



University Of Qom



Enhancing the Flexural Characteristics of Stabilized Kaolinite Clay by Reinforcing with Composite Fiber

Mahmood Reza Abdi¹, 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 16 Sep 2025
Revised 09 Oct 2025
Accepted 13 Oct 2025
Published 18 Oct 2025

Keywords:
Composite Fiber,
Kaolinite,
Lime,
Flexural Strength,
Three-Point Bending Test

ABSTRACT

In this research, a new type of fiber known as composite fibers has been utilized to enhance the flexural properties of stabilized clay. The core of the composite fiber consists of elastane, while its shell is composed of numerous polyester fibers. In this regard, kaolinite clay, lime at weight contents of 1, 3, and 5%, and composite fibers at weight contents of 1.5, 2.5, and 3.5%, with lengths of 6 and 12 mm, have been employed for sample preparation, along with curing periods of 7 and 28 days. For quantitative and qualitative investigations, three-point bending tests, as well as optical and scanning electron microscopy, have been employed. The results indicated that the reinforcement of stabilized kaolinite with composite fibers led to improvements of 10 to 78% in flexural strength and a factor 3.1 to 41.5 in the corresponding strain. The findings also demonstrated that the performance of composite fibers in enhancing the strength and ductility of stabilized kaolinite is directly related to the content and length of the fibers, the lime content, and the curing time. Furthermore, quantitative evaluations revealed that the dual structure of the composite fibers, particularly the polyester shell wrapped around the elastane core, created suitable mechanical interaction with the soil due to their high number and perpendicular orientation to the tensile direction, effectively strengthening resistance against pull-out forces.

Cite this article: Abdi MR, Abbasi E, Safdari Seh Gonbad M. Enhancing the Flexural Characteristics of Stabilized Kaolinite Clay by Reinforcing with Composite Fiber. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 141-157. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13895.1652>



Introduction

Chemical stabilization is a widely used ground improvement technique that enhances soil strength but often increases brittleness. To improve ductility, fiber reinforcement has been explored. However, conventional fibers are costly and difficult to mix uniformly due to their small dimensions. The present study proposes a new type of reinforcement, termed composite fibers, to enhance the flexural characteristics of stabilized clay. These fibers, derived from garment industry waste, are cost-free, environmentally friendly, and suitable for reuse in soil reinforcement. Their relatively larger dimensions compared to conventional fibers facilitate mixing with soils. Composite fibers have a two-part structure: an elastane core providing high elasticity, and a polyester fiber sheath helically wound around the core. The polymeric composition of these constituents imparts high resistance to adverse environmental conditions such as moisture, temperature fluctuations, and chemical agents in soil, thereby ensuring stable, long-term performance in geotechnical applications.

Methods and Materials

Kaolinite (*K*) clay (properties in Table 1) was stabilized with 1%, 3%, or 5% lime (*L*) and reinforced with composite fibers (*C*; properties in Table 1) of 6 mm or 12 mm length at 1.5%, 2.5%, or 3.5% content. Specimens were cured for 7 or 28 days under laboratory conditions (20–25 °C). Material quantities were determined based on maximum dry density, optimum moisture content, and mold dimensions (4×4×16 cm). Mixing involved 2 min of manual blending followed by 10 min in a mixer; water was added gradually during hand-mixing with a spatula. The mixture was placed into pre-lubricated molds and statically compacted with a hydraulic jack. After demolding, specimens were wrapped in plastic film to prevent moisture loss, and cured in polystyrene boxes. Flexural performance was evaluated by three-point bending tests in accordance with ASTM C1609/C1609M-12. Failure surface segments were collected and examined via

optical and scanning electron microscopy to characterize fiber–soil interaction patterns

Table 1. Properties of *K* and *C*

<i>K</i>	
Property	Value
< 0.075 mm (%)	100
G_s	2.6
PL (%)	26
LL (%)	45
$\gamma_{d_{max}}$ (g/cm ³)	1.46
ω_{opt} (%)	24.3
<i>C</i>	
Diameter (μm)	800-950
Density (g/cm ³)	0.85
Tensile Strength (N)	12-14

Results and Discussion

Figs. 1 and 2 present the flexural strength–strain curves of stabilized and reinforced specimens cured for 7 and 28 days, respectively. The results indicate that flexural strength and ductility increase with the weight content of *C* fibers. Raising the *C* content from 1.5% to 2.5% and then to 3.5% produced flexural strength gains of approximately 3–17% and 6–35%, and corresponding peak strain increases of about 3–23% and 5–46%, respectively. These trends are attributed to a greater number of fiber bridges across the failure surface, which inhibit crack growth and propagation. Moreover, the findings reveal that the flexural behavior of the specimens is also influenced by fiber length. Enlarging the fiber length from 6 mm to 12 mm increased flexural strength by approximately 22–52%, owing to the longer embedment length of the *C* fibers, which consequently requires greater pull-out force.

The outputs further show that the flexural characteristics are directly related to *L* content. Increasing *L* from 1% to 3% and then to 5% improved flexural strength by approximately 49–61% and 146–165%, with corresponding strain increases of about 64–154% and 423–484%, respectively. Comparison of Figs. 1 and 2 demonstrates that these properties are directly related to curing time. Extending the curing period from 7 days to 28 days resulted in improvements in flexural strength and the

corresponding strain of approximately 9–16%

and 10–35%, respectively.

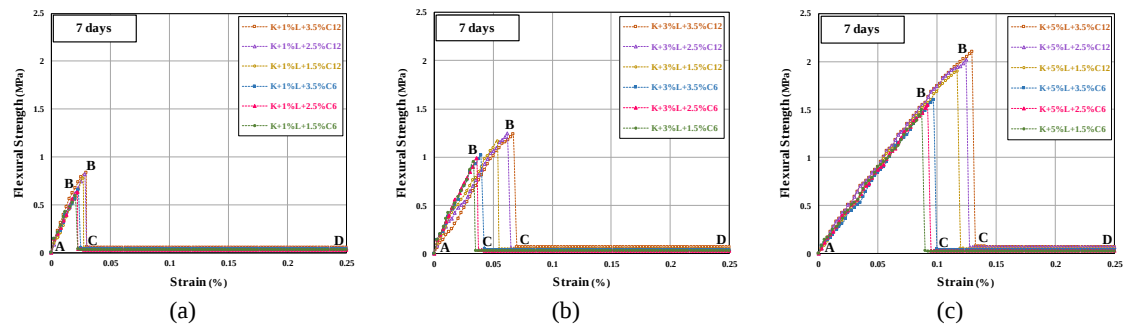


Fig. 1. Flexural strength–strain responses of reinforced kaolinite with lime contents of (a) 1%, (b) 3%, and (c) 5% after a 7-day curing period

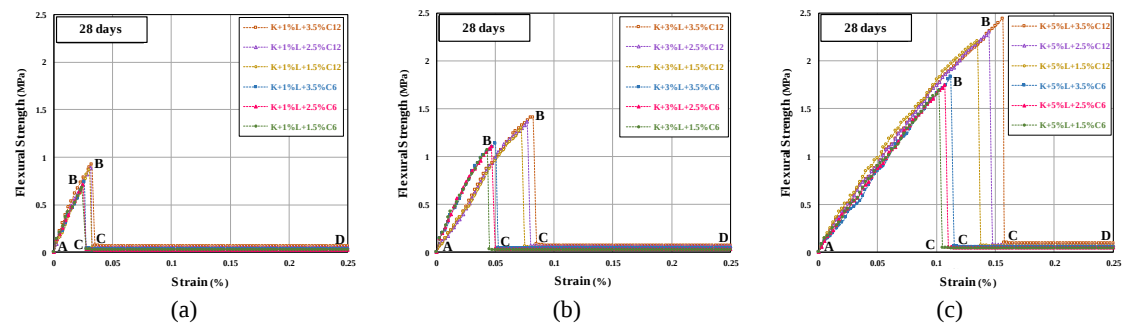


Fig. 2. Flexural strength–strain responses of reinforced kaolinite with lime contents of (a) 1%, (b) 3%, and (c) 5% after a 28-day curing period

Conclusion

The key findings of this study are summarized as follows:

- I) Composite fibers are highly effective in enhancing the flexural strength and ductility of lime-stabilized kaolinite. This improvement correlates directly with the fiber content, fiber length, lime content, and curing duration. Reinforcing the stabilized specimen (5% lime) with 3.5% composite fibers of 12 mm length, cured for 28 days, resulted in a 27% increase in flexural strength and a 41.5-fold increase in the corresponding strain.
- II) Encapsulation of the soil within a sheath of composite fibers, the presence of sheath imprints at fiber pull-out locations, and the detachment of soil fragments from the opposite side of the failure surface collectively demonstrate the strong interfacial interaction between the fibers and the surrounding soil matrix.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

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

Authors' Contributions

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



تقویت ویژگی‌های خمشی رس کائولینیت تثبیت‌شده با تسلیح به الیاف مرکب

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، از یک نوع الیاف جدید به نام الیاف مرکب جهت تقویت ویژگی‌های خمشی رس تثبیت‌شده استفاده گردیده است. هسته الیاف مرکب شامل یک لیف الاستان و پوسته آن متشکل از تعداد زیادی الیاف پلی‌استر می‌باشد. در این راستا، از رس کائولینیت، آهک با محتوای وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد، الیاف مرکب با مقادیر وزنی ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد و طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر جهت آماده‌سازی، و دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه برای عمل‌آوری نمونه‌ها استفاده شده است. به منظور بررسی‌های کمی و کیفی، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان دادند که تسلیح کائولینیت تثبیت‌شده با الیاف مرکب موجب بهبود ۱۰ تا ۷۸ درصدی مقاومت خمشی و ۳ تا ۴۱/۵ برابری کرنش متناظر با آن گشته است. یافته‌ها همچنین نشان دادند که عملکرد الیاف مرکب در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری خمشی کائولینیت تثبیت‌شده رابطه مستقیمی با محتوای وزنی و طول الیاف، مقدار وزنی آهک و زمان عمل‌آوری داشته است. علاوه بر آن، ارزیابی‌های کمی آشکار کردند که ساختار دو بخشی الیاف مرکب به خصوص پوسته پلی‌استری پیچیده شده به دور هسته الاستان، به دلیل تعداد بالا و عمود بودن بر راستای کشش، اندرکنش مکانیکی مناسبی با خاک ایجاد نموده و به خوبی در برابر نیروهای بیرون‌کشیدگی مقاومت نموده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

کلیدواژه‌ها:

الیاف مرکب،

کائولینیت،

آهک،

مقاومت خمشی،

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای.

