمشی و تردی نمونه‌های رس کائولینیت می‌شود، در حالی که تسلیح و تثبیت همزمان، بهبود مقاومت و شکل‌پذیری خمشی را موجب می‌گردد. علاوه بر آن، یافته‌ها نشان دادند که تقویت مقاومت خمشی و کرنش در بیشینه تنش، با محتوا و طول الیاف، مقدار آهک و زمان عمل‌آوری رابطه‌ی مستقیم دارد. به طور خاص، با افزایش محتوای الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۳۵ درصد، ازدیاد طول الیاف از ۶ به ۱۲ میلی‌متر، بیشتر شدن مقدار آهک از ۱ به ۵ درصد و افزایش دوره‌ی عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت خمشی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده به ترتیب ۶ الی ۱۸ درصد، ۲۰-۴۳ درصد، ۱۴۱-۱۷۸ درصد و ۵-۱۷ درصد بهبود یافته است. به طور مشابه، کرنش متناظر با بیشینه تنش نیز ۱۰-۲۵ درصد، ۲۸-۷۴ درصد، ۱۶۱-۸۸ درصد و ۱۰-۳۴ درصد تقویت گردیده است. بررسی‌های کیفی نیز مشخص نمودند که الیاف پلی‌پروپیلن اندرکنش موثرتری با رس کائولینیت تثبیت شده دارند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

کلیدواژه‌ها:

رس کائولینیت،

الیاف پلی‌پروپیلن،

آهک،

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای،

عمل‌آوری.

استناد: عبدی محمودرضا، عباسی الهام، صفدری سه‌گنبد مهدی. بررسی رفتار خمشی رس تثبیت و تسلیح شده. پژوهش‌های زیرساخت‌های

عمرانی. ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۵۱-۶۷. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12150.1596>

خاک‌ها از جمله مصالح دارای مقاومت فشاری و برشی قابل قبول محسوب می‌شوند که در عین حال فاقد مقاومت کششی و خمشی لازم هستند [۵-۱]. از آنجایی که تمامی سازه‌ها باید بر روی بسترهای خاک بنا شوند، پایداری مصالح خاکی موجب عملکرد ایمن سازه‌های ساخته شده بر روی آن‌ها می‌گردد [۶ و ۷]. در این راستا، مهندسین ژئوتکنیک جهت بهبود پایداری خاک‌ها، راهکار تثبیت شیمیایی را به کار برده‌اند [۸-۱۲]. گرچه تثبیت شیمیایی باعث افزایش چشمگیر مقاومت خاک‌ها می‌شود، ولی تردی و کاهش شکل‌پذیری آن‌ها را به دنبال دارد [۱۳-۱۶]. به همین خاطر پژوهش‌گران تثبیت و تسلیح همزمان خاک‌ها را پیشنهاد و مورد بررسی قرار داده‌اند که در ادامه مرور می‌گردند [۲۰-۱۷].

کانیراج^۱ و هاواناگی^۲ (۲۰۰۱) مقاومت برشی خاک‌های سیلتی تثبیت شده با سیمان پرتلند^۳ و خاکستر بادی^۴ که با الیاف پلی‌استر^۵ مسلح شده بودند را با بکارگیری آزمایش‌های برش مستقیم^۶، فشاری محصور نشده^۷ و فشاری سه‌محوره^۸ بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در تمامی آزمایش‌ها، تسلیح با الیاف موجب افزایش کرنش در لحظه‌ی گسیختگی خاک‌های تثبیت شده از محدوده ۱ الی ۲ درصد به ۳/۴ الی ۸ درصد می‌شود [۲۱]. پانسوتائچا^۹ و همکاران (۲۰۰۶) خصوصیات تغییرات حجم دو نوع رس متورم‌شونده‌ی^{۱۰} تثبیت شده با خاکستر بادی و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن^{۱۱} و نایلون^{۱۲} را مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌ها نشان دادند که تسلیح تأثیر بسزایی در کاهش

پتانسیل تورم رس‌ها داشته و در این خصوص الیاف نایلون کارایی بیشتری دارد [۲۲]. کومار^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۰۷ رفتار کششی رس تثبیت شده با آهک^{۱۴} و خاکستر بادی و مسلح به الیاف پلی‌استر را با استفاده از آزمایش کششی دو نیم شدن^{۱۵} مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تسلیح با الیاف افزایش قابل توجه مقاومت کششی رس تثبیت شده را موجب می‌شود [۲۳]. منتهار^{۱۶} (۲۰۰۹) مقاومت‌های کششی و فشاری رس تثبیت شده با مخلوط آهک و خاکستر پوسته‌ی برنج^{۱۷} و مسلح شده به الیاف پلاستیک را با بکارگیری آزمایش‌های فشاری محصور نشده و کششی دو نیم شدن ارزیابی نمود. خروجی‌ها نشان دادند که جهت رسیدن به بیشترین بازدهی در افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری، طول الیاف پلاستیک باید ۲۰ الی ۴۰ میلی‌متر باشد [۲۴]. در سال ۲۰۱۱ یین^{۱۸} و یو^{۱۹} ویژگی‌های نوعی خاک رسی تثبیت شده با سیمان پرتلند و تسلیح شده با الیاف شیشه را با بکارگیری آزمایش سه‌محوری مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده‌ها نشان دادند که تسلیح و تثبیت همزمان به مراتب تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری رس نسبت به تسلیح و تثبیت جداگانه داشته و فاکتورهای محتوای الیاف و تنش محصورشدگی نقش پر رنگ‌تری در بهبود مشخصه‌های رس ایفاء می‌کنند [۲۵].

کالکان^{۲۰} (۲۰۱۳) تأثیر تسلیح و تثبیت همزمان بر بهبود ویژگی‌های برشی نوعی خاک رسی را بررسی نمودند. در این پژوهش الیاف ضایعات لاستیک^{۲۱}، فوم سیلیکا^{۲۲} و آزمایش‌های فشاری محصور نشده و برش مستقیم بکارگیری شدند. نتایج نشان از کارایی بالای

- 1- Kaniraj
- 2- Havanagi
- 3- Portland cement
- 4- Fly ash
- 5- Polyester
- 6- Direct shear test
- 7- Unconfined compression test
- 8- Triaxial compression test
- 9- Punthutaecha
- 10- Expansive
- 11- Polypropylene
- 12- Nylon

- 13- Kumar
- 14- Lime
- 15- Split tensile test
- 16- Muntohar
- 17- Rice Husk Ash
- 18- Yin
- 19- Yu
- 20- Kalkan
- 21- Scrap tire rubber
- 22- Silica Fume

سال ۲۰۱۸ تأثیر تثبیت با مخلوط آهک و خاکستر بادی و تسلیح با الیاف سیسال^{۳۱} بر مقاومت فشاری نوعی رس را مورد ارزیابی قرار دادند. خروجی‌ها نشان دادند که بیشینه مقاومت فشاری در نمونه‌های مسلح به ۰/۷۵ درصد وزنی الیاف سیسال مشاهده می‌شود [۳۱].

در سال ۲۰۲۱ شن^{۳۲} و همکاران ویژگی‌های رس تسلیح شده با الیاف پلی‌استر و تثبیت شده با آهک یا سیمان را با استفاده از آزمایش فشاری سه‌محوره مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که سیمان تأثیر بیشتری نسبت به آهک در بهبود مقاومت نمونه‌ها دارد [۳۲]. عبدی^{۳۳} و همکاران در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ رفتار مقاومتی چند نوع رس با شاخص‌های خمیری^{۳۴} متفاوت تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن را با استفاده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده و سه‌محوری بررسی و گزارش نمودند که عوامل محتوای وزنی آهک، زمان عمل‌آوری، تنش محصورشدگی، محتوا و طول الیاف تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های مقاومتی رس تثبیت و تسلیح شده دارد [۳۳ و ۳۴]. شارما^{۳۵} (۲۰۲۲) اثرگذاری تثبیت نوعی خاک رسی با مخلوط‌های آهک و خاکستر بادی و تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن را با استفاده از آزمایش سی.بی.آر^{۳۶} مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌ی تثبیت شده به ترتیب با ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی آهک و خاکستر بادی، و تسلیح شده با ۰/۵ درصد وزنی الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین مقاومت را کسب می‌نماید [۳۵]. در سال ۲۰۲۳، وانگ^{۳۷} و همکاران اثرگذاری تثبیت با آهک و تسلیح با الیاف کاه برنج^{۳۸} بر چقرمگی^{۳۹} خاک رسی را با استفاده از آزمایش فشاری محصور نشده بررسی کردند. یافته‌ها نشان

