



## Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Properties of Lime and Cement Stabilized Soil

Mohammad Mostafa Jafari<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Bagheripour<sup>2</sup>, Masoud Lakzadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

<sup>3</sup>MSc, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Article Type:**  
Original Research

**Received:** 04.14.2021  
**Revised:** 06.30.2021  
**Accepted:** 09.06.2021

**Keyword:**  
Soil Mixing  
Soil Improvement  
Fiber  
Fiber Reinforced Soil  
Unconfined Compressive Strength

**\*Corresponding Author:**  
Mohammad Mostafa Jafari  
**Email:** [jafari-moh@tvu.ac.ir](mailto:jafari-moh@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

12 groups of soil samples were prepared with various percentage of PP-fiber content (i.e. 0.0%, 0.4%, 1%, 1.7% and 2.5% by weight of soil), cement (i.e. 0% and 4% by weight of soil) as well as lime (0% and 3% by weight of soil) to study the effect of PP-fiber on mechanical behaviour and strength of non-stabilized and stabilized clayey soil with cement and lime. The unconfined compression tests were carried out on samples that were cured at 30°C and kept for 14 and 28 days in oven. The test results showed that inclusion of fiber reinforcement in stabilized and non-stabilized clayey soil mixtures caused an increase in the unconfined compressive strength (UCS) and failure strain. However, such effects were much more evident in stabilized samples when compared with those of non-stabilized samples. Furthermore, maximum unconfined compressive strength of samples was obtained at an optimum percentage of fiber content of 0.4%. The results indicated that the existence of fiber in specimens decreased the stiffness of samples, caused more ductile behaviour and loss of post-peak strength. The interactions at the interface between fiber and soil matrix were studied by using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results demonstrated that the friction and bond strength between fiber surface and soil were significantly effective in changing the mechanical behaviour of soil.



**EXTENDED ABSTRACT**

**Introduction**

12 groups of soil samples were prepared with various percentages of PP-fiber content (0.0%, 0.4%, 1%, 1.7% and 2.5% by weight of soil), cement (0% and 4% by weight of soil) as well as lime (0% and 3% by weight of soil) in order to study the effect of PP-fiber on mechanical behaviour and strength of non-stabilized and stabilized clayey soil. The unconfined compression tests were carried out on samples cured at 30°C and kept for 14 or 28 days in an oven.

**Methodology**

In this study, cylindrical soil (Natural soil), Lime Concrete (LC) and Reinforced Lime-Cement Concrete (RLCC) specimens were prepared with different fiber contents and cured in an oven (30°C) for different periods. Table 1 shows the name, mixing plan summary, and the number of developed samples for all different categories.

**Table 1. Name and specification of samples.**

Specimens	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Cement (%)	0	0	0	0	0	4	0	4	4	4	4	4
Lime (%)	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3
Fiber (%)	0	0.4	1.0	1.7	2.5	0	0	0	0.4	1.0	1.7	2.5
Number of samples	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

**Sample preparation**

In order to prepare the specimens, clay soil and fibers were appropriately mixed together. The lime-cement slurry was made by mixing lime and cement with water. Then, the lime-cement slurry was added to the mixture of soil and fibers. The process of mixing was continued by an industrial mixer for 3 minutes until a homogeneous material was attained. The fresh mixture was poured into cylindrical molds with a diameter of 60 mm and a height of 120 mm. It should be noted that because of adopting relatively high workability to represent the typical condition of RLCC and LCC in real projects, the mixture could be correctly placed in the molds without any subsequent vibration or compaction process.

**Testing**

To ensure the accuracy of the test results, three replicate specimens were prepared for each mixing plan and curing period. After 72 hours of RLCC casting, the specimens were demolded and then placed in plastic bags to avoid changes in the moisture. Half of the samples were cured for 14 days at a temperature of 30 °C in an oven, while the rest were cured for 28 days in the oven at the same temperature. After curing, the uniaxial compression tests with the loading rate of 1 mm/min were carried out on the samples. Three tests were conducted for each specified condition, and the average values were calculated and reported.

## Results and discussion

The test results showed that the inclusion of fiber reinforcement in stabilized and non-stabilized clayey soil mixtures caused an increase in the unconfined compressive strength (UCS) and failure strain. However, such increasing effects were much more evident in stabilized samples compared with those of non-stabilized samples. In addition, the maximum unconfined compressive strength of samples was obtained at an optimum percentage of the fiber content of 0.4%. The results indicated that the existence of fiber in specimens decreased the stiffness of samples, and caused more ductile behaviour and loss of post-peak strength. The interactions at the interface between fiber and soil matrix were studied by using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that the friction and bond strength between fiber surface and soil significantly affected the mechanical behaviour of soil.

## Conclusion

The performance of RLCC was studied by focusing on the effects of various fiber contents and curing periods on a number of geotechnical properties including the compressive strength, stress-strain behavior, secant modulus, deformability index, bulk modulus, failure strain, and failure pattern. According to the Scanning Electron Microscopy (SEM) images, the addition of lime and cement reduced the voids of soil, and the specimen was characterized by a rather well-structured matrix consequently improving the geotechnical properties of the soil. Furthermore, fibres could increase the deformity of samples. The following main conclusions were drawn:

- The use of fibers in addition to stabilizers such as cement and lime significantly increased the strength of samples compared to the use of fibers alone.
- The optimum fiber content in samples stabilized with 3% lime and 4% cement was 0.4%. Also, by increasing the number of fibers (more than the optimal value of 0.4%), the UCS of the samples decreased. The reason for this can be explained by the fact that increasing the fibers to more than the optimal amount reduced the contact of soil grains with each other and reduced the interlocking mechanism.
- The role of fibers in controlling the width of cracks and preventing their expansion was considered an effective factor in changing soil behavior from brittle to ductile which changed soil behavior from softening strain to hardening strain.
- By using SEM images, it was observed that in unstabilized soil, the interaction between the surfaces of fibers and soil grains plays a key role in increasing the strength and changing the behaviour of the soil, while in stabilized soil the interaction between the surface of fibers and products resulting from pozzolanic reactions play a key role in changing soil behavior.
- The use of fibers in addition to soil stabilization is a beneficial method for both reinforcement and stabilization. This method can be used in construction projects which need soil improvement.
- By increasing the number of fibers in the mixing design, the ductility index and the uniaxial compressive strength increased by up to 0.4% of the fibers; beyond this figure, a reverse trend was observed.

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر پارامترهای مقاومتی خاک تثبیت شده با آهک و سیمان

محمد مصطفی جعفری<sup>۱\*</sup>، محمدحسین باقری پور<sup>۲</sup>، مسعود لک‌زاده<sup>۳</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

### کلید واژگان:

اختلاط خاک

بهسازی خاک

الیاف

خاک مسلح الیافی

مقاومت فشاری تک‌محوری

به‌منظور مطالعه تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار مکانیکی و پارامترهای مقاومتی خاک رس تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با سیمان و آهک نمونه‌هایی در دوازده گروه مختلف با درصد‌های مختلف الیاف پلی‌پروپیلن شامل ۰ درصد، ۰/۴ درصد، ۱/۰ درصد، ۱/۷ درصد و ۲/۵ درصد (درصدی از وزن خاک خشک)، ۰ درصد و ۴ درصد سیمان ۰ درصد و ۳ درصد آهک ساخته شد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۱۴ و ۲۸ روز در گرمکن با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی آنها صورت پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که وجود الیاف مسلح‌کننده در طرح اختلاط خاک رس تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و نیز کرنش گسیختگی گردیده است و این تأثیر در نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های تثبیت‌نشده بیشتر است. همچنین مقدار الیاف بهینه که سبب بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها شده معادل ۰/۴ درصد برآورد گردیده است. همچنین نتایج نشان داد وجود الیاف، سبب کاهش مدول الاستیسیته در نمونه‌ها، شکل‌پذیرتر شدن رفتار آنها و مقاومت بیشتر بعد از گسیختگی (تنش تجمعی توسط مصالح در کرنش‌های بیشتر از کرنش متناظر با گسیختگی آنها نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف یا دارای میزان الیاف کمتر، بیشتر می‌شود) گردیده است. اندرکنش بین سطوح الیاف با جسم خاک به‌وسیله عکس‌برداری الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان داد اصطکاک و مقاومت ایجاد شده بین سطوح الیاف و خاک، عامل اصلی تغییر در راستای بهبود رفتار مکانیکی خاک است.

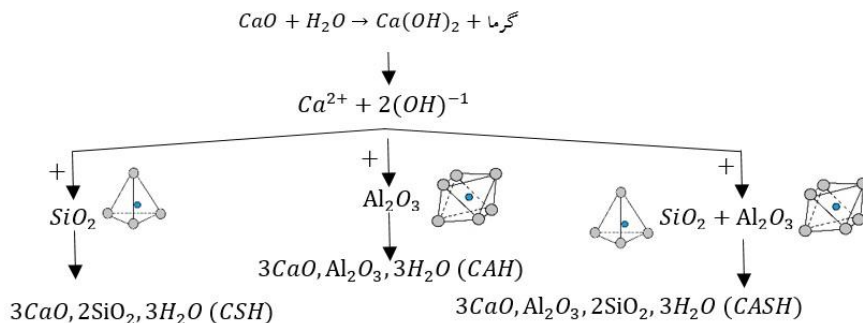
\* نویسنده مسئول: محمد مصطفی جعفری

پست الکترونیکی:

[jafari-moh@tvu.ac.ir](mailto:jafari-moh@tvu.ac.ir)

## مقدمه

ساخت سازه‌های مهندسی روی خاک‌های نرم به دلیل این‌که این‌گونه خاک‌ها مقاومت برشی کم و قابلیت تراکم‌پذیری بالایی دارند و سبب ایجاد خطرات بالقوه نظیر گسیختگی و نشست‌های تفاضلی می‌گردد. بهبود ویژگی‌های مختلف خاک مانند: مدول‌های مکانیکی، ظرفیت باربری، مقاومت برشی یا حتی نفوذپذیری با روش‌های مختلف بهسازی خاک‌ها از جمله استفاده از زهکش‌های عمودی و تثبیت خاک‌ها امکان‌پذیر می‌باشد [۱]. یکی از روش‌هایی که برای بهسازی خاک مؤثر می‌باشد و تأثیرات آن به‌طور عملی مشاهده می‌گردد، بهسازی شیمیایی خاک به‌وسیله تثبیت‌کننده‌هایی نظیر سیمان و آهک است [۲]. آهک به‌عنوان یک مصالح مناسب در پروژه‌های مختلف عمرانی برای بهبود رفتار خاک‌های مسئله‌دار و تثبیت آنها نظیر: زیرسازی و روسازی راه‌ها، بهسازی خاک زیر فونداسیون سازه‌ها، سازه‌های نگهبان و خاکریز جاده‌ها استفاده می‌شود. طبق شکل ۱ در اثر ترکیب آهک زنده با آب، آهک هیدراته به‌وجود می‌آید و همچنین واکنش سبب تولید گرمای قابل‌ملاحظه‌ای می‌گردد که این گرما سرعت واکنش را افزایش می‌دهد و سبب تبخیر آب موجود در محیط نیز می‌گردد، سپس آهک هیدراته‌شده در کنار آب، یون‌های  $Ca^{2+}$  و  $(OH)^{-1}$  را تولید می‌کند. براساس واکنش‌های پوزولانی، یون‌های تولید شده با اتم‌های آلومینیوم و سیلیکای موجود در خاک، واکنش می‌دهند و سبب تشکیل سیلیکات‌های کلسیم (CSH)، آلومینات‌های کلسیم (CAH) و سیلیکات‌های آلومینیوم کلسیم (CASH) می‌شوند که واکنش‌های شیمیایی آنها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. نحوه هیدراته شدن آهک زنده و واکنش با خاک رس.