استناد: عبدی محمودرضا، عباسی الهام، صفدری سه‌گنبد تقویت ویژگی‌های خمشی رس کائولینیت تثبیت‌شده با تسلیح به الیاف مرکب.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱۴۱-۱۵۷. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13895.1652>



۱- مقدمه

اجرای پروژه‌های عمرانی بر روی بسترهای نامناسب، به دلیل ظرفیت باربری پایین و نشست زیاد، همواره چالش‌برانگیز بوده است [۱-۵]. بهسازی زمین یکی از روش‌های پرکاربرد برای تقویت بستر پروژه‌ها است که ضمن تضمین پایداری سازه‌ها، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد [۵-۸]. تثبیت شیمیایی خاک به عنوان یکی از تکنیک‌های متداول بهسازی، گرچه منجر به افزایش چشمگیر مقاومت خاک‌ها می‌گردد ولی تردی آن‌ها نیز را به دنبال دارد [۹-۱۱]. از این رو، محققین افزودن مسلح‌کننده‌ها نظیر الیاف به خاک تثبیت‌شده را جهت افزایش شکل‌پذیری پیشنهاد و مورد بررسی قرار داده‌اند. خاک تثبیت‌شده با مواد شیمیایی و مسلح گردیده به الیاف، در بسیاری از پروژه‌های عمرانی نظیر تعمیرات موضعی لایه‌های راهسازی، خاکریزهای راه‌آهن، پوشش^۱ و آستر^۲ محل‌های دفن زباله^۳، حفاظت از شیب‌ها و موارد مشابه کاربرد دارد؛ به همین خاطر مطالعه و بررسی رفتار آن اهمیت بالایی دارد [۱۲-۱۵].

پانثاتایچا^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۶ ارتقاء خصوصیت‌های تورمی و انقباضی رس تثبیت‌شده با خاکستر بادی بوسیله تسلیح با دو نوع الیاف پلی پروپیلن و نایلون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تثبیت و تسلیح همزمان موجب کاهش ۲۰ الی ۸۰ درصدی تورم و انقباض خاک‌ها می‌گردد [۱۶]. کومار^۵ و همکاران بهبود خصوصیت‌های مقاومتی رس تثبیت‌شده با آهک و خاکستر بادی با مسلح‌سازی آنها به الیاف صاف و چین خورده پلی‌استر را با آزمایش‌های فشاری محصور نشده^۶ و کششی دو نیم شدن^۷ بررسی کردند. یافته‌ها

نشان دادند که افزودن ۱/۵ و ۱ درصد الیاف صاف و چین‌دار به طول ۶ میلی‌متر بهینه بوده و مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب حدود ۷۴ و ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهند [۱۷]. مونتاهر^۸ در سال ۲۰۰۹ تقویت رس تثبیت‌شده با آهک و خاکستر پوسته‌ی برنج با مسلح نمودن آنها به الیاف ضایعات پلاستیکی را ارزیابی و گزارش نمود که تسلیح موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی، مدول سکانتی و شکل‌پذیری رس تثبیت‌شده می‌گردد [۱۸]. یین^۹ و یو ارتقاء ویژگی‌های برشی رس درمان شده با سیمان با افزودن الیاف شیشه را با بکارگیری آزمایش برش سه‌محوری^{۱۰} مورد بررسی قرار دادند. خروجی‌ها نشان دادند که مسلح‌سازی موجب افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری خاک سیمانته شده و محتوای وزنی الیاف و تنش محصورشدگی نقش مهمی در بهبود رفتار تنش-کرنش ایفاء می‌کنند [۱۹]. در سال ۲۰۱۲، لی^{۱۱} و همکاران به مطالعه‌ی تقویت رس تثبیت‌شده با آهک در اثر تسلیح با کاه گندم پرداخته و گزارش نمودند که افزودن کاه گندم دوام در برابر خوردگی، مقاومت کششی و شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشد [۲۰]. تقویت رس تثبیت‌شده با فوم سیلیکا با مسلح‌سازی با الیاف ضایعات تایر توسط کالکان^{۱۲} در سال ۲۰۱۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. تسلیح رس تثبیت‌شده، مقاومت برشی را بهبود بخشید و محتوای ۲ درصد الیاف به عنوان مقدار بهینه تعیین گردید [۲۱]. انگرانی^{۱۳} و همکاران رفتار خمشی رس سیلتی تثبیت‌شده با آهک در اثر افزودن الیاف نارگیل را با بکارگیری آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای^{۱۴} مطالعه و گزارش نمودند که تسلیح مقاومت خمشی و شکل‌پذیری را تقویت و دوام نمونه‌ها تا ۴۵ درصد افزایش داده است [۲۲].

8- Muntohar

9- Yin ana Yu

10- Triaxial shear test

11- Li

12- Kalkan

13- Anggraini

14- Three-point bending test

1- Cover

2- Lining

3- Landfill

4- Punthutaecha

5- Kumar

6- Unconfined compressive test

7- Split tensile test

تحکیم‌پذیری رس دریایی با آهک تثبیت‌شده در اثر مسلح‌سازی به الیاف نارگیل و پلی‌پروپیلن را با آزمایش یک‌بعدی تورم-تحکیم^{۲۳} بررسی نمودند. خروجی‌ها حاکی از کارایی بهتر الیاف نارگیل بود، به گونه‌ای که در محتوای وزنی ۱/۵ درصد این الیاف، پتانسیل تورم آزاد و فشار تورم به ترتیب ۸۶ و ۴۹ درصد کاهش یافتند [۲۹].

عبدی و همکاران در سال ۲۰۲۱ ارتقاء ویژگی‌های برشی رس با آهک درمان شده را با تسلیح با الیاف پلی‌پروپیلن و بکارگیری آزمایش‌های فشاری تک‌محوری^{۲۴} و سه‌محوری مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها نشان دادند که طول و محتوای الیاف، در کنار فشار محصورشدگی از عوامل کلیدی در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری می‌باشند [۳۰]. اوینو^{۲۵} و همکاران (۲۰۲۱) تقویت رفتار تحکیمی رس تثبیت‌شده با سیمان و خاکستر پوسته برنج در اثر افزودن الیاف بازالت^{۲۶} را مورد مطالعه قرار داده و گزارش نمودند که ۱ درصد وزنی الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر برای این منظور بهینه است [۳۱]. بهبود ویژگی‌های مقاومت فشاری و کششی رس تثبیت‌شده با نانورس با مسلح‌سازی آن به الیاف کاه برنج توسط عربانی^{۲۷} و همکاران ارزیابی گردید. خروجی‌ها افزایش ۱۴۰ درصدی مقاومت فشاری و ۳۰۰ درصدی مقاومت کششی را نشان دادند [۳۲]. هو^{۲۸} و همکاران تقویت خاک رس سیلتی تیمار شده با سیمان با تسلیح آن به الیاف آلژینات^{۲۹} را با بکارگیری آزمایش فشاری سه‌محوری بررسی و گزارش نمودند که طول الیاف ۹ میلی‌متر و مقدار وزنی ۰/۹ درصد، بیشترین کارایی را در افزایش خصوصیت‌های برشی دارد [۳۳]. در سال ۲۰۲۴، سلیمی و همکاران افزایش دوام رس تثبیت‌شده با آهک در اثر گنجاندن الیاف شیشه را با استفاده از آزمایش

در سال ۲۰۱۵، ییلماز^{۱۵} بهبود رفتار برشی و فشاری رس تثبیت‌شده با خاکستر بادی در اثر گنجاندن الیاف پلی‌پروپیلن را با استفاده از آزمایش‌های فشاری محصور نشده و برش محصور نشده^{۱۶} مورد بررسی قرار داد. نتایج بهبود تا دو برابری مقاومت‌ها را نشان دادند [۲۳]. ناگراله^{۱۷} و همکاران تقویت رس تثبیت‌شده با آهک و خاکستر بادی با مسلح‌سازی آنها به الیاف پلی‌پروپیلن را با بکارگیری آزمایش‌های سی. بی. آر^{۱۸} و فشاری محصور نشده مطالعه نمودند. خروجی‌ها نشان دادند که افزایش مقاومت رس درمان شده تحت تأثیر طول و محتوای الیاف قرار دارد [۲۴]. در سال ۲۰۱۶ عبدی و میرزایی‌فر ارتقاء خصوصیات مقاومتی رس درمان شده با سیمان در اثر تسلیح با الیاف پلی‌پروپیلن را بررسی نمودند. یافته‌ها نشان از افزایش کرنش در لحظه‌ی گسیختگی و مقاومت پسماند داشت [۲۵]. آیلدین^{۱۹} و کیتازومه در سال ۲۰۱۷ بهبود مقاومت فشاری رس درمان شده با سیمان در اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن را مورد ارزیابی، و افزایش مقاومت و شکل‌پذیری را گزارش نمودند [۲۶]. موثوکوار^{۲۰} و همکاران جهت بهبود رفتار تورم-انقباض رس تثبیت‌شده با آهک، تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن را ارزیابی و دریافتند که برای رس درمان شده، افزودن ۲ درصد وزنی الیاف بهینه‌ترین نتایج در کاهش تورم و انقباض را منتج می‌شود [۲۷]. تقویت مقاومت کششی و چقرمگی رس درمان شده با آهک ناشی از گنجاندن الیاف پلاستیک در سال ۲۰۱۹ توسط سابراذیپ^{۲۱} و مونوار با استفاده از آزمایش کششی دو نیم شدن مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها افزایش ۲۰ برابری مقاومت کششی را نشان دادند [۲۸]. جایاوردان^{۲۲} و همکاران بهبود رفتار تورمی و

23- Swelling-Consolidation Test

24- Uniaxial Compression Test

25- Owino

26- Basalt

27- Arabani

28- Hu

29- Alginate

15- Yilmaz

16- Unconfined shear test

17- Nagrale

18- California Bearing Ratio Test

19- Ayeldeen and Kitazume

20- Muthukumar

21- Subhadeep and Monowar

22- Jayawardane

اختلاط با خاک را تسهیل می‌تواند. الیاف مرکب ساختار دو بخشی دارند: هسته‌ای از لیف‌الاستان با خاصیت کشسانی بالا و پوسته‌ای از الیاف پلی‌استر که به صورت ماریچی به دور هسته پیچیده شده‌اند. در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد این الیاف در بهبود مقاومت و شکل‌پذیری خمشی، از خاک رس کائولینیت به عنوان ماده‌ی پایه، آهک با درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵ برای تثبیت، الیاف مرکب با محتواهای وزنی ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد و طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر جهت تسلیح، و دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه به منظور عمل‌آوری نمونه‌ها استفاده شده است. ارزیابی‌های کمی و کیفی نیز به ترتیب با آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، و میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی انجام شده‌اند.