تثبیت و تسلیح همزمان در بهبود ویژگی‌های برشی رس داشت و نشان دادند که ۲ درصد الیاف بهینه است [۲۶]. اولگون^{۲۳} در سال ۲۰۱۳ اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به رس تثبیت شده با سیمان و خاکستر بادی را با آزمایش‌های فشاری محصور نشده و کششی دو نیم شدن ارزیابی نمود. خروجی‌ها نشان دادند که تسلیح با الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر و تثبیت با ۰/۵ الی ۰/۷۵ درصد وزنی سیمان موجب بیشترین افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی می‌شود [۲۷]. آنگرینی^{۲۴} و همکاران (۲۰۱۴) رفتار فشاری و کششی رس سیلت‌دار تثبیت شده با آهک و مسلح شده به الیاف نارگیل را با استفاده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده و کششی دو نیم شدن مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده‌ها نشان دادند که در تمامی محتواهای آهک و زمان‌های عمل‌آوری، یک درصد وزنی الیاف نارگیل بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی دارد [۲۸]. دانگ^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر تثبیت و تسلیح همزمان نوعی رس با آهک و الیاف باگاس^{۲۶} را با استفاده از آزمایش فشاری محصور نشده بررسی و گزارش نمودند که مقاومت فشاری محصور نشده با محتوای آهک و الیاف و همچنین زمان عمل‌آوری رابطه‌ی مستقیم دارد [۲۹]. اثر تسلیح با دو نوع الیاف بازالت^{۲۷} و پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری محصور نشده‌ی نوعی رسی تثبیت شده با محتواهای متفاوت آهک، توسط بوز^{۲۸} و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان دادند که بیشترین مقاومت فشاری در رس تسلیح شده با ۰/۷۵ درصد وزنی الیاف بازالت با طول ۱۹ میلی‌متر و تثبیت شده با ۹ درصد وزنی آهک با ۹۰ روز عمل‌آوری به دست می‌آید [۳۰]. کافودیا^{۲۹} و اوکنتا^{۳۰} در

31- Sisal

32- Shen

33- Abdi

34- Plasticity index (PI)

35- Sharma

36- California bearing ratio (CBR) test

37- Wang

38- Rice Straw

39- Toughness

23- Olgun

24- Anggraini

25- Dang

26- Bagasse

27- Basalt

28- Boz

29- Kafodya

30- Okonta

خاکی در اثر بارهای اجرایی و بهره‌برداری تحت تنش‌های خمشی قرار می‌گیرند [۴۰-۴۴]. از این رو، جهت پوشش مطالعات محدود صورت گرفته در این خصوص، پژوهش حاضر به مطالعه رفتار خمشی رس تثبیت و تسلیح شده می‌پردازد. در این راستا، از نوعی رس کائولینیت برای ساخت نمونه‌ها، آهک با مقادیر وزنی ۱، ۳، و ۵ درصد جهت تثبیت، الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و محتوای وزنی ۰/۱۵، ۰/۲۵، و ۰/۳۵ درصد به منظور تسلیح، دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه جهت عمل‌آوری نمونه‌ها، و همچنین از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای^{۵۱} و میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۵۲} به ترتیب جهت ارزیابی‌های کمی و کیفی رفتار خمشی استفاده شده است.

۲- مصالح

۲-۱- خاک

در این مطالعه جهت آماده‌سازی نمونه‌ها از یک نوع رس کائولینیت با مشخصه‌های مکانیکی و ترکیب‌های شیمیایی ارائه شده در جدول‌های ۱ و ۲ که توسط شرکت صنایع خاک چینی ایران در بازار عرضه می‌شود، استفاده شد. از دلایل استفاده‌ی کائولینیت معدنی به جای رس طبیعی می‌توان به ویژگی‌های یکنواخت‌تر و کمتر بودن ناخالصی‌های آن که می‌توانست بر نتایج اثرگذار باشد و همچنین کاربرد فراوان آن در پژوهش‌های گذشته اشاره نمود [۴۵-۴۷]. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد^{۵۳}، کائولینیت در گروه رس با خاصیت خمیری کم^{۵۴} طبقه‌بندی می‌شود. در ادامه، در شکل‌ها و جدول‌ها جهت اختصار، کائولینیت با حرف K نمایش داده شده است.

دادند که تثبیت و تسلیح همزمان افزایش بیشتر چقرمگی را موجب شده و بزرگای آن تحت تأثیر طول و محتوای وزنی الیاف قرار دارد [۳۶]. عربانی^{۴۰} و همکاران در سال ۲۰۲۳ رفتار فشاری، برشی و کششی رس سیلت‌دار تثبیت شده با نانورس^{۴۱} و تسلیح شده با کاه برنج را با آزمایش‌های فشاری محصور نشده، برش مستقیم و کشش غیرمستقیم برزیلی^{۴۲} مورد بررسی قرار دادند. خروجی‌ها نشان دادند که ۰/۸ درصد وزنی نانورس و ۰/۹ درصد وزنی الیاف کاه برنج بیشترین تأثیر را در تقویت مشخصه‌های مقاومتی رس سیلت‌دار دارند [۳۸]. سارکار^{۴۳} و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر تثبیت با آهک و خاکستر بادی و تسلیح با الیاف پلی‌پروپیلن و نارگیل بر مقاومت خاک‌های رسی و سیلتی را با استفاده از آزمایش سی.بی.آر مطالعه نمودند. نتایج نشان دادند که الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف نارگیل نقش پررنگ‌تری در افزایش مقاومت خاک‌ها دارد [۳۸]. لیو^{۴۴} و همکاران (۲۰۲۴)، اثرگذاری تسلیح با کاه برنج بر مقاومت فشاری و برشی رس تثبیت شده با آهک را با استفاده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده و برش مستقیم مطالعه و گزارش نمودند که مقاومت و شکل‌پذیری رس تثبیت شده با محتوا و طول الیاف رابطه‌ی مستقیم دارد [۳۹].

مرور ادبیات ارائه شده نشان داد که محققان بیشتر به بررسی رفتارهای فشاری، برشی، کششی و سی.بی.آر خاک‌های تثبیت و تسلیح شده پرداخته، و ارزیابی رفتار خمشی خاک‌ها چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در حالی که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی نظیر آستر^{۴۵} و پوشش^{۴۶} مراکز دفن زباله^{۴۷}، خاکریزی پشت دیوارهای حائل^{۴۸}، زیراساس^{۴۹} خاکریزهای^{۵۰} راه و راه‌آهن، مصالح

40- Arabani

41- Nanoclay

42- Brazilian indirect tensile

43- Sarkar

44- Liu

45- Liner

46- Cover

47- Landfill

48- Retaining Walls

49- Subgrade

50- Embankment

51- Three-point bending test

52- Scanning Electron Microscope (SEM)

53- Unified soil classification system (USCS)

54- CL

در شکل ۱ و جدول ۳ نتایج آزمایش‌های تراکم کائولینیت و مخلوط‌های کائولینیت-آهک که مطابق با استاندارد ASTM D698-12R2 انجام شده‌اند، ارائه گردیده است [۵۵]. مشاهده می‌شود که افزودن آهک به کائولینیت موجب کاهش دانسیته‌ی خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها شده است. کاهش دانسیته‌ی خشک بیشینه و ارتباط عکس آن با محتوای وزنی آهک به دلیل تولید فرآورده‌های اولیه‌ی واکنش سیمان‌تاسیون^{۵۵} کائولینیت با آهک در نقاط تماس ذرات خاک بوده که باعث افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش دانسیته‌ی خشک بیشینه شده‌اند [۳۳]. افزایش رطوبت بهینه و ارتباط مستقیم آن با محتوای وزنی آهک نیز به این خاطر می‌باشد که بخشی از آب مخلوط می‌بایست برای پر نمودن این حفره‌ها استفاده شود و بخشی دیگر باید در واکنش‌های فوری آهک با کائولینیت شرکت نماید [۳۳]. لازم به ذکر است که کاهش دانسیته‌ی خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه در خاک‌های رسی تثبیت شده با سیمان، سرباره‌ها^{۵۶}، خاکسترها و پوزالان‌های^{۵۷} طبیعی نیز گزارش شده است [۶۱-۵۶].

۲-۳- الیاف پلی‌پروپیلن

الیاف پلی‌پروپیلن یکی از رایج‌ترین مواد مصنوعی مورد استفاده جهت تسلیح خاک‌ها است که رطوبت خاک را به خود جذب ننموده و از لحاظ شیمیایی خنثی عمل می‌کند [۱۷، ۳۳ و ۳۴]. به همین خاطر، در این پژوهش از الیاف پلی‌پروپیلن تولید شرکت سپاهان الیاف برای تسلیح کائولینیت استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های مکانیکی کائولینیت

ویژگی	مقدار
توزیع اندازه ذرات خاک کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (٪)	۱۰۰
وزن مخصوص	۲/۶
حد خمیری (٪)	۲۶
حد روانی (٪)	۴۵
شاخص خمیری (٪)	۱۹
دانسیته خشک بیشینه (g/cm ³)	۱/۴۶
رطوبت بهینه (٪)	۲۴/۳

جدول ۲- ترکیب‌های شیمیایی کائولینیت و آهک

اکسید	مقدار (٪)	
	L	K
SiO ₂	۰/۴	۷۰
Al ₂ O ₃	۰/۶	۲۶/۵
CaO	۹۸/۳	۱/۹
Fe ₂ O ₃	۰/۱	۰/۵
K ₂ O	۰/۰۲	۰/۴
MgO	۰/۳	۰/۴
SO ₃	۰/۱۶	۰/۱
Na ₂ O	۰/۱	۰/۱
P ₂ O ₅	۰/۰۲	۰/۱