با برقرار شدن پیوندهای موردنظر و تشکیل سیلیکات‌های کلسیم، آلومینات‌های کلسیم و سیلیکات‌های آلومینیوم کلسیم ویژگی‌های مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رس بهبود می‌یابد؛ بنابراین تبادل یون‌ها سبب تثبیت خاک می‌گردد [۳]. چمدا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که خاک رس در PH ۷ و ۱۲/۶ به ترتیب  $Ca^{2+}$  و  $CaOH^+$  را بهتر جذب می‌کند. به‌علاوه در درصدهای کم  $Ca(OH)_2$  ویژگی‌هایی نظیر مدول الاستیسیته، چسبندگی و مقاومت، افزایش و با بیشتر شدن مقدار  $Ca(OH)_2$  در محیط پارامترهای موردنظر کاهش یافتند [۴]. داش و حسین<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) نشان دادند که اگرچه با افزایش دمای محیط، نرخ افت و انقباض اولیه ملات به‌دست‌آمده، افزایش پیدا می‌کند اما افت نهایی با افزایش دما کاهش می‌یابد [۵]. آزادگان و لی<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) تأثیر استفاده از سیمان و آهک در تثبیت خاک زیر فونداسیون‌های

<sup>۱</sup> Chameda

<sup>۲</sup> Dash & Hussain

<sup>۳</sup> Azadegan & Lie

دایره‌ای را مطالعه کردند. آنها آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری متعددی روی خاک رس تثبیت‌شده با سیمان و آهک انجام دادند. سپس با استفاده از روش اجزای محدود تأثیر قطر، ضخامت پی و درصدهای مختلف سیمان و آهک را بر ظرفیت باربری و منحنی بار-جابجایی پی‌های دایره‌ای بررسی کردند. در نهایت این محققان نتیجه‌گیری کردند که گسیختگی توأم با ترک‌های کششی و گسیختگی برشی کلی موده‌های حاکم بر گسیختگی هستند و با افزایش قطر پی مقدار ظرفیت باربری و نشست در مرکز آن نیز کاهش می‌یابد [۶]. اسایفان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس کائولینیت تثبیت‌شده با آهک را در حالت خشک ۳۰ MPa و در حالت اشباع و تحت تأثیر بار سیکلی ۱۱ MPa به دست آوردند [۷]. گرازون<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به خاک رس و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی نظیر تعیین حد روانی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، نفوذپذیری و تراکم چنین نتیجه‌گیری کردند که با افزودن آهک به خاک رس، حد روانی، درصد رطوبت بهینه و نسبت باربری کالیفرنیا افزایش می‌یابد و حداکثر وزن مخصوص خشک، شاخص خمیری و ضریب نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد [۸]. جهاننداری و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع (به دلیل خاصیت موبینگی خاک‌های ریزدانه) را بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس تثبیت‌شده با آهک بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درجه اشباع، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد و در درجه اشباع ۱۰۰ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری برای کلیه نمونه‌ها، صفر گزارش شده است [۹]. جهاننداری و همکاران (۲۰۱۹) با افزودن ۴ درصد سیمان به طرح اختلاط مورد استفاده در پژوهش قبل و انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های با درجه اشباع متفاوت چنین نتیجه گرفته‌اند که استفاده از سیمان همراه با آهک در طرح اختلاط سبب افزایش چشمگیری در مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده در اثر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی می‌شود [۱۰].

بهسازی شیمیایی خاک به‌وسیله تثبیت‌کننده‌هایی نظیر سیمان و آهک از یک طرف، سبب افزایش مقاومت و سختی خاک می‌شود و از طرف دیگر تردی آن را افزایش می‌دهد [۲]. رفتار ترد سبب می‌شود گسیختگی در کرنش‌های کوچک‌تر رخ دهد [۱۱] و شکست و انهدام سازه به‌صورت ناگهانی و بدون هشدار قبلی صورت پذیرد [۱۲]. برای شکل‌پذیرتر کردن رفتار خاک می‌توان در کنار استفاده از سیمان یا آهک از الیاف طبیعی یا مصنوعی نیز بهره برد [۱۳-۱۶]. افزودن الیاف سبب می‌شود تا پیوند دانه‌های خاک و الیاف شکل گیرد و در نهایت زاویه اصطکاک داخلی مصالح افزوده شود. خاک بهسازی شده با الیاف در کنار دیگر افزودنی‌ها نظیر سیمان و آهک قادر خواهد بود تنش‌های قابل‌ملاحظه‌ای را بعد از نقطه گسیختگی تحمل کند و بدین ترتیب به‌صورت مؤثری رفتار ترد خاک اصلاح می‌گردد. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه بررسی رفتار مکانیکی توده خاک در اثر افزودن الیاف به‌تنهایی و با افزودنی‌های دیگری نظیر سیمان، آهک، خاکستر بادی و غیره انجام شده است. بیشتر تحقیقات انجام شده با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک نظیر: آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم، سهم‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، تراکم، بارگذاری صفحه‌ای و غیره انجام پذیرفته‌اند. تانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان، خاک رس را بهسازی کردند. در این تحقیق نمونه‌هایی در دوازده گروه مختلف و با درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان با هم مخلوط شدند و تحت آزمایش برش مستقیم و مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که وجود الیاف مسلح‌کننده در طرح اختلاط هر دو گروه خاک رس تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده با سیمان، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت برشی می‌شود و رفتار مصالح را شکل‌پذیرتر می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که اصطکاک و پیوند ایجاد شده بین سطوح الیاف و ذرات خاک، عامل اصلی در تغییر رفتار مکانیکی خاک است و این اصطکاک و پیوند تحت تأثیر عواملی همچون تنش عمودی موجود در سطح الیاف، سطح