۲- مصالح

۲-۱- خاک

با توجه به بیشتر بودن ناخالصی در رس‌های طبیعی که می‌توانست تکرارپذیری نتایج را تحت تأثیر قرار بدهد [۴۱-۳۸]، در این مطالعه از رس کائولینیت معدنی عرضه شده توسط شرکت صنایع خاک چینی ایران که ویژگی‌های فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه گردیده، استفاده شده است. این خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد^{۳۴}، در گروه رس با خاصیت خمیری کم (CL) کلاس‌بندی می‌گردد. در ادامه جهت اختصار، در جدول‌ها و شکل‌ها کائولینیت با حرف K نمایش داده شده است.

۲-۲- آهک

با توجه به کاربرد بیشتر تثبیت‌کننده‌های سنتی در پروژه‌های میدانی [۴۲-۴۵]، در این تحقیق، از آهک عرضه شده توسط کارخانه آهک سمنان جهت تثبیت نمونه‌ها استفاده شده است. پس از خریداری، آهک

فشاری محصور نشده ارزیابی و بیان نمودند که ۰/۷۵ درصد وزنی الیاف منجر به بیشترین دوام در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب می‌شود [۳۴]. بالدینو^{۳۰} و همکاران بهبود ویژگی‌های مقاومتی رس تثبیت‌شده با صمغ زانتان^{۳۱} ناشی از تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن را با بکارگیری آزمایش فشاری محصور نشده بررسی و دریافتند که تسلیح موجب افزایش مقاومت فشاری تا ۵۴ درصد می‌شود [۳۵]. ونکاتسوارلو^{۳۲} و همکاران در سال ۲۰۲۵ اثربخشی الیاف پلی‌استر در بهبود مشخصات مقاومتی رس تثبیت‌شده با آهک را با بکارگیری آزمایش فشاری محصور نشده مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار وزنی بهینه‌ی الیاف ۱ درصد بوده و شاخص شکل‌پذیری را تا ۸۵ درصد افزایش داده است [۳۶]. لو^{۳۳} و همکاران بهبود خصوصیت‌های کششی رس با سیمان تثبیت‌شده را با مسلح‌سازی به الیاف کاه مطالعه نمودند. خروجی‌ها نشان دادند که محتواهای وزنی ۰/۲ تا ۰/۶ درصد و طول‌های ۵ تا ۱۰ میلی‌متر الیاف بیشترین بازدهی در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری را دارند [۳۷]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد تاکنون انواع مختلفی از الیاف برای تقویت مقاومت و بهبود شکل‌پذیری خاک‌های تثبیت‌شده پیشنهاد و کارایی آنها بررسی شده است. با این حال، تهیه این الیاف هزینه‌بر بوده و به دلیل ابعاد کوچک اختلاط دشواری با خاک دارند. بر همین اساس، هدف این پژوهش معرفی نوع جدیدی از مسلح‌کننده به نام الیاف مرکب برای بهبود خصوصیت‌های خمشی خاک رسی تثبیت‌شده می‌باشد. این الیاف از ضایعات صنایع پوشاک بوده، بدون هزینه قابل تأمین می‌باشند و به عنوان گزینه‌ای دوست‌دار محیط‌زیست، قابلیت استفاده مجدد در تسلیح خاک‌ها را دارند. افزون بر این، ابعاد بزرگ‌تر آن‌ها نسبت به الیاف رایج، فرآیند

30- Baldovino

31- Xanthan

32- Venkateswarlu

33- Luo

34- Unified Soil Classification System (USCS)

بالافاصله الک و جهت جلوگیری از واکنش آن با رطوبت هوا، در کیسه‌های زیپ‌دار نگهداری شده است.

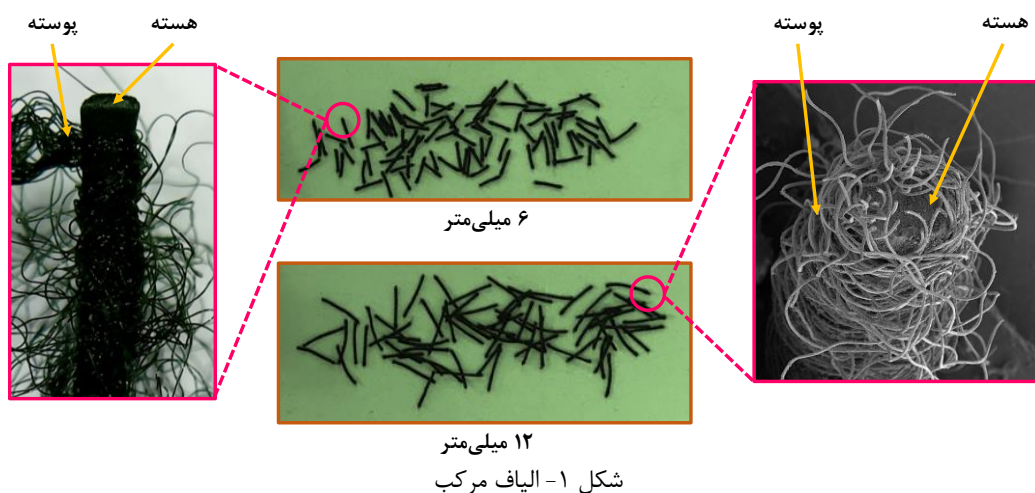
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی کائولینیت

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

۳-۲- الیاف مرکب

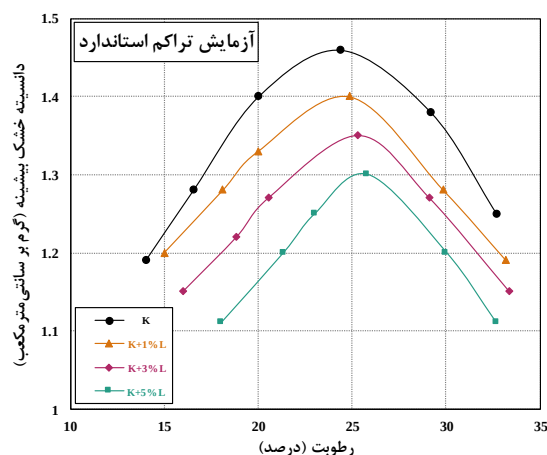
در شکل ۱ و جدول ۲ به ترتیب تصاویر و ویژگی‌های فیزیکی الیاف مرکب ارائه شده است. هسته الیاف مرکب یک لیف استان با خاصیت کشسان بالا و پوسته آن متشکل از الیاف پلی‌استر است که به دور هسته استان پیچیده شده‌اند.

با توجه به آن که تحقیق‌های پیشین نشان داده‌اند که در اکثر موارد ۳ تا ۵ درصد وزنی آهک بهینه‌ترین محتوا برای تثبیت رس‌ها است [۳۰ و ۴۶-۵۰]، در بررسی حاضر از مقدارهای وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد آهک جهت آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. در ادامه جهت اختصار، در جدول‌ها و شکل‌ها آهک با حرف L نمایش داده شده است.



براساس استاندارد ASTM C1609/C1609M-12، طول الیاف آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای می‌بایست حداقل برابر با یک سوم عرض نمونه‌ها باشد [۵۱]. به همین دلیل در این مطالعه طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر برای الیاف مرکب انتخاب شده‌اند. با توجه به آن که محتواهای وزنی بزرگتر از ۳/۵ درصد الیاف مرکب موجب تجمع‌های موضعی در نمونه‌ها می‌شد، در مطالعه حاضر

ترکیب پلیمری اجزای سازنده الیاف مرکب (الاستان و پلی‌استر) موجب مقاومت بالا در برابر شرایط مخرب محیطی همچون رطوبت، تغییرات دما و عوامل شیمیایی موجود در خاک شده، و عملکرد پایدار و بلندمدت آن‌ها را در محیط خاک تضمین می‌نماید. به این ترتیب، خواص مکانیکی الیاف مرکب در طول زمان حفظ شده و کیفیت تسلیح خاک بدون افت باقی می‌ماند.



شکل ۲- نمودارهای تراکم کائولینیت و کائولینیت-آهک

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های تراکم

ترکیب	دانسیتة 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

۴- آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا مصالح با توجه به دانسیته خشک بیشینه و رطوبت بهینه (شکل ۲ و جدول ۳)، ابعاد قالب آزمایش (۱۶×۴×۴ cm) و محتواهای وزنی آهک (۱، ۳ و ۵ درصد) و الیاف مرکب (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) توزین شدند. پس از آن، کائولینیت، آهک و الیاف مرکب وزن شده در یک سینی فلزی ریخته (شکل ۳ الف)) و به مدت ۲ دقیقه به صورت دستی مخلوط گردیدند. سپس، اختلاط مجدد مواد به مدت ۱۰ دقیقه توسط همزن برقی انجام شد. پس از اتمام اختلاط مرحله دوم، مواد بر روی سینی فلزی ریخته و آب به آرامی به مخلوط اسپری شد، در همین حین ترکیب به طور مداوم به صورت دستی توسط کاردک مخلوط می‌شد. در مرحله بعد، مخلوط درون قالب خمشی از قبل روغن‌کاری شده که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب برابر با ۱۶، ۴ و ۴ سانتی‌متر بود، ریخته و قالب‌گیری مشابه با سایر پژوهش‌ها با استفاده از یک جک هیدرولیکی به صورت استاتیکی انجام پذیرفت (شکل ۳ ب)) [۶۵-۶۲].

مقدارهای وزنی ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد برای الیاف مرکب انتخاب شده‌اند. در ادامه جهت اختصار، در جدول‌ها و شکل‌ها، الیاف مرکب با حرف C نمایش داده شده است.