۲-۲- آهک

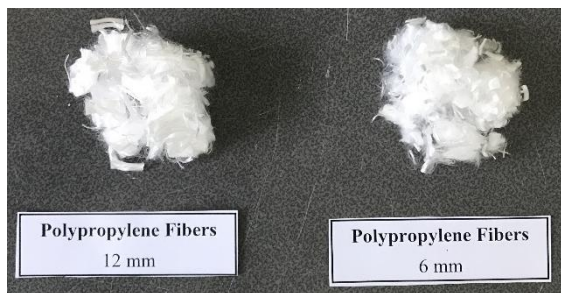
آهک مورد استفاده در این بررسی که ترکیب‌های شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده، توسط کارخانه‌ی آهک سمنان تولید شده است. از دلایل استفاده از آهک جهت تثبیت کائولینیت می‌توان به صرفه‌ی اقتصادی بالا، دسترسی مناسب، کاربرد فراوان در پژوهش‌های قبلی و امکان مقایسه با نتایج آنها اشاره نمود [۴۸-۵۱]. آهک تهیه شده پس از عبور از الک شماره ۲۰۰، بلافاصله در کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار ریخته و مهر و موم شد تا با رطوبت موجود در هوا واکنش نداده و هیدراته نشود. با توجه به آن که در پژوهش‌های قبلی نشان داده شده بود که محتوای وزنی بهینه‌ی آهک برای تثبیت رس‌ها در بیشتر موارد برابر با ۵ درصد است [۳۳، ۵۴-۵۲]، در این پژوهش، از محتواهای وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد آهک استفاده شد. در ادامه، جهت اختصار، بر روی شکل‌ها و جدول‌ها آهک با حرف L نشان داده شده است.

⁵⁵- Cementation

⁵⁶- Slag

⁵⁷- Pozzolan

روی شکل‌ها و جدول‌ها الیاف پلی‌پروپیلن با حرف PP نشان داده شده است.



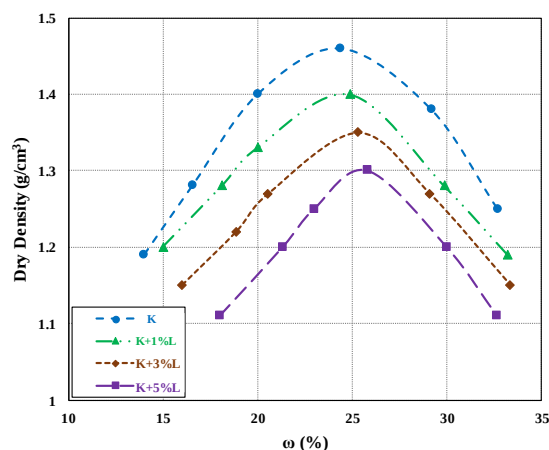
شکل ۲- الیاف پلی‌پروپیلن.

جدول ۴- مشخصه‌های فیزیکی الیاف پلی‌پروپیلن

ویژگی	مقدار
قطر (μm)	۱۸ الی ۲۵
دانسیتته (g/cm^3)	۰/۹۱
مقاومت کششی (MPa)	۳۵۰ الی ۴۰۰

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا کائولینیت، آب، آهک و الیاف پلی‌پروپیلن با توجه به ابعاد قالب، دانسیته‌ی خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی هر مخلوط (جدول ۳) و محتواهای وزنی مورد نیاز توزین شدند. لازم به ذکر است که قالب‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده شده در این تحقیق مکعب مستطیل شکل به ابعاد ۱۶۰ میلی‌متر در طول، ۴۰ میلی‌متر در عرض و ۴۰ میلی‌متر در ارتفاع بودند. در مرحله‌ی بعد کائولینیت، آهک و الیاف داخل سینی ریخته و به صورت دستی مخلوط گردیدند. به منظور اختلاط یکنواخت‌تر، مواد درون همزن ریخته و به مدت ۱۰ دقیقه‌ی دیگر با هم مخلوط شدند (شکل ۳ الف). سپس مواد درون سینی ریخته، آب به آرامی بر روی آن افشاند و به طور همزمان مخلوط به صورت دستی هم زده شد تا رطوبت به طور یکنواخت داخل آن توزیع گردد (شکل ۳ ب). در ادامه، مخلوط بدست آمده درون قالب که جهت تسهیل خروج نمونه از قبل روغن کاری شده بود ریخته شد (شکل ۳ ج).



شکل ۱- منحنی‌های تراکم مخلوط کائولینیت-آهک.

جدول ۳- ویژگی‌های تراکمی مخلوط کائولینیت-آهک

مخلوط	دانسیته‌ی خشک بیشینه (g/cm^3)	رطوبت بهینه (%)
K	۱/۴۶	۲۴/۳
K+1%L	۱/۴۰	۲۴/۹
K+3%L	۱/۳۵	۲۵/۳
K+5%L	۱/۳	۲۵/۸

طبق استاندارد ASTM C1609/C1609M-12

طول الیاف‌ها می‌بایست حداکثر برابر با یک سوم عرض و ارتفاع قالب نمونه‌ها باشد [۶۲]. بنابراین با توجه به ابعاد قالب‌های مورد استفاده در این پژوهش، طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر برای الیاف پلی‌پروپیلن انتخاب شدند. از سوی دیگر با توجه به صعوبت اختلاط محتواهای وزنی زیاد الیاف پلی‌پروپیلن با خاک، در این بررسی محتواهای وزنی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ درصد استفاده شدند. شکل ۲ تصویر الیاف پلی‌پروپیلن و جدول ۴ مشخصه‌های فیزیکی آنها را ارائه می‌دهند. با توجه به آن که در پژوهش‌های گذشته گزارش شده بود که تسلیح خاک‌ها با الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل چگالی و محتوای وزنی پایین و همچنین عدم توانایی جذب آب تأثیر بسیار ناچیزی بر وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه‌ی مخلوط خاک-الیاف دارد [۶۳-۶۷]، در این پژوهش آزمایش تراکم روی کائولینیت مسلح شده انجام نگردید. بنابراین، برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده و نشده به ترتیب ویژگی‌های تراکمی مخلوط‌های کائولینیت-آهک و کائولینیت (جدول ۳) مد نظر قرار گرفته است. در ادامه، جهت اختصار، بر



(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(ه)



(و)

شکل ۳- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها؛ (الف) اختلاط کائولینیت-آهک-الیاف، (ب) افشاندن آب و هم زدن مخلوط، (ج) نمونه‌ی متراکم نشده، (د) تراکم استاتیکی با جک هیدرولیکی، (ه) نمونه‌ی متراکم شده، و (و) عمل‌آوری نمونه‌ها.

پس از اتمام عمل‌آوری، نمونه‌ها از کیسه‌ی پلاستیکی خارج و بلافاصله مطابق با استاندارد ASTM C1609/C1609M-12 تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند (شکل ۴). طبق این استاندارد، بارگذاری باید به صورت کنترل کرنش^{۶۳} و با سرعت ۰/۰۶ الی ۰/۲۴ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردد [۶۲]. از این رو، در این تحقیق سرعت بارگذاری برابر با ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه که در محدوده‌ی مجاز قرار دارد انتخاب شد.



شکل ۴- نمونه تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای.

تراکم نمونه‌های آزمایشگاهی به طور معمول به روش‌های دینامیکی^{۵۸} (ضربه زدن^{۵۹}) و استاتیکی^{۶۰} (فشردن^{۶۱}) انجام می‌گردد که در این پژوهش از تکنیک فشرده‌سازی با جک هیدرولیکی استفاده شد (شکل ۳ (د)) [۸، ۱۷، ۳۳، ۳۴، ۳۶، ۶۸، ۶۹]. پس از تراکم مخلوط (شکل ۳ (ه))، نمونه‌ها از قالب خارج و وزن شدند. نتایج نشان دادند که وزن نمونه‌ها نسبت به وزن تئوری (محاسبه شده بر اساس جدول ۳) کمتر از ۱ درصد اختلاف دارد که با توجه به ماهیت آزمایشگاهی پژوهش این رواداری^{۶۲} پذیرفته شده قلمداد گردید. در انتها، جهت جلوگیری از تبخیر رطوبت، نمونه‌ها بلافاصله به درون کیسه‌ی پلاستیکی منتقل و در محفظه‌ای داخل محیط آزمایشگاه با دمای ۲۰ الی ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند (شکل ۳ (و)).

۴- آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

58- Dynamic

59- Tamping

60- Static

61- Pressing

62- Tolerance

63- Strain Control

۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این مطالعه، جهت بررسی اندرکنش خاک با الیاف پلی پروپیلن، از میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه الزهراء مدل VEGA3 تولیدی شرکت TESCAN استفاده شد. بدین منظور، پس از انجام آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای، تکه‌هایی به ابعاد تقریبی $2 \times 2 \times 2$ سانتی متر از صفحه‌ی گسیختگی نمونه‌ها اخذ شد. با توجه به نارسا بودن خاک و به منظور جلوگیری از تجمع الکترونی، سطوح این تکه‌ها با طلا پوشش داده شد.