<sup>1</sup> Esaifan

<sup>2</sup> Grazon

<sup>3</sup> Tang

تماس مؤثر بین الیاف و خاک و زبری سطح الیاف می‌باشد [۱۷]. پارک<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) مشاهده کرد که افزودن یک درصد الیاف پلی‌وینیل الکل و ۴ درصد سیمان به ماسه سبب افزایش دو برابری در مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های غیر مسلح شده است [۱۸]. پارک (۲۰۱۱) خاک ماسه بد دانه‌بندی شده را با نسبت‌های مختلف سیمان و الیاف پلی‌وینیل الکل مخلوط کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مسلح شده بیش از ۳ برابر نمونه‌های مسلح نشده است. همچنین شاخص شکل‌پذیری در نمونه‌های مسلح شده با یک درصد الیاف ۴ یا بزرگ‌تر از چهار می‌باشد و به مقدار سیمان در نمونه‌ها وابسته نیست [۱۷].

در حال حاضر، از مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی که به شکل‌های مختلفی نظیر: ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و ژئوکامپوزیت‌ها ساخته شده‌اند برای تسلیح خاک استفاده می‌شود. مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی و نوارهای فولادی به دلیل اینکه در یک جهت مشخص سبب تقویت خاک می‌گردند و در لایه‌های متناوب و به‌صورت پیوسته استفاده می‌شوند، محدودیت‌هایی دارند [۱۹]. استفاده از الیاف که به‌طور تصادفی درون خاک قرار می‌گیرند نسبت به مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی و نوارهای فولادی دو مزیت دارند [۱۷]: مزیت اول آنها در مقدار الیافی است که به‌صورت رشته‌های گسسته می‌باشند و به مقدار دلخواه نظیر هر افزودنی دیگری مانند سیمان، آهک و غیره می‌توانند در طرح اختلاط با خاک استفاده شوند. مزیت دوم این است که با قرارگیری تصادفی الیاف در درون جسم خاک می‌توانند ضعف کششی آن را در صفحات مختلف برطرف سازند [۱۷]. بنا به همین دلایل در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف جهت تسلیح خاک با استقبال گسترده‌ای مواجه شده است.

فالورکا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر الیاف بر وزن مخصوص خشک حداکثر خاک را بررسی کردند. آنها خاک ماسه سیلت‌دار را با الیاف پلی‌پروپیلن مسلح کردند. با استفاده از خاک مسلح شده پنج گروه خاکریز با مشخصات مسلح شده متفاوتی ساخته شد. برای ساخت خاکریزها ابتدا خاک مخلوط به الیاف در لایه‌های ۲۰ سانتی‌متری روی زمین ریخته شد و سپس با غلطک ۴ تنی با ۶ بار عبور متراکم گردید تا خاکریزی به طول ۵۰ متر، عرض ۱۰ متر و ضخامت ۶۰ سانتی‌متر ساخته شود. سپس آزمایش بارگذاری صفحه به کمک صفحه‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر و در دو حالت بارگذاری شامل: بارگذاری به‌صورت یکنواخت و بارگذاری به‌صورت بارگذاری- باربرداری روی خاکریزها انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد که هرچه الیاف مسلح‌کننده خاک، نازک‌تر باشند؛ خاک مسلح شده حاصل، متراکم‌تر می‌شود. همچنین مدول الاستیسیته آن با افزایش مقدار الیاف کاهش می‌یابد و هرچه قدر الیاف مسلح‌کننده نازک‌تر باشند کاهش مدول الاستیسیته بیشتر است [۲۰]. جعفری و همکاران (۲۰۱۲) از دوازده ترکیب مختلف با مخلوط هم‌زمان آهک، خاک رس و الیاف لاستیک در مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت سه سیکل ذوب و انجماد استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده افزایش حداکثر ۴۳۰ کیلوپاسکال مقاومت فشاری با افزودن ۱/۵ درصد الیاف لاستیک بود در حالی که با یک سیکل ذوب و انجماد حداکثر مقاومت به‌دست‌آمده ۱۶۵ کیلوپاسکال بود. در نهایت تثبیت با ۴ درصد آهک در مقابل ۸ درصد آهک و نمونه‌های تثبیت‌نشده، مقاومت و دوام بهتری نشان داد [۲۱]. حمیدی و حوراسفند (۲۰۱۳) با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان، خاک ماسه‌ای را تثبیت کردند و رفتار تنش-کرنش، تغییر حجم، سختی و انرژی جذب شده مصالح را با استفاده از آزمایش سه محوری مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت برشی ماسه سیمانته می‌شود و باعث شکل‌پذیرتر شدن رفتار آن می‌گردد [۲۲]. بوترو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) با افزودن الیاف پلی‌اتیلن که از بازیافت بطری‌ها و ظروف پلاستیکی نگهداری مایعات تولید شدند، جهت تسلیح خاک سیلتی استفاده کردند. نتایج آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی خاک مسلح فوق‌الذکر نشان داد که با افزایش مقدار الیاف زاویه اصطکاک داخلی مصالح کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد. کاهش زاویه اصطکاک داخلی به این علت