جدول ۲- خصوصیت‌های فیزیکی الیاف مرکب

مقدار	خصوصیت
۸۰۰-۹۵۰	قطر (میکرومتر)
۰/۸۵	دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱۲-۱۴	حداکثر نیرو کششی (نیوتن)

۳- آزمایش تراکم استاندارد

به منظور تعیین دانسیته خشک بیشینه و رطوبت بهینه که برای آماده‌سازی نمونه‌های خمشی لازم بودند، آزمایش‌های تراکم پروکتور استاندارد مطابق دستورالعمل ASTM D698-12R2، بر روی کائولینیت و مخلوط‌های کائولینیت-آهک انجام پذیرفت [۵۲]. عدم انجام آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های مسلح به این خاطر بود که پژوهش‌های گذشته نشان داده بودند که تسلیح با الیاف تأثیری بر خصوصیت‌های تراکمی ندارد [۳۰، ۳۸، ۵۳-۵۵]. در شکل ۲ و جدول ۳، نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد کائولینیت و مخلوط‌های کائولینیت-آهک ارائه گردیده است. افزودن ماده‌های تثبیت‌کننده به خاک‌های رسی باعث ایجاد واکنش‌های شیمیایی و تولید فرآورده‌های اولیه و ثانویه می‌گردد [۳۰ و ۵۸-۵۶]. ارتباط عکس دانسیته خشک بیشینه با محتوای آهک که از نتایج ارائه شده در شکل ۲ و جدول ۳ مشاهده می‌گردد، به دلیل تولید محصول‌های اولیه واکنش شیمیایی آهک با کائولینیت در سطوح ذرات رس بوده که افزایش پوکی و تخلخل مخلوط را موجب می‌شود [۳۰ و ۵۸-۵۶]. از سوی دیگر، ارتباط مستقیم رطوبت بهینه با درصد وزنی آهک (شکل ۲ و جدول ۳) به دلیل مصرف بخشی از آب مخلوط در واکنش‌های شیمیایی و همچنین نیاز به آب بیشتر جهت پر نمودن حفره‌های ایجاد شده در اثر تولید فرآورده‌های اولیه واکنش شیمیایی آهک با کائولینیت می‌باشد [۳۰ و ۶۱-۵۹].



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها؛ (الف) اختلاط مواد، (ب) قالب‌گیری، (ج) نمونه قالب‌گیری شده، و (د) نمونه از قالب خارج شده.

نیروی کششی الیاف بسیار سودمند و مفید می‌باشد. به همین خاطر، در این مطالعه از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای جهت بررسی عملکرد الیاف مرکب در بهبود ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل کائولینیت تثبیت‌شده استفاده شده است.

پس پایان یافتن دوره‌های عمل‌آوری، نمونه‌ها با استفاده از یک تیر ساده با بارگذاری مرکزی، مطابق استاندارد ASTM C1609/C1609M-12 تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. نرخ بارگذاری مجاز طبق این استاندارد می‌بایست $0.06-0.24$ میلی‌متر بر دقیقه باشد [۵۱]. به همین خاطر، در این بررسی مشابه پژوهش‌های گذشته، بارگذاری نمونه‌ها با سرعت 0.1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است [۶۹-۷۲]. در شکل ۴ تصویر دستگاه آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمایش داده شده است.

پس از قالب‌گیری (شکل ۳ ج)، نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند (شکل ۳ د) و جهت جلوگیری از تبخیر رطوبتشان، چندین لایه سلفون به دور آن‌ها پیچیده شد. در انتها، نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۸ روز درون جعبه‌ی یونولیتی در محیط آزمایشگاه (۲۰ الی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) مشابه با سایر پژوهش‌ها عمل‌آوری شدند [۶۶-۶۸].

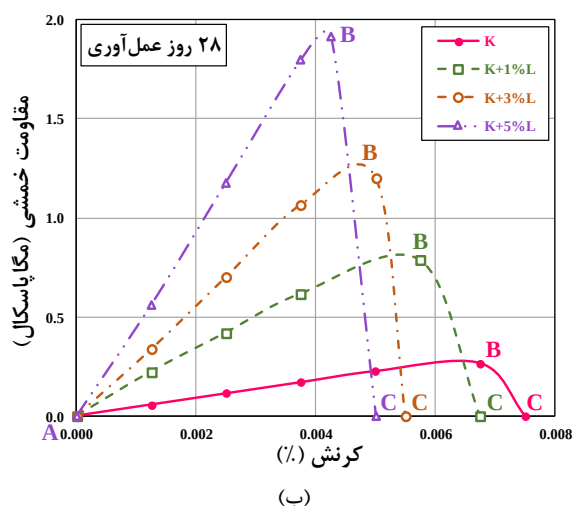
۵- آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

با توجه به آن که در حین آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه تحت خمش قرار می‌گیرد، قسمت‌های فوقانی و تحتانی آن به طور همزمان به ترتیب تنش‌های فشاری و کششی را تجربه می‌کنند. از این رو، به دلیل اعمال همزمان تنش‌های فشاری و کششی به نمونه، این آزمایش جهت بررسی اندرکنش خاک-الیاف و بسیج شدن

۷- بحث و بررسی نتایج

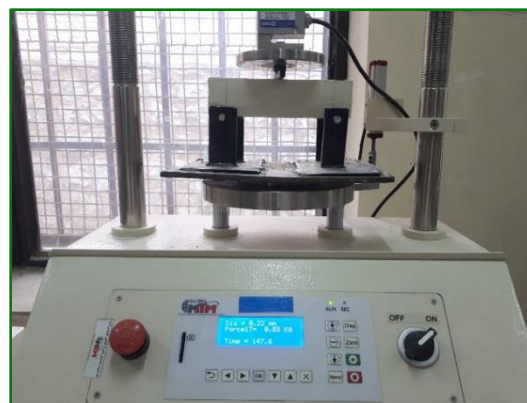
۷-۱- کائولینیت غیرمسلح تثبیت‌نشده و شده با آهک

شکل ۵، نمودارهای مقاومت خمشی-کرنش نمونه‌های تثبیت‌نشده و شده با آهک برای هر دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه را ارائه می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که منحنی‌های مقاومت خمشی-کرنش کائولینیت غیرمسلح صرف نظر از محتوای آهک و دوره عمل‌آوری، به دو بخش اصلی A-B و B-C تقسیم می‌شوند. در بخش A-B، با افزایش کرنش، مقاومت خمشی افزایش یافته ولی هیچ ترکی در نمونه مشاهده نمی‌گردد (شکل ۶ الف)). در نزدیکی نقطه B، ترک‌ریزی در قسمت تحتانی نمونه‌ها در زیر خط بارگذاری مشاهده می‌شد که به سرعت رشد نموده و نمونه را به طور ناگهانی به دو قسمت مجزا تقسیم می‌نمود (شکل ۶ ب)). به همین خاطر، در بخش B-C مقاومت خمشی به سرعت کاهش و برابر با صفر می‌شد.



شکل ۵- نمودار مقاومت خمشی-کرنش کائولینیت تثبیت‌نشده و شده با آهک؛ الف) عمل‌آوری ۷ روزه، و ب) عمل‌آوری ۲۸ روزه.

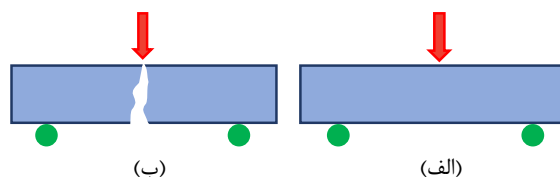
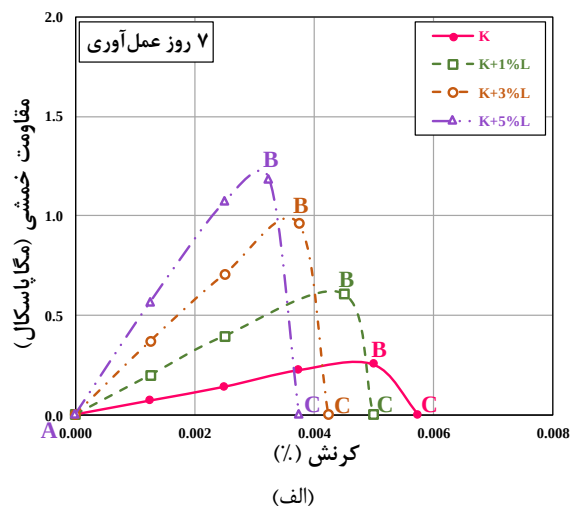
شکل ۵ نشان می‌دهد که در نمونه‌های تثبیت‌نشده، به دلیل عدم حضور آهک و به دنبال آن انجام نشدن واکنش‌های شیمیایی، مقاومت خمشی تحت تاثیر زمان عمل‌آوری قرار نگرفته است. از شکل ۵ مشاهده می‌گردد که مقاومت خمشی نمونه‌های تیمار شده با آهک به شدت تحت تأثیر محتوای آهک قرار گرفته است. به عنوان مثال،



شکل ۴- دستگاه آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

۶- میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی

به منظور بررسی کیفی اندرکنش الیاف مرکب با کائولینیت درمان نشده و تثبیت‌شده با آهک، میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدین منظور، پس از اتمام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، قطعه‌های کوچکی با ابعاد حدودی $20 \times 20 \times 20$ میلی‌متر از صفحه گسیختگی نمونه‌ها اخذ و از سطوح آن‌ها تصویربرداری شده است.



شکل ۶- تصویر شماتیک نمونه‌ها در دو بخش اصلی نمودارهای مقاومت خمشی-کرنش؛ الف) A-B، و ب) B-C.

رشد آهسته ترک به دلیل پدیده پلزدگی (شکل ۸) بود که الیاف با ایجاد پلهایی دو سمت ترک را به یکدیگر می‌دوختند و رشد آن را محدود می‌نمودند. در نزدیکی نقطه B رشد ترک به طور تقریبی کامل می‌شد که این پدیده هم موجب از بین رفتن مقاومت فشاری قسمت بالایی نمونه و در مجموع کاهش مقاومت خمشی آن می‌گشت، و هم باعث بیرون کشیده شدن الیاف قسمت زیرین نمونه از طرفین سطح گسیختگی می‌شد. بیرون کشیده شدن الیاف قسمت زیرین نمونه نیز موجب می‌شد که آنها دیگر در تحمل تنش کششی مشارکتی ننموده و نیروی کششی بسیج شده در آنها به الیاف بالاتر منتقل گردد. به همین خاطر در ناحیه B-C مقاومت خمشی نمونه‌ها به طور ناگهانی کاهش می‌یافت. فعال شدن الیاف موجود در قسمت‌های بالاتر نمونه که هنوز به دو طرف سطح گسیختگی (ترک) متصل بودند باعث می‌شد که مقاومت خمشی نمونه در بخش C-D به طور کامل از بین نرفته و تقریباً ثابت باقی بماند. با ادامه روند بیرون کشیده شدن الیاف در قسمت‌های بالاتر نمونه، مقاومت خمشی در نهایت برابر با صفر می‌شد. به منظور جلوگیری از کوچک شدن شکل ۷ و متعاقباً نامفهوم گشتن آن، نمودارها تا کرنش ۰/۰۴ درصد ترسیم شده‌اند.