۶- ارائه و تفسیر نتایج

۶-۱- کائولینیت غیر مسلح

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های کائولینیت غیر مسلح در شکل ۵ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، صرف نظر از محتوای آهک و دوره‌ی عمل‌آوری، منحنی‌های تنش-کرنش به دو ناحیه‌ی اصلی (ناحیه‌های (۰)-(۱) و (۱)-(۲)) تقسیم می‌شوند. در ناحیه‌ی اول منحنی‌های تنش-کرنش (ناحیه‌ی (۰)-(۱))، با افزایش کرنش مقدار تنش افزایش یافت ولی ترکی در نمونه مشاهده نشد. در نزدیکی نقطه‌ی (۲) (تنش بیشینه)، ترک ریزی در قسمت تحتانی نمونه‌ها در زیر خط بارگذاری مشاهده شد که به سرعت رشد کرده و نمونه را به طور ناگهانی به دو بخش تقسیم نمود که ترد بودن نمونه‌ها را نشان می‌داد (شکل ۶). به همین خاطر در ناحیه‌ی دوم این منحنی‌ها (ناحیه‌ی (۱)-(۲))، تنش به سرعت افت نمود و برابر با صفر شد.

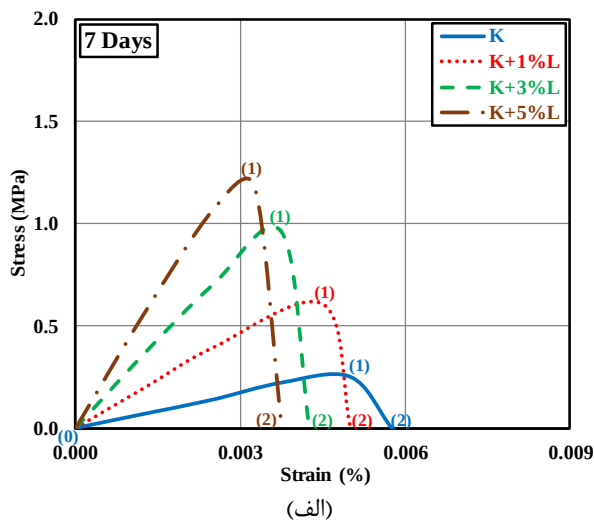
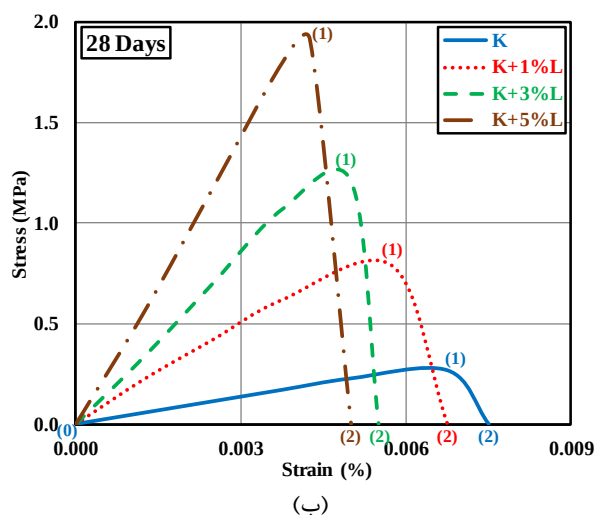
نتایج ارائه شده در شکل ۵ نشان می‌دهند که مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌های تثبیت نشده، تحت تأثیر زمان عمل‌آوری قرار ندارد که علت آن ناشی از حضور نداشتن آهک در مخلوط نمونه‌ها و عدم انجام واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. علاوه بر آن، از شکل ۵ مشاهده می‌گردد که در هر دو زمان عمل‌آوری (۷ و ۲۸

روزه)، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها به ترتیب رابطه‌ای مستقیم و عکس با محتوای وزنی آهک دارند. به گونه‌ای که با حفظ زمان عمل‌آوری و فقط افزایش محتوای آهک از ۰ به ۱، ۳ و ۵ درصد، مقاومت خمشی به ترتیب $2/4$ الی $3/8$ ، $4/6$ الی $4/7$ و $7/2$ برابر شده و کرنش در بیشینه تنش به ترتیب ۱۰ الی ۱۵، ۲۵ الی ۲۸، و ۳۵ الی ۳۸ درصد کاهش یافته است. کاهش کرنش در بیشینه تنش با افزایش محتوای آهک نشان از افزایش تردی و شکنندگی کائولینیت در اثر تثبیت و گسیختگی ناگهانی آن دارد. لازم به ذکر است که افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری خاک‌های رسی در اثر تثبیت توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است [۸، ۱۰، ۱۴، ۱۷ و ۶۹].

شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که در تمامی محتواهای وزنی آهک، مقاومت خمشی کائولینیت با زمان عمل‌آوری رابطه‌ی مستقیم دارد. به گونه‌ای که با حفظ محتوای وزنی آهک و فقط افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت خمشی کائولینیت تثبیت شده ۳۰ الی ۶۲ درصد افزایش یافته است. افزایش محتوای آهک و دوره عمل‌آوری، واکنش‌های شیمیایی بین آهک با سیلیس و آلومینای موجود در ذرات رس کائولینیت را افزایش داده و ترکیب‌های شیمیایی مانند هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) را تشکیل می‌دهد. این محصولات کریستالی، فضاهای خالی بین ذرات رس را پر نموده و منجر به افزایش ویژگی‌های مقاومتی خاک تثبیت شده می‌شوند [۸، ۱۰، ۱۴، ۱۷ و ۶۹]. ارتباط مستقیم محتوای ماده‌ی تثبیت‌کننده و دوره‌ی عمل‌آوری با مقاومت خاک‌های رسی تثبیت شده توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۳۵، ۳۷، ۵۱ و ۵۹].

۶-۲- کائولینیت مسلح تثبیت نشده

در شکل ۷ نمودارهای تنش-کرنش کائولینیت مسلح تثبیت نشده ارائه شده است.



شکل ۵- نمودار تنش- کرنش کائولینیت غیر مسلح، تثبیت شده و نشده؛ الف) عمل‌آوری ۷ روزه، ب) عمل‌آوری ۲۸ روزه.

کششی نقشی ایفا ننموده و نیروی کششی تحمل شده توسط آنها به الیاف ردیف‌های بالاتر منتقل گردد. این دو مشاهده، در مجموع موجب کاهش ناگهانی تنش در ناحیه دوم ((۱)-(۲)) شدند.

بسیج شدن نیروی کششی الیاف موجود در قسمت‌های بالاتر نمونه که هنوز بیرون کشیده نشده بودند موجب شد تنش در ناحیه‌ی سوم ((۲)-(۳)) به طور کامل صفر نشده و تقریباً ثابت باقی بماند (تنش پسماند). ولی در نهایت، با ادامه‌ی روند بیرون کشیده شدن الیاف قسمت‌های بالایی نمونه، تنش بالاخره برابر با صفر شد. لازم به ذکر است که جهت جلوگیری از کوچک و نامفهوم شدن شکل ۷، کرنش در این شکل‌ها صرفاً تا ۰/۰۶ درصد ارائه شده است، به همین خاطر صفر شدن تنش پسماند در این شکل قابل مشاهده نیست.

شکل ۷ همچنین نشان می‌دهد که مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها، به دلیل حضور نداشتن آهک در مخلوط نمونه‌ها و عدم انجام واکنش‌های پوزولانی، تحت تأثیر زمان عمل‌آوری قرار نگرفته است. علاوه بر آن، شکل ۷ نشان می‌دهد در اثر تسلیح نمونه‌ها با الیاف پلی‌پروپیلن، هم مقاومت خمشی و هم شکل‌پذیری کائولینیت بهبود یافته است. به گونه‌ای که مقاومت خمشی ۴ الی ۱۰۶ درصد و کرنش در بیشینه تنش ۲۲

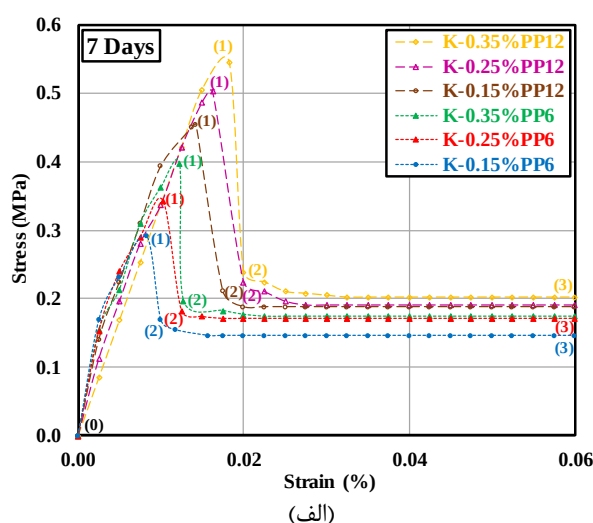
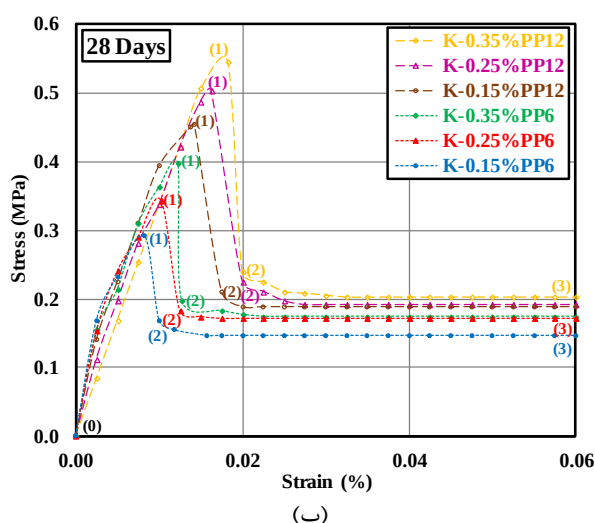


شکل ۶- گسیختگی نمونه‌ی تثبیت شده با ۵ درصد آهک.