<sup>1</sup> Park

<sup>2</sup> Falorca

<sup>3</sup> Botero

بیان گردید که تعداد نقاط تماس بین ذرات خاک به علت وجود الیاف کم شده و افزایش چسبندگی به علت چسبندگی بین الیاف و ذرات خاک بوده است [۲۳]. ساغری و همکاران در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تاثیر الیاف خرده لاستیک‌های کهنه بر نفوذپذیری خاک ریزدانه پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد با افزودن الیاف مورد نظر به خاک، قابلیت نفوذپذیری آن افزایش یافته و هنگامی که مقدار الیاف از ۰/۶٪ بیشتر شود، قابلیت نفوذپذیری خاک مسلح کم شده است [۲۴]. هیدالگو سیگنس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) خاک متورم شونده را با ۶٪ متفاوت خرده لاستیک بدست آمده از تایرهای فرسوده مخلوط کردند. نتایج نشان داد که افزودن خرده لاستیک تا مقدار ۲/۵ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری تا ۴۳۰ کیلوپاسکال شده است [۲۵]. بوت و همکاران در سال ۲۰۱۶ تاثیر استفاده از موی انسان را به عنوان یک الیاف طبیعی بر رفتار خاک رس مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد، با مسلح نمودن خاک رس با حدود ۲٪ الیاف موی انسان، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای نمونه‌ها از ۴/۷٪ به ۷/۸٪ افزایش یافته است. همچنین هنگامی که درصد الیاف از مقدار ۲٪ بیشتر شود، به دلیل کاهش چسبندگی که بین ذرات خاک و الیاف اتفاق می‌افتد، از مقدار CBR و مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌ها کاسته گردیده است [۲۶]. گلدنر و فومز<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) به مطالعه تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر خواص تراکمی خاک تقویت شده با آهک پرداختند. پس از انجام آزمایشات تراکم بر روی خاک مسلح و غیر مسلح تثبیت شده با آهک به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار الیاف، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد [۲۷]. وی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ خاک رس کم پلاستیک را با استفاده از الیاف و آهک بهسازی کرده تا رفتار مکانیکی آنرا مورد برآورد و ارزیابی قرار دهند. در این تحقیق به خاک تثبیت شده با آهک چهار نوع الیاف شامل: کاه، ساقه برنج، کنف هندی و پلی پروپیلن اضافه شد. با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مقدار الیاف بهینه و طول بهینه جهت مسلح سازی خاک به دست آمد. همچنین به کمک آزمایش سه محوری پارامترهای مقاومت برشی خاک، رفتار تنش-کرنش و الگوی گسیختگی در خاک تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد: مقدار الیاف بهینه ۰/۲٪ و ۰/۲۵٪ و طول بهینه الیاف جهت مسلح سازی خاک معادل ۳۰٪ و ۴۰٪ قطر نمونه خاک ساخته شده حاصل گردید. همچنین مشاهده شد مسلح سازی خاک به وسیله الیاف، چسبندگی خاک را به مقدار بیشتری نسبت به زاویه اصطکاک داخلی افزایش داده است. حداکثر افزایش چسبندگی در خاک مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن حاصل گردید و بعد از آن به ترتیب الیاف کنف هندی، برنج و کاه سبب افزایش چسبندگی خاک تثبیت شده با آهک شدند. همه الیاف استفاده شده در این پژوهش سبب افزایش مقاومت فشاری خاک مورد نظر گردیدند اما الیاف پلی پروپیلن در این میان بیشترین تاثیر را داشتند [۲۸]. دوان و ژانگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۹) به مطالعه خواص مکانیکی و نحوه گسیختگی خاک رس همراه با خاکستر بادی و مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، مقاومت فشاری و کششی مصالح با افزایش درصد الیاف و خاکستر بادی، در ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک نقطه حداکثر، کاهش می‌یابد. به طوری که با ۰/۴٪ الیاف و ۸٪ خاکستر بادی، بیشترین مقاومت فشاری و کششی حاصل شده است [۲۹]. والی پور و همکاران در سال ۲۰۲۱ جهت تسلیح خاک رس از الیاف لاستیک‌های فرسوده و الیاف شیشه استفاده کردند. برای این منظور از الیاف با طول‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر جهت تسلیح خاک استفاده شد. در ابتدا وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه برای خاک فاقد عوامل تسلیح و خاک با ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف از طریق آزمایش تراکم پروکتور استاندارد تعیین شد. سپس خاک و الیاف در ۳ لایه ۷ میلی‌متری درون قالب برش مستقیم به ابعاد ۲/۲\*۱۰\*۱۰ سانتیمتر (برای هر درصد الیاف با توجه به وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه مربوط به آن) کوبیده شده و تحت اثر تنش‌های نرمال ۵۵، ۱۰۵ و ۲۰۵ کیلو پاسکال