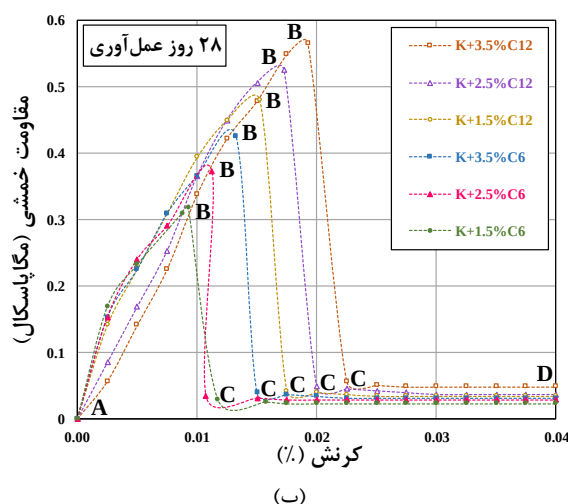
شکل ۷ نشان می‌دهد که زمان عمل‌آوری اثر بسیار ناچیزی روی مقاومت خمشی نمونه‌ها داشته که به دلیل عدم انجام واکنش‌های پوزولانی و تولید نشدن ترکیبات کریستالی می‌باشد. از شکل ۷ مشاهده می‌گردد که مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها تحت تأثیر طول و محتوای الیاف مرکب قرار گرفته است. با ازدیاد طول الیاف مرکب از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها بسته به محتوای الیاف مرکب به ترتیب ۳۳ الی ۵۲ درصد و ۴۵ الی ۶۹ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه، با افزایش مقدار الیاف مرکب از ۱/۵ درصد به ۲/۵ و ۳/۵ درصد نیز مقاومت خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۱۷-۹ و ۳۵-۱۸ درصد، و شکل‌پذیری

با افزایش مقدار آهک از صفر به ۱، ۳ و ۵ درصد، مقاومت خمشی برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه به ترتیب ۲/۴، ۳/۸ و ۴/۷ برابر و برای عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب ۳، ۴/۶ و ۷/۳ برابر شده است. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش محتوای آهک، شکل‌پذیری نمونه‌ها به شدت کاهش یافته است. به طوری که با افزایش مقدار آهک از صفر به ۱، ۳ و ۵ درصد، نمونه‌های با ۷ روز عمل‌آوری به ترتیب ۴، ۲۶ و ۴۴ درصد و نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب ۱۴، ۳۱ و ۴۸ تردتر شده‌اند. علاوه بر آن، شکل ۵ رابطه مستقیم زمان عمل‌آوری با مقاومت خمشی کائولینیت تثبیت‌شده را نشان می‌دهد. با حفظ مقادیر آهک و فقط با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت خمشی نمونه‌ها ۲۶ الی ۶۳ درصد بهبود یافته است. با افزایش مقدار آهک و زمان عمل‌آوری، کمیت و کیفیت واکنش‌های پوزولانی افزایش یافته و محصولات ثانویه بیشتری نظیر آلومینات کلسیم (C-A-H) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) تشکیل می‌گردند. این فرآورده‌های کریستالی فضای خالی بین ذرات کائولینیت را پر نموده و با متراکم نمودن بافت نمونه‌ها موجب افزایش مقاومتشان می‌شوند [۹، ۲۵، ۳۰، ۶۷ و ۶۸].

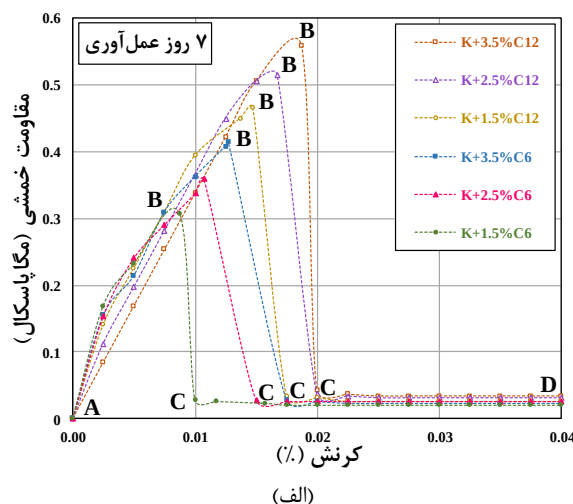
۷-۲- کائولینیت تثبیت‌نشده مسلح به الیاف مرکب

شکل ۷ نمودارهای مقاومت خمشی-کرنش نمونه‌های تثبیت‌نشده مسلح به الیاف مرکب را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ نشان می‌دهد که تسلیح نمونه‌ها به الیاف مرکب موجب تغییر روند منحنی‌های مقاومت خمشی-کرنش شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که منحنی‌های مقاومت خمشی-کرنش نمونه‌های مسلح به سه بخش اصلی A-B، B-C و C-D تقسیم می‌شوند. در این نمونه‌ها، در بخش A-B با افزایش کرنش، مقاومت خمشی افزایش یافته و به طور تقریبی در اواسط این بخش ترکی ریزی در قسمت زیرین نمونه‌ها در زیر خط بارگذاری مشاهده می‌شد که به طور آهسته رشد می‌نمود.

است.



آنها نیز به ترتیب ۲۳-۱۳ و ۴۶-۲۶ درصد افزایش یافته



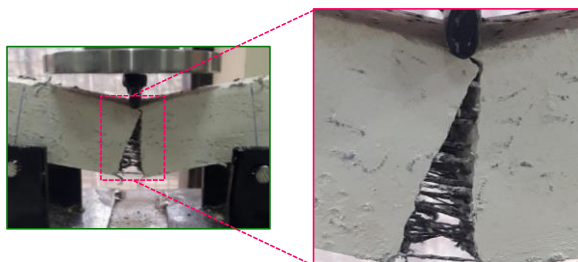
شکل ۷- نمودار مقاومت خمشی- کرنش کائولینیت تسلیح‌شده؛ الف) عمل‌آوری ۷ روزه، و ب) عمل‌آوری ۲۸ روزه.

این نمونه مشابه با نمونه‌های تثبیت‌نشده مسلح بوده و نمودارهای مقاومت خمشی-کرنش آنها به سه بخش اصلی A-B، C-D و تقسیم می‌شوند. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که مقاومت و شکل‌پذیری خمشی نمونه‌ها تحت تأثیر مقدار وزنی الیاف مرکب قرار گرفته است. با افزایش محتوای وزنی الیاف مرکب از ۱/۵ درصد به ۲/۵ و سپس ۳/۵ درصد و ثابت نگه داشتن سایر عوامل، مقاومت خمشی بسته به زمان عمل‌آوری، مقدار وزنی آهک و دوره عمل‌آوری به ترتیب ۱۷-۳ درصد و ۳۵-۶ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه، کرنش در مقاومت خمشی بیشینه نیز به ترتیب ۲۳-۳ و ۴۶-۵ درصد بهبود را نشان می‌دهد. ارتباط مستقیم محتوای الیاف مرکب با مقاومت و شکل‌پذیری خمشی به دلیل افزایش تعداد پل‌ها و جبران بیشتر ضعف کششی نمونه‌ها می‌باشد.

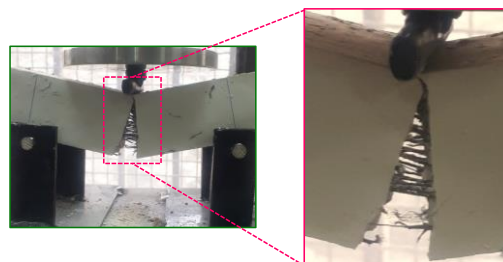
ارتباط مستقیم طول الیاف مرکب با مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها به دلیل افزایش طول باند الیاف در هر دو سطح گسیختگی و به دنبال آن افزایش نیروی لازم جهت بیرون کشیده شدن آنها است. مقایسه شکل ۸ (الف) با شکل ۸ (ب) نیز نشان می‌دهد که افزایش مقاومت و شکل‌پذیری خمشی در اثر افزایش محتوای الیاف مرکب به دلیل بیشتر شدن تعداد پل‌های ایجاد شده توسط آنها در دو طرف ترک بوده که با بسیج نمودن نیروی کششی خود، نبود مقاومت کششی خاک را جبران و مقاومت خمشی نمونه را بهبود بخشیده‌اند.

۷-۳- کائولینیت تثبیت و تسلیح‌شده

شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای مقاومت خمشی-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و مسلح به الیاف مرکب را ارائه می‌دهند. مشاهده می‌گردد که رفتار خمشی