مشاهده می‌گردد که نمودارهای تنش-کرنش مرتبط با نمونه‌های مسلح، بر خلاف نمونه‌های غیر مسلح (شکل ۵)، به سه ناحیه‌ی اصلی تقسیم می‌شوند (ناحیه‌های (۰)-(۱)، (۱)-(۲) و (۲)-(۳)). در تمامی نمونه‌های مسلح، در ناحیه‌ی اول ((۰)-(۱))، با افزایش کرنش مقدار تنش افزایش یافت و تقریباً در اواسط این ناحیه ترکی در قسمت تحتانی نمونه‌ها در زیر خط بارگذاری مشاهده شد که به صورت آهسته رشد می‌نمود. علت آهسته بودن رشد این ترک ناشی از پدیده‌ی پل‌زدگی (شکل ۸) بود که الیاف دو طرف ترک را به یکدیگر دوخته و توسعه‌ی آن را محدود می‌نمودند. در نزدیکی نقطه‌ی (۲) (تنش بیشینه) دو اتفاق مهم رخ داد. نخست آن که رشد ترک تقریباً کامل شد و این امر از بین رفتن مقاومت فشاری قسمت فوقانی نمونه و در مجموع کاهش مقاومت خمشی را به دنبال داشت. دوم آن که الیاف قسمت تحتانی نمونه به دلیل رشد عرض ترک، شروع به بیرون کشیده شدن از خاک طرفین ترک نمودند و این امر موجب شد این الیاف دیگر در تحمل تنش

یافته‌اند.

الی ۱۷۰ درصد بسته به طول و محتوای الیاف افزایش



شکل ۷- نمودارهای تنش- کرنش کائولینیت مسلح تثبیت نشده؛ (الف) عمل‌آوری ۷ روزه، و (ب) عمل‌آوری ۲۸ روزه.

الی ۷۹ درصد شده است. لازم به ذکر است که ارتباط مستقیم محتوا و طول الیاف با ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های رسی توسط پژوهش‌گران دیگر نیز گزارش شده است [۱، ۵، ۲۶، ۲۸، ۳۲، ۶۸ و ۶۹].

رابطه‌ی مستقیم بین محتوای وزنی الیاف با مقاومت و کرنش در بیشینه تنش به دلیل افزایش تعداد الیاف موجود در نمونه است. ازدیاد الیاف، افزایش تعداد پل‌های تشکیل شده در دو طرف سطح گسیختگی، محدودیت بیشتر رشد ترک و متعاقباً افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه را به دنبال دارد [۱، ۵، ۲۶، ۲۸، ۳۲، ۶۸ و ۶۹]. با افزایش طول الیاف، طول گیرداری آنها در دو طرف ناحیه‌ی گسیختگی نیز افزایش یافته و به دنبال آن نیروی بیرون‌کشیدگی لازم بیشتر می‌گردد. در نتیجه پدیده‌ی پل‌زدگی تقویت شده و مقاومت و شکل‌پذیری نمونه بهبود می‌یابد [۱، ۵، ۲۶، ۲۸، ۳۲، ۶۸ و ۶۹].

۶-۳- کائولینیت مسلح تثبیت شده

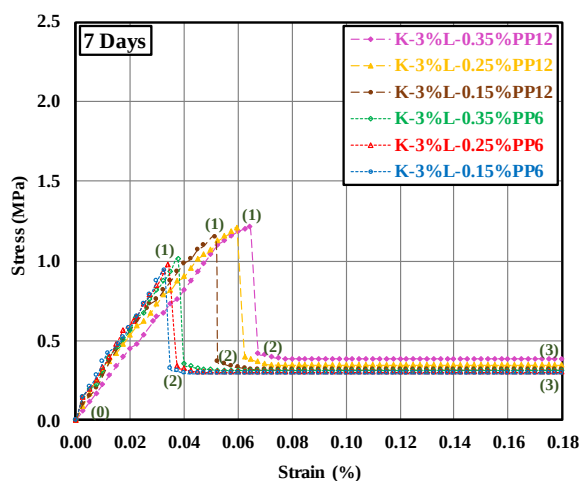
شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مسلح تثبیت شده با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت را نمایش می‌دهند.



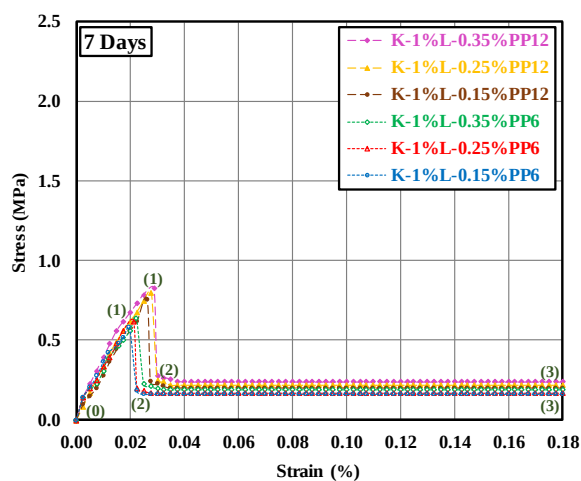
شکل ۸- پدیده‌ی پل‌زدگی الیاف در کائولینیت مسلح.

علت این امر همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، پدیده‌ی پل‌زدگی می‌باشد که دو طرف ناحیه‌ی گسیختگی را به یکدیگر دوخته و در برابر رشد ترک و گسیختگی نمونه مقاومت نموده است.

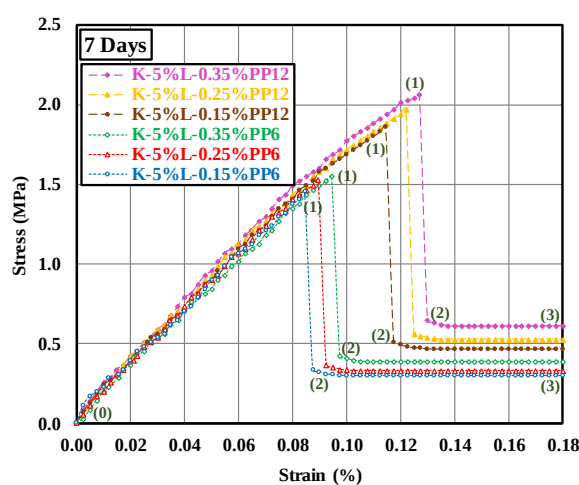
از شکل ۷ مشاهده می‌گردد که مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها با محتوای وزنی و طول الیاف رابطه‌ی مستقیم دارند. به گونه‌ای که با ثابت نگه داشتن طول الیاف و زمان عمل‌آوری و تنها افزایش محتوای الیاف از ۱۵/۰ به ۲۵/۰ و ۳۵/۰، مقاومت خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۱۱ الی ۲۰ و ۲۰ الی ۴۰ درصد و کرنش در بیشینه تنش نیز به ترتیب ۱۴ الی ۲۴ و ۲۸ الی ۴۸ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه، با حفظ محتوای الیاف و زمان عمل‌آوری، افزایش طول الیاف از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر موجب بهبود مقاومت خمشی نمونه‌ها به میزان ۳۷ الی ۶۲ درصد و تقویت شکل‌پذیری آنها به میزان ۴۹



(ب)



(الف)

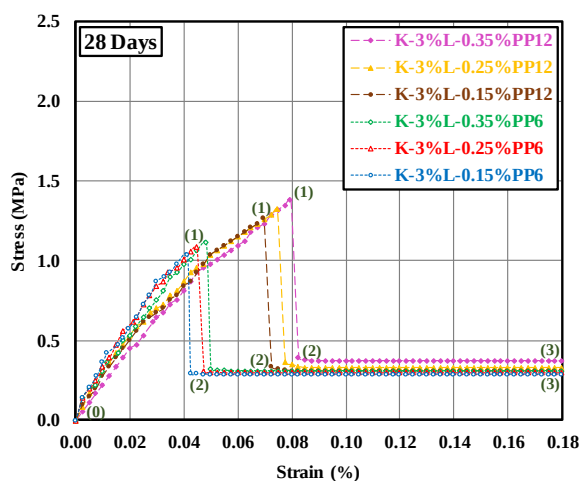


(ج)

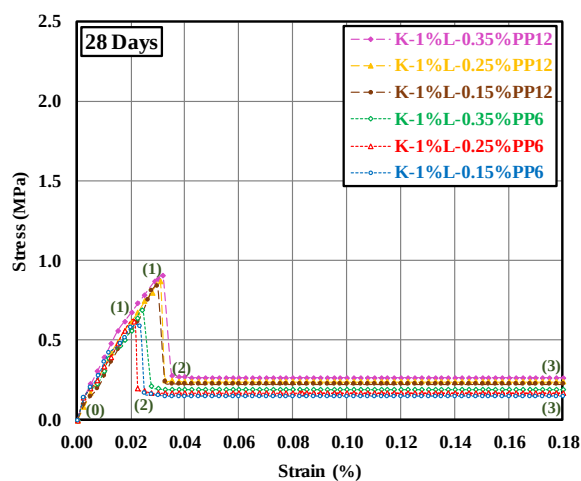
شکل ۹- نمودارهای تنش- کرنش کانولینیت مسلح تثبیت شده با ۷ روز عمل آوری؛ (الف) ۱٪ آهک، (ب) ۳٪ آهک، و (ج) ۵٪ آهک.