<sup>1</sup> Hidalgo Signes

<sup>2</sup> Gelder & Fowmes

<sup>3</sup> Wei

<sup>4</sup> Duan & Zhang

مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. لازم به ذکر است در هر مرحله پس از اعمال تنش قائم، قالب برش مستقیم از آب پر شده و بلافاصله با سرعت  $0.75 \text{ mm/min}$  نیروی برشی تا جابجایی ۱۲ میلیمتر اعمال گردید. پوش موهر-کولمب حاصل از آزمایش برش مستقیم برای نمونه های مسلح شده با الیاف لاستیک فرسوده نشان داد، که بدون توجه به طول الیاف، بیشترین چسبندگی برای الیاف لاستیک مربوط به  $0.5\%$  و برای الیاف شیشه مربوط به  $1\%$  الیاف می باشد. همچنین مشاهده شد، هر چه نسبت ظاهری الیاف (نسبت طول به قطر) کمتر باشد (خصوصاً در مقدار الیاف بهینه) میزان تأثیر الیاف در افزایش چسبندگی بیشتر و هر اندازه نسبت ظاهری الیاف بیشتر باشد، تأثیر آنها در افزایش زاویه اصطکاک داخلی بیشتر است [۳۰]. صابریان و همکاران در سال ۲۰۲۱ سنگدانه های بازیافتی بتن را با استفاده از افزودن الیاف حاصل از ماسک های سه لایه حفاظت فردی در مقابل ویروس کرونا جهت استفاده در لایه های اساس و زیر اساس مسلح نمودند. نتایج آزمایشات نشان داد، با افزودن  $1\%$  از الیاف مورد نظر به مصالح، بیشترین مقاومت فشاری تک محوره و مدول بستر حاصل می گردد. آنها همچنین برآورد کردند جهت ساخت یک جاده دو بانده به طول ۱ کیلومتر، عرض ۷ متر و ضخامت  $0.5$  متر برای اساس و زیر اساس به حدود  $93/2$  تن ماسک (۳ میلیون ماسک) نیاز است که استفاده از ماسک های استفاده شده می تواند کمک شایانی به بازیافت زباله های تولید شده در اثر بیماری کووید ۱۹ نماید [۳۱].

با توجه به مطالعات پیشین افزودن آهک و سیمان به خاک رس پارامترهای ژئوتکنیکی بسیار زیادی از خاک را بهبود بخشیده و پتانسیل تورم زایی آن را کم کرده و سبب افزایش تردی آن می شود. افزایش تردی در مصالح سبب شکست ناگهانی شده و به عنوان یک پدیده نامطلوب شناخته می شود. بنابراین در پژوهش حاضر به منظور کاهش تردی مصالح از الیاف پلی پروپیلن در کنار آهک و سیمان جهت تسلیح خاک استفاده شده است. همچنین برای تعیین اثرات ناشی از وجود الیاف، مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته، کرنش گسیختگی و ضریب افزایش شکل پذیری مصالح، مورد آزمایش و برآورد قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از روش عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) تصاویری با دقت بالا از ساختار ذره بینی خاک مسلح با الیاف، جهت مطالعه رفتار اندرکنشی الیاف-خاک و تأثیر واکنش های یوزولانی ناشی از تثبیت تهیه گردیده است.

## معرفی مواد و مصالح مورد استفاده

### خاک ریزدانه و درشت دانه

خاک ریزدانه مورد استفاده از یک پروژه عمرانی در شهر کرمان و در عمق ۵ متری زمین به دست آمد. ماسه مورد استفاده نیز از معدن تولید شن و ماسه اختیار آباد از توابع شهر کرمان تهیه شد. در ابتدا آزمایش دانه بندی، هیدرومتری، تعیین حدود اتربرگ، چگالی ویژه و تراکم استاندارد پروکتور جهت شناسایی فیزیکی مصالح درشت دانه و ریز دانه صورت پذیرفت. نمودار دانه بندی مصالح مورد نظر در شکل ۲ و مشخصات فیزیکی مصالح مورد نظر در جدول ۱ و درصد ترکیبات تشکیل دهنده خاک رس که درصدی از وزن خشک آن می باشد در جدول ۲ آمده است.

### سیمان و آهک

سیمان و آهک مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند معمولی و آرتیمان آهک هیدراته بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آهک و سیمان مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح ریزدانه و درشت دانه.

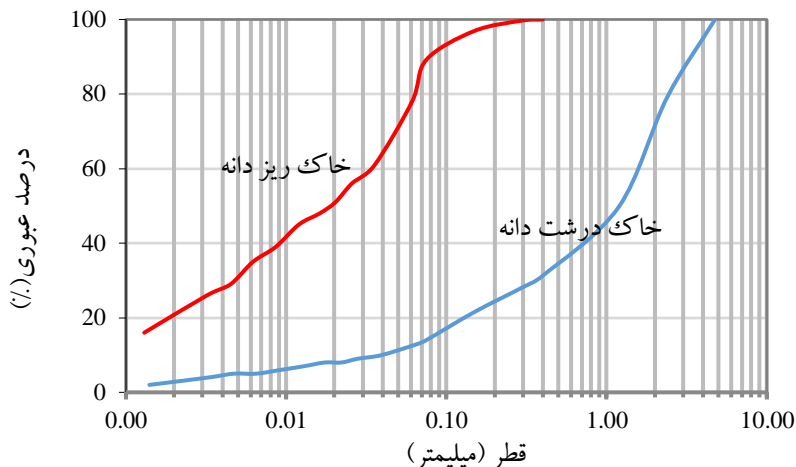
SM	کلاس خاک درشتدانه	CL	کلاس خاک ریزدانه
۰/۰۳۹۵	D <sub>10</sub>	Kaolinite	نوع کانی رس
۴۱/۲	C <sub>u</sub>	۱/۰۵	عدد فعالیت خاک رس
۱/۹۹۶	C <sub>c</sub>	٪۲۴	LL
٪۲۲	LL	٪۲۱	PI
NPL	PL	۲/۷۲۷	G <sub>s</sub>
NP	PI	۱۸۳۸ kN/m <sup>3</sup> - ٪۱۵/۹	$\gamma_{dmax}-\omega_{opt}$

جدول ۲. ترکیبات تشکیل دهنده سیمان، آهک و خاک رس (درصد از وزن کل).