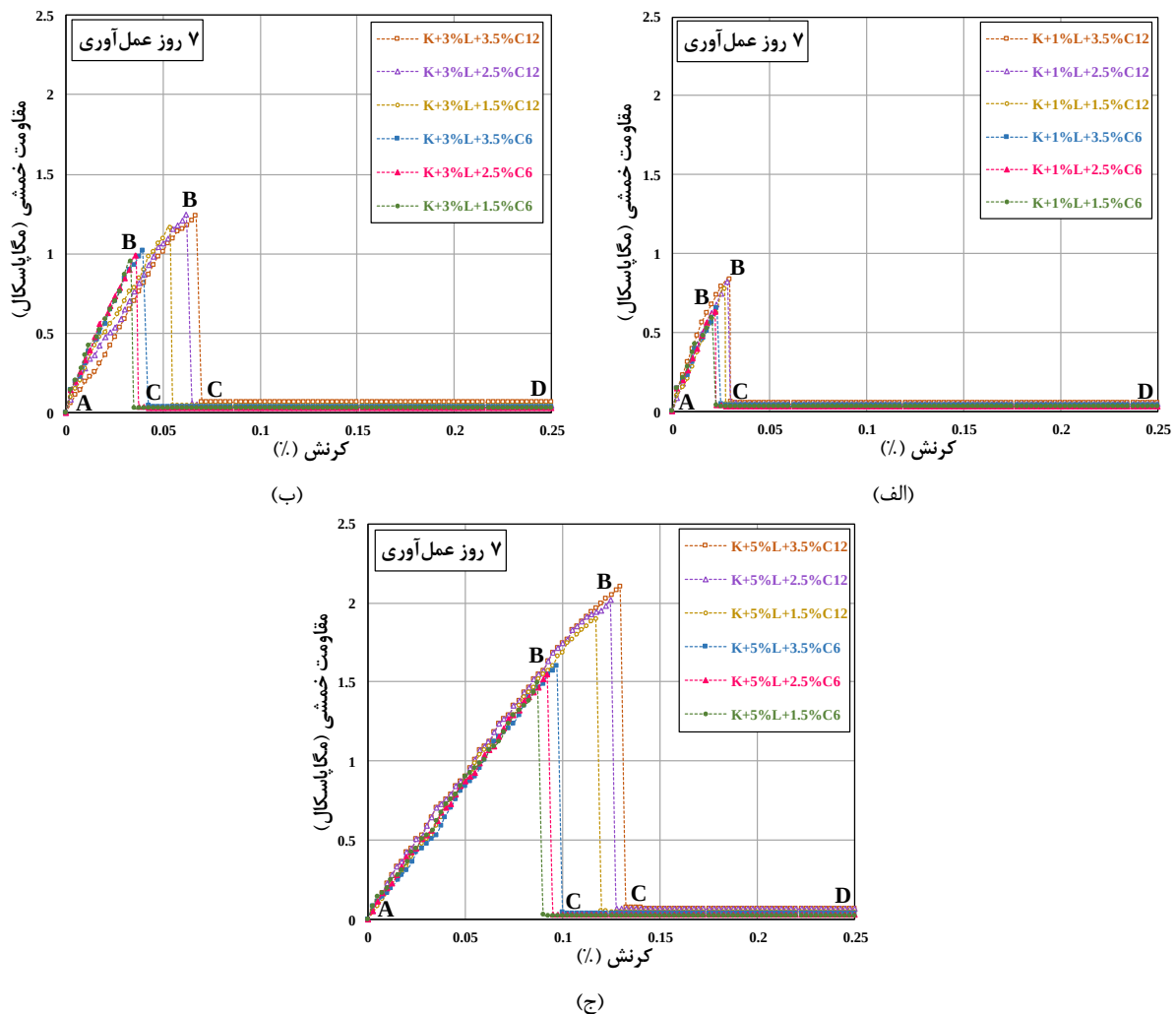


(ب)



(الف)

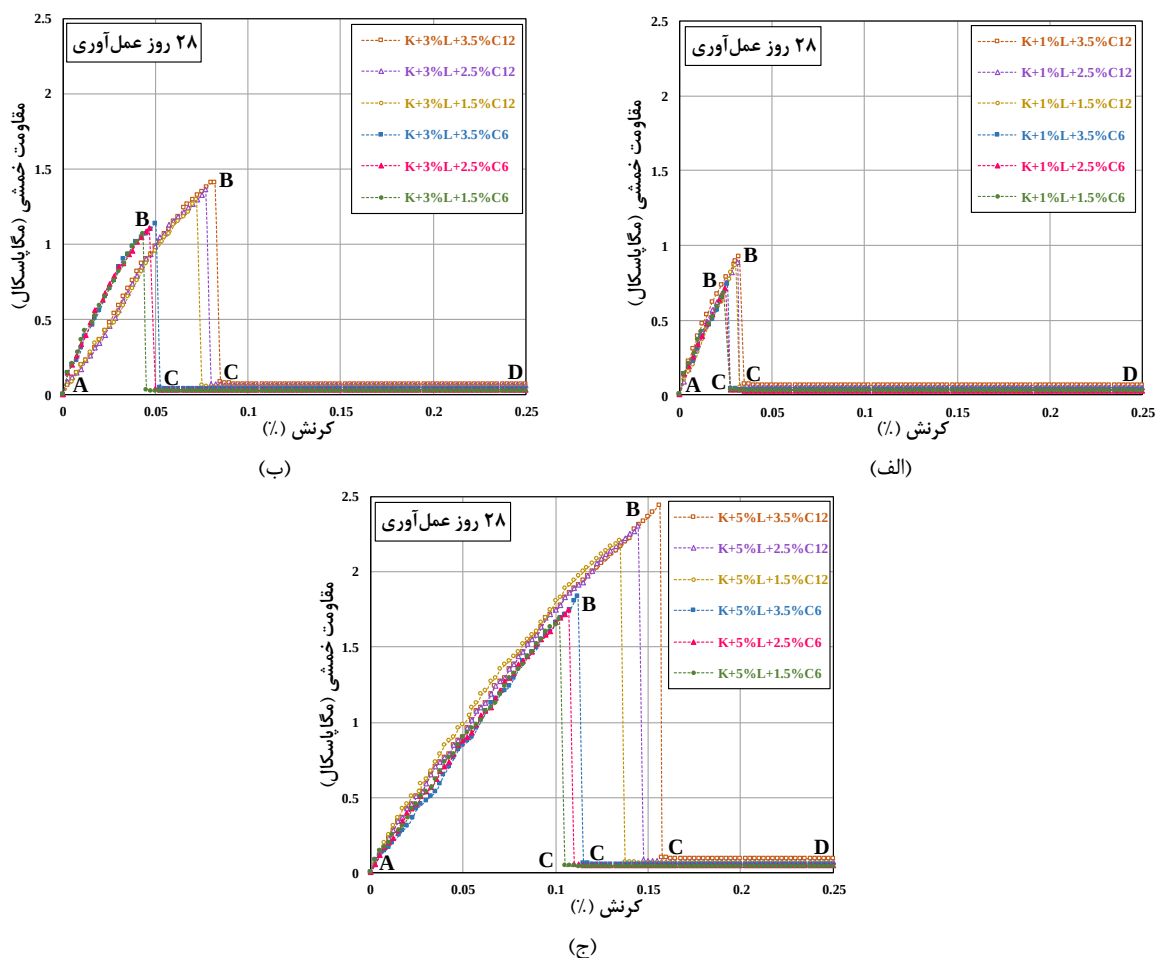
شکل ۸- پدیده پل‌زدگی نمونه‌های با محتوای متفاوت الیاف مرکب؛ الف) محتوای وزنی ۱/۵ درصد، و ب) محتوای وزنی ۳/۵ درصد.



شکل ۹- نمودار مقاومت خمشی-کرنش کائولینیت تثبیت و تسلیح شده با دوره عمل‌آوری ۷ روزه؛ (الف) ۱ درصد آهک، (ب) ۳ درصد آهک، و (ج) ۵ درصد آهک.

محتوای وزنی آهک از ۱ به ۳ و ۵ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها را به ترتیب ۶۱-۴۹ و ۱۶۵-۱۴۶ درصد و کرنش متناظر با آن را نیز به ترتیب ۱۵۴-۶۴ و ۴۸۴-۴۲۳ درصد بسته به سایر عوامل (طول و محتوای الیاف مرکب و همچنین دوره عمل‌آوری) ارتقا داده است. مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که مقاومت و شکل‌پذیری خمشی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده متأثر از زمان عمل‌آوری است. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز و ثابت نگه داشتن سایر عوامل، مقاومت خمشی و کرنش متناظر با آن بسته به محتوای وزنی آهک و همچنین مقدار وزنی و طول الیاف مرکب، به ترتیب ۱۶-۹ و ۳۵-۱۰ بهبود یافته است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ همچنین نشان می‌دهند که مقاومت و شکل‌پذیری خمشی نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده تحت الشعاع طول الیاف مرکب قرار گرفته‌اند. با ثابت نگه داشتن تمامی عوامل و فقط افزایش طول الیاف مرکب از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، مقاومت خمشی و کرنش متناظر با آن بسته به محتوای وزنی الیاف و آهک و همچنین دوره عمل‌آوری به ترتیب ۵۲-۲۲ و ۷۲-۲۵ درصد تقویت شده‌اند. این ارتباط‌های مستقیم ناشی از بیشتر شدن طول گیرداری الیاف مرکب و متعاقباً افزایش نیروی بیرون‌کشیدگی لازم است. علاوه بر آن، از شکل‌های ۹ و ۱۰ ارتباط مستقیم مقدار وزنی آهک با مقاومت و شکل‌پذیری خمشی مشاهده می‌گردد. افزایش



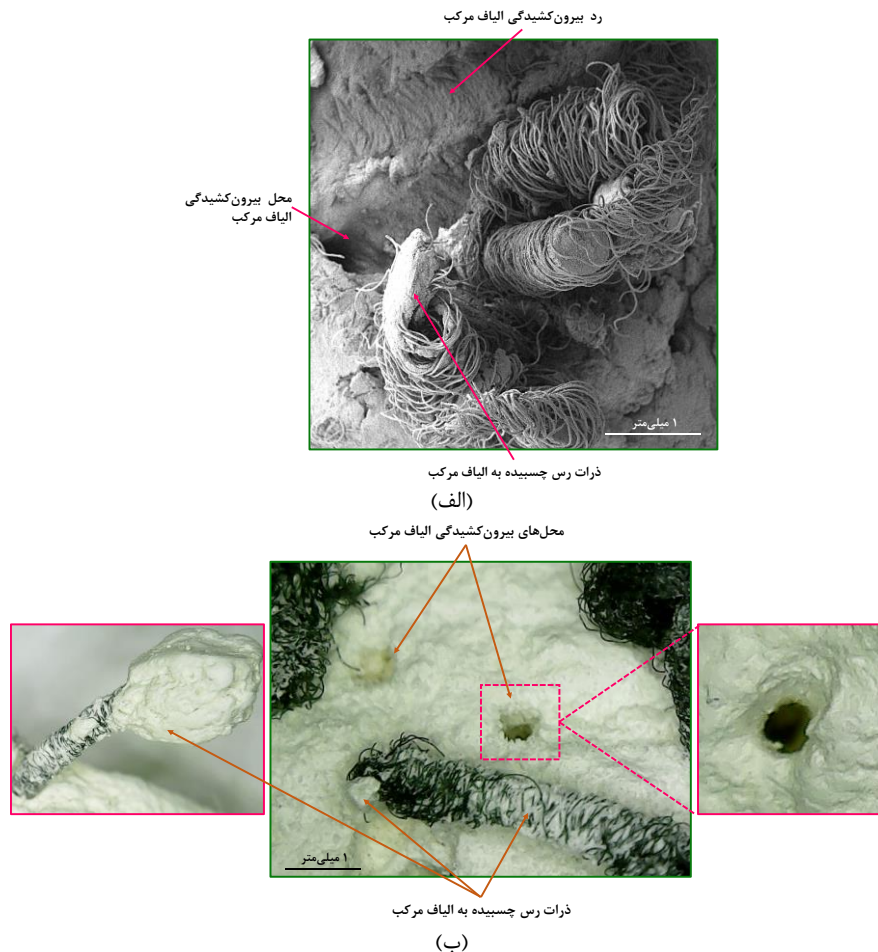
شکل ۱۰- نمودار مقاومت خمشی-کرنش کائولینیت تثبیت و تسلیح‌شده با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه؛ الف) ۱ درصد آهک، ب) ۳ درصد آهک، و ج) ۵ درصد آهک

برخی از موارد توانسته است قطعه بسیار کوچکی از خاک طرف دیگر ترک را جدا نماید. این مشاهدات نشانگر اندرکنش بالای الیاف مرکب با خاک بوده و گواهی بر عملکرد مناسب آن می‌باشند.