است که علت آن ناشی از تقویت پدیده‌ی پلزدگی در اثر افزایش تعداد پل‌ها و نیروی بیرون کشیدگی الیاف می‌باشد. به عنوان مثال، با حفظ طول الیاف، محتوای آهک و زمان عمل‌آوری، و صرفاً افزایش محتوای وزنی الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ و سپس ۰/۳۵ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۳ الی ۷ و ۶ الی ۱۸ درصد، و کرنش در بیشینه تنش به ترتیب ۵ الی ۱۵ و ۱۰ الی ۲۵ درصد تقویت شده است. به طور مشابه، با ثابت نگه داشتن زمان عمل‌آوری و محتوای الیاف و آهک، و تنها افزایش طول الیاف از ۶ به ۱۲ میلی‌متر، مقاومت و شکل‌پذیری خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۲۰ الی ۴۳ و ۲۸ الی ۷۴ درصد افزایش یافته است.

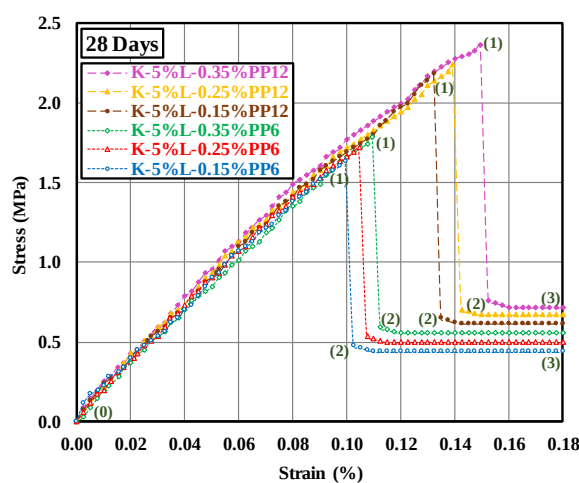
همان گونه که از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های کانولینیت مسلح تثبیت شده، روندی^{۶۴} مشابه با شکل ۷ داشته و به سه ناحیه‌ی اصلی (۰)-(۱)، (۱)-(۲) و (۲)-(۳) تقسیم می‌شوند که علت آن ناشی از حضور الیاف در مخلوط نمونه‌ها است. مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ با شکل ۵ نشان می‌دهد که با تسلیح نمونه‌های تثبیت شده، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری آنها در اثر پدیده‌ی پلزدگی افزایش یافته است. از شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد که در هر دو زمان عمل‌آوری، با افزایش مقدار و طول الیاف، مقاومت و شکل‌پذیری خمشی نمونه‌ها بهبود یافته



(ب)



(الف)



(ج)

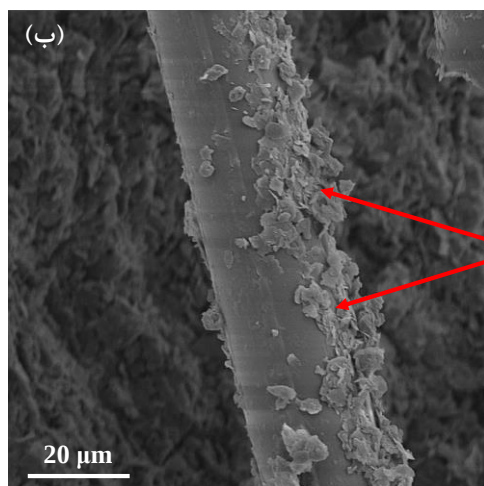
شکل ۱۰- نمودارهای تنش- کرنش کائولینیت مسلح تثبیت شده با ۲۸ روز عمل‌آوری؛ الف) ۱٪ آهک، ب) ۳٪ آهک، و ج) ۵٪ آهک.

خمشی و کرنش در بیشینه تنش به ترتیب ۵ الی ۱۷ و ۱۰ الی ۳۴ درصد ارتقاء یافته است. رابطه‌ی مستقیم مقاومت خمشی و شکل‌پذیری کائولینیت مسلح تثبیت شده با محتوای آهک و دوره‌ی عمل‌آوری ناشی از افزایش واکنش‌های شیمیایی و محصولات تولید شده می‌باشد که با پر نمودن فضاهای خالی بین ذرات رس، منجر به تقویت مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها شده است.

مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ با شکل ۷ نشان می‌دهد مقاومت و شکل‌پذیری خمشی کائولینیت مسلح تثبیت شده به مراتب بیشتر از مقاومت و شکل‌پذیری خمشی کائولینیت مسلح تثبیت نشده است. به عنوان مثال، در نمونه‌های مسلح به ۰/۳۵ درصد وزنی الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر که با ۵ درصد وزنی آهک تثبیت و به مدت ۲۸

علاوه بر آن، شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که در هر دو زمان عمل‌آوری، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها تحت تأثیر محتوای وزنی آهک قرار گرفته است. به گونه‌ای که با حفظ زمان عمل‌آوری، محتوا و طول الیاف، و فقط افزایش محتوای وزنی آهک از ۱ به ۳ و سپس ۵ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۴۷ الی ۷۶ و ۱۴۱ الی ۱۷۸ درصد و کرنش در بیشینه تنش ترتیب ۶۱ الی ۱۵۰ و ۸۸ الی ۱۶۱ درصد تقویت شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۹ و ۱۰ با یکدیگر نشان می‌دهد که مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها تحت تأثیر دوره‌ی عمل‌آوری قرار دارد. به عنوان مثال، با ثابت نگه داشتن محتوا و طول الیاف و همچنین مقدار آهک، و فقط افزایش دوره‌ی عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت

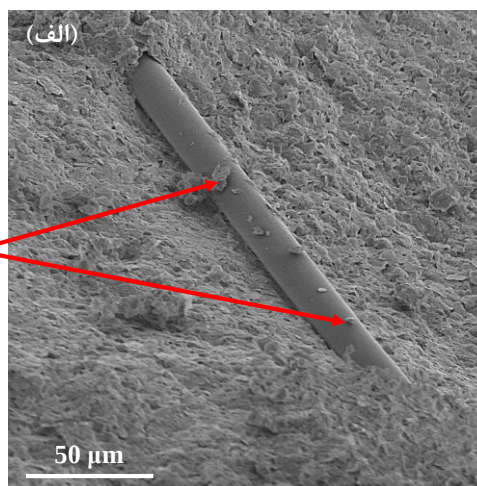
می‌نماید. بنابراین، نیروی لازم جهت بیرون کشیده شدن الیاف بهبود یافته و پدیده‌ی پل‌زدگی تقویت می‌گردد. ارتقاء پدیده‌ی پل‌زدگی نیز افزایش مقاومت و تغییر شکل خمشی را منجر می‌شود. مقایسه‌ی میکروگراف‌های ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که ذرات رس چسبیده به الیاف در کاتولینیت تثبیت شده، به طور چشمگیری بیشتر از تعداد ذرات رس چسبیده به الیاف در کاتولینیت تثبیت نشده است. این مشاهده اثبات می‌نماید که اصطکاک الیاف با کاتولینیت تثبیت شده به مراتب بیشتر از اندرکنش الیاف با کاتولینیت تثبیت نشده بوده و افزایش مقاومت و تغییر شکل خمشی کاتولینیت مسلح در اثر تثبیت با آهک را حمایت و پشتیبانی می‌نماید.



روز عمل‌آوری شده بودند، مقاومت خمشی ۴/۳۲ برابر و کرنش در بیشینه تنش ۸/۱۹ برابر بزرگ‌تر از نمونه‌ی مشابه مسلح تثبیت نشده است.