سیمان (%)	آهک (%)	خاک رس (%)	ترکیبات موجود
۱۹/۰۵	۶۲/۹۶	۶۳/۴۱	CaO
۴۱/۷۵	۴/۷۸	۲۱/۶۶	SiO <sub>2</sub>
۱۴/۴۷	۳/۹۰	۴/۲۱	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۷/۰۸	۱/۲۱	۳/۱۰	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱/۴	۳/۹۷	۲/۸۲	MgO
۰/۰۳	۰/۰۱۶	۲/۶۱	SO <sub>3</sub>
۰/۰۸	۰/۰۱۲	-	NaCl
-	۰/۰۰۶	-	Mn
۱۳/۴۸	۲۳/۱۵	۰/۸۱	افت وزنی

### الیاف پلی پروپیلن و آب

تصویر الیاف مورد نظر جهت تسلیح خاک در شکل ۳ و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مشخصات فنی الیاف پلی پروپیلن (که از شرکت شیمیایی بتن پاس تهیه گردید) در جدول ۳ آورده شده است. آب مورد استفاده جهت آزمایشاتی نظیر هیدرومتری و تعیین چگالی ویژه خاک از نوع آب مقطر آزمایشگاهی و جهت ساخت نمونه‌ها از آب لوله کشی شهری بوده است.



شکل ۲. نمودار دانه بندی مصالح ریزدانه و درشت دانه مورد استفاده برای ساخت نمونه ها.

### جدول ۳. مشخصات الیاف مورد استفاده.

جامد رشته ای	حالت فیزیکی
سفید	رنگ
۰/۹۱	وزن مخصوص $\text{gr/cm}^3$
۳۰ میکرون	قطر متوسط
۱۲mm	طول متوسط
۳۵۰ Mpa	مدول یانگ
۳۵۰ Mpa	مقاومت کششی
۱۶۰ °c	نقطه ذوب



شکل ۳. الیاف مورد استفاده در پژوهش.

## نحوه ساخت نمونه ها و برنامه آزمایشگاهی

### آماده سازی نمونه ها

هدف اصلی در پژوهش حاضر بهسازی خاک ریزدانه با استفاده از سیمان و آهک به عنوان تثبیت کننده و الیاف جهت مسلح کردن خاک بهسازی شده با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری است. بدین منظور ابتدا کلوخه های موجود در خاک (ریزدانه و درشت دانه) خشک شده در دمای آزمایشگاه به وسیله چکش لاستیکی خرد شد. سپس خاک های مورد نظر از الک نمره ۴ عبور داده شد. مقدار سیمان، آهک و آب مورد استفاده با توجه به مراجع [۹] و [۱۰] انتخاب گردید. طرح اختلاط موجود در مراجع مورد نظر به نحوی تعیین شده است که ملات ساخته شده بدون نیاز به لرزش و تراکم در درون قالب قرار گیرد. بنابراین نمونه ها با ۲۳ درصد رس (نسبت به وزن خشک خاک درشت دانه)، ۳٪ آهک (نسبت به وزن خشک خاک ریزدانه و درشت دانه)، ۴ درصد سیمان (نسبت به وزن خشک خاک ریزدانه و درشت دانه) و ۲۴ درصد آب (نسبت به وزن کل خشک خاک ریزدانه، درشت دانه، سیمان و آهک) تهیه شدند. مقدار

الیاف مورد استفاده نیز به عنوان درصدی از مجموع وزن خشک شامل: خاک ریزدانه، درشت دانه، سیمان و آهک مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر الیاف بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده با سیمان و آهک نمونه‌هایی به شرح جدول ۴ ساخته شد. مورین و فریکارازو<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) پیشنهاد کردند به دلیل وجود تغییرات زیاد در ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های خاک و سنگ، جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری آنها نمونه‌های متعددی مورد تست قرار گرفته و میانگین مقاومت‌ها به عنوان مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته شود. بنابراین در پژوهش حاضر منظور از نمونه، سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۶ و ارتفاع ۱۲ سانتی متر که تمام خواص و ویژگی‌های آن‌ها (درصد مواد تشکیل دهنده، سن عمل‌آوری، درجه حرارت عمل‌آوری و غیره) مشابه هم بوده می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر سیمان، آهک و الیاف مورد استفاده در نمونه‌ها.