شکل ۱۱ (ب) نیز اثرات بیرون کشیده شدن الیاف مرکب از کائولینیت تثبیت‌شده با ۵ درصد وزنی آهک را نشان می‌دهد. در این شکل نیز به وضوح مشاهده می‌گردد که ساختار مرکب الیاف نقش کلیدی در اندرکنش با خاک تثبیت‌شده پیرامون داشته است، به گونه‌ای که هم رد پوسته الیاف مرکب بر خاک مجاور حک گردیده و هم خاک در بین الیاف پلی‌استر پوسته محبوس و جدا شده است. این مشاهدات بیانگر اندرکنش بالای الیاف مرکب با کائولینیت تثبیت‌شده بوده و عملکرد بالای آن در بهبود ویژگی‌های خمشی رس تثبیت‌شده را نشان می‌دهد.

۷-۴- آنالیزهای میکروسکوپی

در شکل ۱۱ تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و نوری از سطوح نمونه‌های مسلح تثبیت‌شده و نشده ارائه شده است. در شکل ۱۱ (الف) آثار بیرون کشیدگی الیاف مرکب از کائولینیت تثبیت‌نشده قابل مشاهده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که ساختار دو بخشی الیاف مرکب به خصوص پوسته پلی‌استری پیچیده شده به دور هسته الاستان، به دلیل تعداد بالا و عمود بودن بر راستای کشش، اندرکنش مکانیکی مناسبی با خاک ایجاد نموده و در برابر بیرون کشیدگی به خوبی مقاومت نموده است. علاوه بر آن مشاهده می‌گردد که میزان اندرکنش پوسته پلی‌استری با خاک کائولینیت اطراف، به حدی بالا بوده که هم رد آن در محل‌های بیرون کشیدگی حک شده است و هم در



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نوری نمونه‌های مسلح: الف) تثبیت‌نشده، و ب) تثبیت‌شده با ۵ درصد وزنی آهک

نمونه‌های مسلح تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های مسلح تثبیت‌نشده را اثبات می‌نماید.

۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مسلح‌کننده جدیدی به نام الیاف مرکب که از ضایعات صنایع پوشاک است، جهت تقویت خصوصیت‌های مقاومتی و تغییر شکل خمشی کائولینیت تثبیت‌شده و نشده معرفی و عملکرد آن بررسی شده است. هسته‌ی الیاف مرکب یک لیف الاستان با خاصیت کشسان بالا و پوسته‌ی آن متشکل از الیاف پلی‌استر است که به دور هسته‌ی الاستان پیچیده شده‌اند. در این راستا، در این بررسی از یک رس کائولینیت، آهک با مقادیر وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد، محتواهای وزنی ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد الیاف مرکب با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر برای آماده‌سازی و دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه جهت عمل‌آوری نمونه‌ها استفاده

علاوه بر آن، با مقایسه شکل ۱۱ الف) با شکل ۱۱ ب) مشاهده می‌گردد که تعداد و ابعاد قطعه‌های جدا شده از طرف مقابل سطح گسیختگی که به الیاف مرکب چسبیده‌اند، در نمونه تثبیت‌شده به مراتب بیشتر و بزرگ‌تر است. این مشاهده نشان‌دهنده اندرکنش بهتر الیاف مرکب با کائولینیت تثبیت‌شده با آهک نسبت به کائولینیت درمان نشده است. فرآورده‌های حاصل از واکنش شیمیایی کائولینیت با آهک با پر نمودن فضای خالی بین ذرات رس، افزایش تراکم بافت نمونه و به دنبال آن بیشتر شدن اصطکاک الیاف مرکب با خاک پیرامون را موجب شده‌اند. فزونی اندرکنش نیز با به دام انداختن هرچه بهتر الیاف، از جابجایی آن جلوگیری نموده و باعث افزایش نیروی بیرون‌کشیدگی لازم و متعاقباً تقویت پدیده‌ی پل‌زدگی شده است. بنابراین، این مشاهده بزرگ‌تر بودن مقاومت خمشی و شکل‌پذیری بیشتر

۳- آنالیزهای کیفی انجام شده با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی با ارائه‌ی مستندات نظیر حک شدن رد پوسته‌ی الیاف مرکب بر روی کائولینیت تثبیت‌شده و نشده، جدا شدن تکه‌های از خاک تثبیت‌شده و نشده‌ی طرف دیگر سطح گسیختگی توسط الیاف مرکب، اندرکنش بالای این الیاف با خاک پیرامون را اثبات می‌نماید.

۴- نتایج این بررسی محدود به یک نوع رس کائولینیت، یک افزودنی شیمیایی (آهک) با درصدهای وزنی مشخص، یک نوع بارگذاری استاتیکی و شرایط خاص آماده‌سازی، عمل‌آوری و آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌ها است. بنابراین، انجام مطالعات تکمیلی برای ارزیابی عملکرد الیاف مرکب در بهبود سایر ویژگی‌های مقاومتی و شکل‌پذیری - شامل مقاومت فشاری، کششی و برشی - با بکارگیری انواع دیگر خاک‌های معدنی و طبیعی، افزودنی‌هایی مانند سیمان، خاکستر بادی، سرباره و ژئوپلیمر، بارگذاری‌های ضربه‌ای و دینامیکی و شرایط عمل‌آوری شامل چرخه‌های ذوب-یخبندان و تر-خشک‌شدگی توصیه می‌گردد.

شده است. برای انجام بررسی‌ها نیز آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی بکارگیری شده‌اند. نتایج کلیدی مطالعه به شرح زیر است:

۱- تسلیح با الیاف مرکب موجب بهبود چشمگیر مقاومت و شکل‌پذیری خمشی کائولینیت تثبیت‌نشده می‌گردد. علاوه بر آن، بهبود این مشخصه‌ها با طول و محتوای الیاف مرکب رابطه‌ی مستقیمی دارند. به عنوان مثال، نمونه‌های مسلح‌شده به $\frac{3}{5}$ درصد وزنی الیاف مرکب ۱۲ میلی‌متری، افزایش ۱۷۰ درصدی شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ی غیرمسلح تثبیت‌نشده را نشان داده است.

۲- الیاف مرکب کارایی بالایی در بهبود مقاومت و شکل‌پذیری خمشی کائولینیت تثبیت‌شده دارد و این کارایی با محتوای وزنی و طول الیاف، مقدار وزنی آهک و زمان عمل‌آوری رابطه‌ی مستقیمی دارد. به عنوان مثال، با مسلح‌سازی نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۵ درصد وزنی آهک، به $\frac{3}{5}$ درصد وزنی الیاف مرکب با طول ۱۲ میلی‌متر طی ۲۸ روز عمل‌آوری، مقاومت خمشی ۲۷ درصد و کرنش متناظر با آن $\frac{41}{5}$ برابر تقویت شده‌اند.

References

- [1] 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; 10(1): 125-135. doi: 10.22091/cer.2024.9999.1515 [In Persian]
- [2] Ahmadi M, Bagherieh AR, Mohammadipour F. Evaluating the Seismic Bearing Capacity of Strip Foundation Adjacent to Geogrid-Reinforced Slopes Using Finite Element Limit Analysis Method. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 169-185. doi: 10.22091/cer.2024.10058.1519 [In Persian]
- [3] 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; 10(1): 67-83. doi: 10.22091/cer.2023.9855.1511 [In Persian]
- [4] Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Exploring the influence of mixing energy on strength of sand treated by deep soil mixing. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2025. doi: 10.1016/j.jrmge.2025.04.038
- [5] Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Development of a Laboratory-Scale Deep Soil Mixing Device for Assessing the Influential Factors on Strength of DSM Columns. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 145-166. doi: 10.22091/cer.2025.12467.1606 [In Persian]
- [6] Kalantary F, Abbasi Govanjik D, Safdari Seh Gonbad M. Stimulation of native microorganisms for improving loose salty sand. Geomicrobiology Journal. 2019; 36(6): 533-542. doi: 10.1080/01490451.2019.1579876