۷- تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی

در شکل ۱۱ میکروگراف‌های تهیه شده از نمونه‌های کاتولینیت مسلح تثبیت شده و نشده نمایش داده شده است. در اثر تثبیت کاتولینیت با آهک، فرآورده‌های پوزولانی تشکیل شده فضای خالی بین ذرات رس را پر نموده و موجب افزایش اصطکاک سطوح الیاف با خاک پیرامون آنها می‌گردد. افزایش اندرکنش نیز باعث به دام افتادن بهتر الیاف گشته و از حرکت آنها جلوگیری



ذرات رس

شکل ۱۱- میکروگراف‌های تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ الف) کاتولینیت تثبیت نشده، و ب) کاتولینیت تثبیت شده.

۸- نتیجه‌گیری

۱- تثبیت رس کاتولینیت با آهک در اثر واکنش‌های پوزولانی آهک با ذرات رس و تشکیل محصولات کریستالی نظیر هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم، موجب افزایش مقاومت خمشی و کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود. به عنوان مثال، در نمونه‌های غیر مسلح، تثبیت با ۵ درصد آهک منجر به افزایش ۴/۷ الی ۷/۲ برابری مقاومت خمشی و کاهش ۳۵ الی ۳۸ کرنش متناظر با بیشینه تنش گردیده است.

۲- با افزایش محتوای وزنی آهک و زمان عمل‌آوری، مقاومت خمشی کاتولینیت به دلیل افزایش

در این مطالعه رفتار خمشی رس کاتولینیت تثبیت و تسلیح شده مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از آهک با مقادیر وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد، الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و محتوای وزنی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ درصد و همچنین دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه استفاده شد. جهت انجام ارزیابی‌های کمی و کیفی نیز به ترتیب آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و میکروسکوپ الکترونی روبشی به کارگیری شدند. خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

۴- افزایش محتوا و طول الیاف پلی پروپیلن، تقویت تعداد پل‌ها و نیروی بیرون کشیدگی مورد نیاز الیاف و متعاقباً افزایش مقاومت و شکل پذیری خمشی کائولینیت را منتج می‌شود. در نمونه‌های تثبیت شده، با افزایش طول الیاف از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، مقاومت خمشی و کرنش در بیشینه تنش به ترتیب ۲۰ الی ۴۳ درصد و ۲۸ الی ۷۴ درصد بهبود یافته‌اند.

۵- به دلیل اندرکنش بهتر الیاف با کائولینیت تثبیت شده نسبت به کائولینیت تثبیت نشده، مقاومت و شکل پذیری نمونه‌های مسلح تثبیت شده به مراتب بیشتر از نمونه‌های مسلح تثبیت نشده است.

کمیت و کیفیت محصولات پوزولانی، بهبود می‌یابد. به طور مثال، با حفظ مقدار آهک و فقط افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت خمشی کائولینیت تسلیح نشده ۳۰ الی ۶۲ درصد افزایش یافته است.

۳- تسلیح کائولینیت تثبیت شده و نشده با الیاف پلی پروپیلن، که موجب پل‌زدگی الیاف و دوختن دو سمت ناحیه‌ی گسیختگی به یکدیگر می‌شود، افزایش مقاومت و شکل پذیری خمشی کائولینیت را به دنبال دارد. افزایش حدود دو برابری مقاومت خمشی و تقریباً ۳/۴ برابر کرنش متناظر با بیشینه تنش در اثر افزودن ۰/۳۵ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی‌متر به کائولینیت تثبیت نشده، نمونه‌ای از تأثیر مثبت تسلیح می‌باشد.

References

- [1] Ghalandarzadeh A, Abdi MR, Shafiei Chafi L. Construction of a New Hollow Cylinder Apparatus to Study the Tensile Behavior of Clay with Different Plasticity Indices. *Civil Infrastructure Researches*. 2021 Aug 23; 7(1): 153-71. doi: 10.22091/CER.2021.7389.1303
- [2] Yin P, Vanapalli SK. Triaxial tensile strength measurement of compacted clayey soils. *Geotechnical Testing Journal*. 2023 Sep 1; 46(5): 820-40. doi: 10.1520/GTJ20220166
- [3] Tang L, Cheng Z, Wang H, Chen Y. Effects of Drying and Wetting Process on the Tensile Strength of Granite Residual Soil. *Water*. 2023 Aug 2; 15(15): 2801. doi: 10.3390/w15152801
- [4] Wei Y, Tang CS, Zhu C, Cheng Q, Lu Y, Li L, Tian BG, Shi B. Influence of desiccation during freeze-thaw cycles on volumetric shrinkage and tensile strength of compacted clayey soils. *Engineering Geology*. 2024 May 1; 334: 107513. doi: 10.1016/j.enggeo.2024.107513
- [5] Abdi MR., Ebrahimi M. Impact of plasticity characteristics on wet-dry response of fiber reinforced clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025 Jan; 84(1), 53. doi: 10.1007/s10064-024-04081-2
- [6] Abden A, Al-Shamrani M, Dafalla M, Siddiqui N. Assessment of the performance of spread footings and mat foundations on expansive soils. *Results in Engineering*. 2024 Sep 1; 23: 102782. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102782
- [7] Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Influence of mixing time and execution procedure on strength characteristics of improved sand using deep soil mixing (DSM) method. *Construction and Building Materials*. 2024 Oct 18; 448: 138115. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138115
- [8] Abdi MR, Askarian A, Safdari Seh Gonbad M. Effects of sodium and calcium sulphates on volume stability and strength of lime-stabilized kaolinite. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020 Mar; 79: 941-57. doi: 10.1007/s10064-019-01592-1
- [9] Gadouri H. Behavior of natural pozzolana-lime-stabilized clayey soils artificially contaminated by sulfates. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2023;17(4). doi: 10.14525/JJCE.v17i4.07
- [10] Gadouri H, Mezian B. Strength improvement using polypropylene fiber as reinforcement in natural pozzolana-lime-stabilized expansive clayey soil artificially contaminated by sulfates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2023 Sep 7;67(4):1152-75. doi: 10.3311/PPci.21388
- [11] Heravi M, Cheshmi A. Investigation of the Effect of Polymer Emulsion on the Uniaxial Compressive Strength of Aeolian Sand. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Aug 23;9(1):175-91. doi: 10.22091/CER.2023.9107.1459

- [12] Mohseninia M, Salehzadeh H. Assessment of Key Factors Impacting Permeability in Treated Firouzkooch Siliceous Sand and Hormuz Carbonate Sand Using Persian Gum Biopolymer. *Civil Infrastructure Researches*. 2024 May 21;10(1):125-35. doi: **10.22091/CER.2024.9999.1515**
- [13] Gharib M, Arjomand MA, Abdi MR, Arefnia A. Influence of chitin nanofiber and rice husk ash on properties and bearing resistance of soft clay soils. *International Journal of Engineering*. 2019 Mar 1;32(3):373-80.
- [14] Abdi MR, Chehregosha A, Farzalizadeh R. Effects of miscellaneous plasticity on behavior of lime-treated kaolinites. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2019 Oct 16;15(8):1040-50. doi: **10.1080/19386362.2019.1677401**
- [15] Karimiazar J, Teshnizi ES, O'Kelly BC, Sadeghi S, Karimizad N, Yazdi A, Arjmandzadeh R. Effect of nano-silica on engineering properties of lime-treated marl soil. *Transportation Geotechnics*. 2023 Nov 1;43:101123. doi: **10.1016/j.trgeo.2023.101123**
- [16] Shaji S, Divya PV. Sustainable ground improvement of soft clay using eggshell lime and rice husk ash. *Construction and Building Materials*. 2024 Aug 30;441:137460. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2024.137460**
- [17] Abdi MR, Mirzaeifar H. Effects of discrete short polypropylene fibers on behavior of artificially cemented kaolinite. *International Journal of Civil Engineering*. 2016 Jun;14:253-62. doi: **10.1007/s40999-016-0022-5**
- [18] Ranjbar Taklymie MM, Hatami F. Enhancement of Mechanical Properties, Drying Shrinkage and High Temperature Resistance of Geopolymer Mortar Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag and Red Mud with Basalt Fiber. *Civil Infrastructure Researches*. 2024 May 21;10(1):67-83. doi: **10.22091/CER.2023.9855.1511**
- [19] Salimi M, Payan M, Hosseinpour I, Arabani M, Ranjbar PZ. Impact of clay nano-material and glass fiber on the efficacy of traditional soil stabilization technique. *Materials Letters*. 2024 Apr 1;360:136046. doi: **10.1016/j.matlet.2024.136046**
- [20] Salimi M, Payan M, Hosseinpour I, Arabani M, Ranjbar PZ. Effect of glass fiber (GF) on the mechanical properties and freeze-thaw (FT) durability of lime-nanoclay (NC)-stabilized marl clayey soil. *Construction and Building Materials*. 2024 Feb 16; 416: 135227. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2024.135227**
- [21] Kaniraj SR, Havanagi VG. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2001 Jul;127(7):574-84. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(574)**
- [22] Punthutaecha K, Puppala AJ, Vanapalli SK, Inyang H. Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers. *Journal of materials in Civil Engineering*. 2006 Apr;18(2):295-306. doi: **10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(295)**
- [23] Kumar A, Walia BS, Bajaj A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of materials in civil engineering*. 2007 Mar;19(3):242-8. doi: **10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(242)**
- [24] Muntohar AS. Influence of plastic waste fibers on the strength of lime-rice husk ash stabilized clay soil. *Civil Engineering Dimension*. 2009 Mar; 11(1):32-40. doi: **10.9744/ced.11.1.pp.%2032-40**
- [25] Yin Y, Yu XJ. Research on triaxial shear properties of glass fiber cement soil. In *Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior 2011* (pp. 179-185). doi: **10.1061/47633(412)24**
- [26] Kalkan E. Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils. *Applied Clay Science*. 2013 Aug 1;80:117-25. doi: **10.1016/j.clay.2013.06.014**
- [27] Olgun M. Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. *Geosynthetics International*. 2013 Aug;20(4):263-75. doi: **10.1680/gein.13.00016**
- [28] Anggraini V, Asadi A, Huat BB, Nahazanan H. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*. 2015 Jan 1;59:372-81. doi: **10.1016/j.measurement.2014.09.059**
- [29] Dang LC, Fatahi B, Khabbaz H. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia engineering*. 2016 Jan 1;143:658-65. doi: **10.1016/j.proeng.2016.06.093**
- [30] Boz A, Sezer A, Özdemir T, Hızal GE, Azdeniz Dolmacı Ö. Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018 Mar;11:1-4. doi: **10.1007/s12517-018-3458-x**
- [31] Kafodya I, Okonta F. Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil. *Construction and Building Materials*. 2018 May; 10;170:737-46. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.02.194**
- [32] Shen YS, Tang Y, Yin J, Li MP, Wen T. An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. *Construction and Building Materials*. 2021 Aug; 294:123537. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2021.123537**
- [33] Abdi MR, Ghalandarzadeh A, Shafiei Chafi L. An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021 Aug 1;13(4):885-98. doi: **10.1016/j.jrmge.2020.11.008**