- [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; 448: 138115. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2024.138115**
- [8] Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Construction of a DSM Apparatus to Evaluate the Effects of Soil Bed Moisture Content, Cement Dosage, and Total Water-to-Cement Ratio on Mixing Quality and Strength of DSM Columns. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2025; 11(5): 49. doi: **10.1007/s40891-025-00654-7**
- [9] Abdi MR, Chehregosha A, Farzalizadeh R. Effects of miscellaneous plasticity on behavior of lime-treated kaolinites. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021; 15(8): 1040-1050. doi: **10.1080/19386362.2019.1677401**
- [10] Shaji S, Divya PV. Sustainable ground improvement of soft clay using eggshell lime and rice husk ash. *Construction and Building Materials*. 2024; 441: 137460. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2024.137460**
- [11] Abdi MR, Abbasi E, Safdari Seh Gonbad M. Performance comparison of polypropylene and elastic fibers in enhancing the flexural behavior of lime-stabilized kaolinite clay. *Construction and Building Materials*. 2025; 478: 141422. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2025.141422** [In Persian]
- [12] Ramkrishnan R, Sruthy MR, Sharma A, Karthik V. Effect of random inclusion of sisal fibres on strength behavior and slope stability of fine grained soils. *Materials Today: Proceedings*. 2018 Jan 1; 5(11): 25313-25322. doi: **10.1016/j.matpr.2018.10.334**
- [13] Zhao Y, Yang Y, Ling X, Gong W, Li G, Su L. Dynamic behavior of natural sand soils and fiber reinforced soils in heavy-haul railway embankment under multistage cyclic loading. *Transportation Geotechnics*. 2021; 28: 100507. doi: **10.1016/j.trgeo.2020.100507**
- [14] Sengul T, Akray N, Vitosoglu Y. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils. *Construction and Building Materials*. 2023; 400: 132590. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.132590**
- [15] Ma Y, Bao H, Yan C, Lan H, Peng J, Zheng H, Song Z, Liu C. Mechanical properties and microstructure evolution of two ecological slope-protection materials under dry-wet cycles. *Journal of cleaner production*. 2023; 416: 137833. doi: **10.1016/j.jclepro.2023.137833**
- [16] 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; 18(2): 295-306. doi: **10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(295)**
- [17] 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; 19(3): 242-248. doi: **10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(242)**
- [18] Muntohar AS. Influence of plastic waste fibers on the strength of lime-rice husk ash stabilized clay soil. *Civil Engineering Dimension*. 2009; 11(1): 32-40.
- [19] 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*; 179-185. doi: **10.1061/47633(412)24**
- [20] Li M, Chai SX, Zhang HY, Du HP, Wei L. Feasibility of saline soil reinforced with treated wheat straw and lime. *Soils and foundations*. 2012; 52(2): 228-238. doi: **10.1016/j.sandf.2012.02.003**
- [21] Kalkan E. Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils. *Applied Clay Science*. 2013; 80: 117-125. doi: **10.1016/j.clay.2013.06.014**
- [22] Anggraini V, Asadi A, Huat BB, Nahazanan H. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*. 2015; 59: 372-381. doi: **10.1016/j.measurement.2014.09.059**
- [23] Yilmaz YÜ. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil. *Engineering Geology*. 2015; 188: 168-177. doi: **10.1016/j.enggeo.2015.01.018**
- [24] Nagrale PP, Patil AP, Bhaisare S. Strength characteristics of subgrade stabilized with lime, fly ash and fibre. *International Journal of Engineering Research*. 2016; 5(1): 74-79. doi: **10.17950/ijer/v5i1/017**
- [25] Abdi MR, Mirzaeifar H. Effects of discrete short polypropylene fibers on behavior of artificially cemented kaolinite. *International Journal of Civil Engineering*. 2016; 14: 253-262. doi: **10.1007/s40999-016-0022-5**
- [26] Ayeldeen M, Kitazume M. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*. 2017; 45(6): 592-602. doi: **10.1016/j.geotexmem.2017.05.005**
- [27] Muthukumar M, Sekar SK, Shukla SK. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil blended with lime and fibres. In *International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: In novative Infrastructure Geotechnology*. 2017; 39-48. doi: **10.1007/978-3-319-63570-5_4**
- [28] Subhradeep D, Monowar H. The Tensile Strength Behavior of Lime-Stabilized Soft Soil with Inclusion of Plastic Fiber. In *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics: IGC 2016*. 2018; 2: 211-218. doi: **10.1007/978-981-13-0559-7_24**

- [29] Shenal Jayawardane V, Anggraini V, Emmanuel E, Yong LL, Mirzababaei M. Expansive and compressibility behavior of lime stabilized fiber-reinforced marine clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020; 32(11): 04020328. **doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003430**
- [30] 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; 13(4): 885-898. **doi: 10.1016/j.jrmge.2020.11.008**
- [31] Owino AO, Nahar N, Hossain Z, Tamaki N. Dimensional influence of basalt fiber reinforcements on the consolidation behaviour of rice husk ash stabilized soils. *Construction and Building Materials*. 2022; 339: 127686. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127686**
- [32] 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; 407: 133542. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133542**
- [33] Hu Z, Sun R, Wang Y, Wang C, Zhao Y. Experimental research on shear strength characteristics of cement-stabilized dredged silty clay reinforced with alginate fiber. *Construction and Building Materials*. 2024; 444: 137858. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137858**
- [34] 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; 360: 136046. **doi: 10.1016/j.matlet.2024.136046**
- [35] Baldovino JD, de la Rosa YE, Calabokis OP, Vergara JA, López LC. Geotechnical Behavior of Xanthan Gum-Stabilized Clay Reinforced with Polypropylene Fibers. *Polymers*. 2025; 17(3): 363. **doi: 10.3390/polym17030363**
- [36] Venkateswarlu H, Prasad AC, Jadda K. Effect of Triangular-Shaped Fiber on Geotechnical Behavior of Lime-Treated Expansive Clay. *Indian Geotechnical Journal*. 2025; 1-5. **doi: 10.1007/s40098-025-01223-5**
- [37] Luo DY, Lang L, Zhang B. Splitting tensile strength behavior of dredged sediment with cement stabilization and straw fiber reinforcement. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2025; 27: 1379-1393. **doi: 10.1007/s10163-025-02177-9**
- [38] 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; 15: 949-958. **doi: 10.1007/s40999-016-0057-7**
- [39] Afshar M, Alipour A, Norouzbeigi R. Kaolin-based stable colloidal nano-silica: Peptization factors and stability assessments via designed experiments. *Results in Engineering*. 2024; 21: 101654. **doi: 10.1016/j.rineng.2023.101654**
- [40] Abdi MR, Ebrahimi M. Impact of plasticity characteristics on wet-dry response of fiber reinforced clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2025; 84(1): 53. **doi: 10.1007/s10064-024-04081-2**
- [41] Abdi, MR, Abbasi E, Safdari Seh Gonbad M. Assessing Flexural Behavior of Stabilized and Reinforced Clay. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(1): 51-67. **doi: 10.22091/cer.2025.12150.1596** [In Persian]
- [42] Abdi MR, Wild S. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: I. Physical characteristics. *Clay Minerals*. 1993; 28(4): 555-567. **doi: /10.1180/claymin.1993.028.4.06**
- [43] Wild S, Abdi MR, Leng-Ward G. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: II. Reaction products and expansion. *Clay minerals*. 1993; 28(4): 569-83. **doi: 10.1180/claymin.1993.028.4.07**
- [44] 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; 24: 103077. **doi: 10.1016/j.rineng.2024.103077**
- [45] 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; 28(8): 1924-1942. **doi: 10.1080/19648189.2023.2286470**
- [46] Cai Y, Shi B, Ng CW, Tang CS. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering geology*. 2006; 87(3-4): 230-240. **doi: 10.1016/j.enggeo.2006.07.007**
- [47] Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 C. *Applied clay science*. 2010; 50(2): 191-198. **doi: 10.1016/j.clay.2010.07.023**
- [48] Dash SK, Hussain M. Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*. 2012; 24(6): 707-714. **doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431**
- [49] Aqel R, Attom M, El-Emam M, Yamin M. Piping Stabilization of Clay Soil Using Lime. *Geosciences*. 2024; 14(5): 122. **doi: 10.3390/geosciences14050122**
- [50] Ahmed A, El-Emam M, Ahmad N, Attom M. Stabilization of Pavement Subgrade Clay Soil Using Sugarcane Ash and Lime. *Geosciences*. 2024; 14(6): 151. **doi: 10.3390/geosciences14060151**
- [51] ASTM C1609/C1609M-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**

- [52] 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**
- [53] Moghal AA, 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; 29(6): 04017014. **doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001835**
- [54] 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; 11: 1-4. **doi: 10.1007/s12517-018-3458-x**
- [55] Moghal AA, Chittoori BC, Basha BM. Effect of fibre reinforcement on CBR behaviour of lime-blended expansive soils: reliability approach. *Road Materials and Pavement Design*. 2018; 19(3): 690-709. **doi: 10.1061/9780784480069.004**
- [56] Prakash K, Sridharan A, Rao SM. Lime addition and curing effects on the index and compaction characteristics of a montmorillonitic soil. *Geotechnical Engineering*. 1989; 20(1): 39-47.
- [57] Hussain M, Dash SK. The influence of lime on the compaction behaviour of soils. *Environmental Geotechnics*. 2015; 3(5): 346-352. **doi: 10.1680/envgeo.14.00015**
- [58] Negawo WJ, Di Emidio G, Bezuijen A, Verastegui Flores RD, François B. Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2019; 23(4): 504-514. **doi: 10.1080/19648189.2017.1304272**
- [59] Rajasekaran G. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean engineering*. 2005; 32(8-9): 1133-1159. **doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.08.012**
- [60] 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; 23(7): 2473-2480. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002**
- [61] 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; 5: 162-169. **doi: 10.1007/s11707-011-0166-1**
- [62] Anggraini V, Asadi A, Huat BK. Durability of lime treated soil reinforced by natural fiber under bending force. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*. 2015; 9(12): 1400-1404.
- [63] Liang L, Xu Y, Hu S. Bending and crack evolution behaviors of cemented soil reinforced with surface modified PVA fiber. *Materials*. 2022; 15(14): 4799. **doi: 10.3390/ma15144799**
- [64] 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; 393: 132133. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132133**
- [65] Kamiloğlu HA, Kurucu K, Akbaş D. Investigating the effect of polypropylene fiber on mechanical features of a geopolymer-stabilized silty soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024; 28(2): 628-643. **doi: 10.1007/s12205-023-0488-z**
- [66] 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; 111: 158-166. **doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.045**
- [67] 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; 79: 941-957. **doi: 10.1007/s10064-019-01592-1**
- [68] 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; 32: 100685. **doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100685**
- [69] Kamaruddin FA, Nahazanan H, Kim Huat B, Anggraini V. Improvement of marine clay soil using lime and alkaline activation stabilized with inclusion of treated coir fibre. *Applied Sciences*. 2020; 10(6): 2129. **doi: 10.3390/app10062129**
- [70] Yao X, Chang S, Dong X. Three point bending flexural strength of cemented soil reinforced by PVA and Jute fiber. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2021 Mar 1; 692(3): 032056. **doi: 10.1088/1755-1315/692/3/032056**
- [71] Yao X, Huang G, Wang M, Dong X. Mechanical properties and microstructure of PVA fiber reinforced cemented soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021; 25(2): 482-491. **doi: 10.1007/s12205-020-0998-x**
- [72] Wang Y, Ma B, Hua W, Wang W, Ma L, Wang B, Mei Z. Application of the FDEM Based on the CZM in Simulating Three-Point Bending Test of Frozen Soil. *Atmosphere*. 2022; 13(12): 2083. **doi: 10.3390/atmos13122083**