- [34] Abdi MR, Ghalandarzadeh A, Shafiei-Chafi L. Optimization of lime and fiber content for improvement of clays with different plasticity using response surface method (RSM). *Transportation Geotechnics*. 2022 Jan 1;32:100685. doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100685
- [35] Sharma NK. Utilization of fly ash, lime sludge and polypropylene fiber as stabilizers to enhance soil properties. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;65:988-94. doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.615
- [36] Wang Y, Liu Z, Wan W, Nie A, Zhang Y, Han C. Toughening effect and mechanism of rice straw Fiber-reinforced lime soil. *Construction and Building Materials*. 2023 Aug 22;393:132133. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132133
- [37] Arabani M, Shalchian MM, Rahimabadi MM. The influence of rice fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization. *Construction and Building Materials*. 2023 Dec 1;407:133542. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133542
- [38] Sarkar R, Devi D, Tamang SK. Experimental Studies on Fiber Reinforced Soil Stabilized with Lime and Fly Ash. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024 Sep 9;16(5):428-43. doi: 10.30880/ijie.2024.16.05.032
- [39] Liu S, Wang Y, Tian H, Sun S, Zhang L, Zhou R, Han C. Mechanical properties and toughening effect of rice straw fiber-reinforced soil. *Case Studies in Construction Materials*. 2024 Dec 1;21:e03511. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03511
- [40] Abdi M, Parsa Pajouh A. Use of bentonite and lime for decreasing the permeability of liner and cover in landfills. *Journal of Civil and Surveying Engineering*. 2009 Jan;43(1): 61-70.
- [41] Camp S, Gourc JP, Ple O. Landfill clay barrier subjected to cracking: Multi-scale analysis of bending tests. *Applied Clay Science*. 2010 Apr;48(3):384-392. doi: 10.1016/j.clay.2010.01.011
- [42] Nazari M, Ghabchi R, Zaman M, Commuri S. Influence of tensile strain at failure on flexural properties of a cementitiously stabilized subgrade soil. *International Journal of Geomechanics*. 2017 Jun; 17(2): 04016057. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.000073
- [43] Liang L, Xu Y, Hu S. Bending and crack evolution behaviors of cemented soil reinforced with surface modified PVA fiber. *Materials*. 2022 Feb;15(14): 4799. doi: 10.3390/ma15144799
- [44] Jamei M, Mabrouk A, Alassaf Y. Influence of Deflection Deformations on the Sustainability of the Landfill Cover: Analysis and Recommendations. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024 Jun;14(3):14387-14394. doi: 10.48084/etasr.7364
- [45] Abdi MR, Parsapazhouh A, Arjmand MA. Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays. *International Journal of Civil Engineering*. 2008 Dec;6(4):284-292.
- [46] Tajdini M, Nabizadeh A, Taherkhani H, Zartaj H. Effect of added waste rubber on the properties and failure mode of kaolinite clay. *International Journal of Civil Engineering*. 2017 Jul;15:949-958. doi: 10.1007/s40999-016-0057-7
- [47] Afshar M, Alipour A, Norouzbeigi R. Kaolin-based stable colloidal nano-silica: Peptization factors and stability assessments via designed experiments. *Results in Engineering*. 2024 Mar;21:101654. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101654
- [48] Abdi MR, Wild S. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: I. Physical characteristics. *Clay Minerals*. 1993 Dec;28(4):555-67. doi: /10.1180/claymin.1993.028.4.06
- [49] Wild S, Abdi MR, Leng-Ward G. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: II. Reaction products and expansion. *Clay minerals*. 1993 Dec;28(4):569-83. doi: 10.1180/claymin.1993.028.4.07
- [50] Hatefi MH, Arabani M, Payan M, Ranjbar PZ. 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*. 2024 Dec 1;24:103077. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103077
- [51] Abdi MR, Hajalilue Bonab M, Jalilzadeh Z. Impact of various binders on loess durability subjected to different freeze-thaw regimes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2024 Jun 10;28(8):1924-42. doi: 10.1080/19648189.2023.2286470
- [52] Cai Y, Shi B, Ng CW, Tang CS. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering geology*. 2006 Nov 3;87(3-4):230-40. doi: 10.1016/j.enggeo.2006.07.007
- [53] Dash SK, Hussain M. Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*. 2012 Jun 1;24(6):707-14. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431
- [54] Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 C. *Applied clay science*. 2010 Oct ;50(2):191-8. doi: 10.1016/j.clay.2010.07.023
- [55] ASTM D698-12R21; Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2021. doi: 10.1520/D0698-12R21
- [56] Rajasekaran G. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean engineering*. 2005 Jun;32(8-9):1133-1159. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.08.012

- [57] Eren Ş, Filiz M. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. *Construction and Building Materials*. 2009 Jul;23(7):2473-2480. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002**
- [58] Harichane K, Ghrici M, Missoum H. Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength. *Frontiers of Earth Science*. 2011 Apr;5:162-169. **doi: 10.1007/s11707-011-0166-1**
- [59] Abdi MR. Effects of basic Oxygen steel slag (BOS) on strength and durability of kaolinite. *International Journal of Civil Engineering*. 2011 Jun;9(2): 81-89.
- [60] Islam S, Hoque N, Uddin M, Chowdhury M. Strength Development in Clay Soil Stabilized with Fly Ash. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2018 Apr;12(2): 188-201.
- [61] Ismail AIM, Belal ZL. Use of cement kiln dust on the engineering modification of soil materials, Nile Delta, Egypt. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2016 Nov;34:463-469. **doi: 10.1007/s10706-015-9957-6**
- [62] ASTM C. 1609/C .1609M-12; Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2019. **doi: 10.1520/C1609_C1609M-12**
- [63] Malekzadeh M, Bilsel H. Hydro-mechanical behavior of polypropylene fiber reinforced expansive soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014 Nov;18(7):2028-2033. **doi: 10.1007/s12205-014-0389-2**
- [64] Moghal AAB, Chittoori BC, Basha BM, Al-Shamrani MA. Target reliability approach to study the effect of fiber reinforcement on UCS behavior of lime treated semiarid soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017 Feb;29(6):04017014. **doi: 0.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000183**
- [65] Ali M, Aziz M, Hamza M, Faizan Madni M. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. *Geomechanics and Engineering*. 2020;Aug 22(3):227-236. doi: 10.12989/gae.2020.22.3.227
- [66] Murthi,P, Saravanan R, Poongodi K. Studies on the impact of polypropylene and silica fume blended combination on the material behaviour of black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39:621-626. **doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.004**
- [67] Khalid U, ur Rehman Z, Ahmad A. Effect of cyclic wet-dry environment and vibration event on desiccation crack and mechanical characteristics of polypropylene fiber-reinforced clay. *Transportation Geotechnics*. 2025 Mar;51:101542. **doi: 10.1016/j.trgeo.2025.101542**
- [68] Anggraini V, Asadi A, Syamsir A, Huat BB. Three point bending flexural strength of cement treated tropical marine soil reinforced by lime treated natural fiber. *Measurement*. 2017 Dec;111:158-166. **doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.045**
- [69] Ozigi PB, Tuleun LZ, Jimoh AA. Flexural strength behaviour of apa (afzeliabipindensis) reinforced stabilized lateritic soil beam. *Civil Engineering Dimension*. 2020 Mar;22(1):22-28. **doi: 10.9744/ced.22.1.22-28**