شماره نمونه	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
سیمان(%)	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۴	۴	۴	۴	۴
آهک(%)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳
الیاف(%)	۰	۰/۴	۱/۰	۱/۷	۲/۵	۰	۰	۰	۰/۴	۱/۰	۱/۷	۲/۵
تعداد نمونه	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳

جهت ساخت نمونه‌ها ابتدا خاک ریزدانه، درشت دانه، سیمان، آهک و الیاف (در صورت وجود با توجه به طرح اختلاط) به صورت خشک کاملاً با هم مخلوط شده و سپس آب لازم با توجه به طرح اختلاط ذکر شده در بالا به مخلوط مورد نظر اضافه گردید. سپس با استفاده از دست، مواد مورد نظر به صورت مخلوط همگنی در آمده و نمونه‌های ذکر شده در جدول ۴ ساخته شد. نمونه S1 فاقد هر نوع تثبیت کننده و مسلح کننده بوده و به عنوان نمونه شاهد به منظور شناخت رفتار خاک بکر تهیه گردید. کلیه نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در قالب و در شرایط محیط جهت گیرش اولیه نگهداری شدند. سپس تمامی نمونه‌ها از قالب بیرون آمده، درون غشای لاستیکی عاری از هوا (به منظور از دست ندادن رطوبت و عمل‌آوری مطلوب) قرار داده شده و به مدت ۱۴ و ۲۸ روز (۱۴ و ۲۸ روز از زمان ساخت نمونه‌ها) در گرمکن با دمای ۳۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند.

#### آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و عکس‌برداری الکترونی روبشی (SEM)

برای انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، از دستگاه سه محوری با فشار همه جانبه صفر استفاده شد. به منظور تست نمونه‌های فاقد سیمان و آهک از رینگ با ظرفیت ۳ KN و جهت نمونه‌هایی که دارای سیمان و آهک بودند از رینگ با ظرفیت ۲۰ KN استفاده گردید. سرعت بارگذاری برای کلیه نمونه‌ها ۱ mm/min مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی آنالیز ریزساختاری نمونه‌ها عکسبرداری الکترونی روبشی با استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاه پرتو نگاری رستاک تهران بر روی نمونه‌های مورد نظر صورت پذیرفت.

<sup>1</sup> Morin & Fricarazzo

## نتایج و بحث

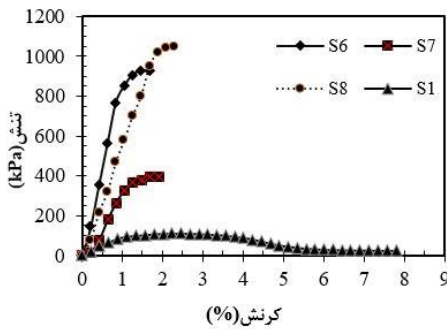
## تأثیر الیاف سیمان و آهک بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده

منحنی تنش کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک تثبیت نشده و مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن در شکل ۴-الف، برای خاک بکر و خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و آهک در شکل ۴-ب و برای خاک تثبیت شده با ۴ درصد سیمان و ۳ درصد آهک و مسلح به درصد‌های مختلف الیاف در شکل ۴-ج پس از ۲۸ روز نگهداری در گرمکن با دمای ۳۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است.

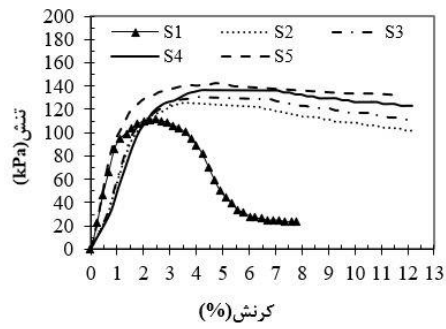
با توجه به شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف به منظور تسلیح خاک مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک را افزایش داده است. همچنین خاک مسلح شده الیافی رفتاری شکل پذیرتر داشته و نمونه‌ها پس از گسیختگی با کاهش کمتری در مقاومت روبرو شده و هر چه مقدار الیاف موجود در خاک بیشتر شده کاهش مقاومت پس از گسیختگی کمتر شده است. افزایش مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌ها بدین علت است که با حضور الیاف در بین ذرات خاک، امکان حرکت ذرات در اثر نیروهای وارده سخت‌تر شده و نیروی بیشتری نیاز است تا گسیختگی صورت پذیرد. با توجه به اینکه رشته‌های الیاف به صورت تصادفی در نمونه‌ها پخش شده‌اند، وجود الیاف سبب شده تا عرض ترک‌ها کنترل شده و ترک‌هایی که در نمونه‌ها و در اثر نیروهای وارده به وجود می‌آیند، با گسترش کمتری ظاهر شده و همین امر سبب افزایش شکل پذیری گردیده است. وجود الیاف سبب شده تا پس از گسیختگی نمونه نیز ذرات خاکی که از هم جدا شده‌اند به کمک الیاف ارتباط خود با یکدیگر را حفظ نموده و نمونه‌ها پس از گسیختگی با افت مقاومت کمتری مواجه شوند. همچنین با توجه به شکل ۴-الف مشاهده می‌شود سختی اولیه (شیب دیاگرام تنش-کرنش در ابتدای آزمایش) نمونه‌ها تقریباً با هم برابر بوده و به مقدار الیاف موجود در خاک بستگی ندارد. در حالیکه با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که استفاده از آهک یا سیمان به منظور تثبیت خاک سختی اولیه آن را بالا برده و رفتار آن را ترد کرده است. این امر بدان علت است که واکنش‌های پوزولانی شکل گرفته در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و یا سیمان سبب انسجام دانه‌ها و پیوند شیمیایی بین آنها شده که شکست این پیوند بین ذرات، با توجه به ماهیت آن با نیروی بیشتری صورت می‌پذیرد و همین امر سبب بالا بودن سختی این نوع نمونه‌ها شده است. در صورتی که در نمونه‌های مسلح شده (فاقد آهک یا سیمان)، در اثر حضور الیاف در کنار ذرات خاک هیچ‌گونه واکنش و پیوند شیمیایی بین ذرات خاک و الیاف صورت نمی‌پذیرد و در اثر نیروهای کمتری (نسبت به نمونه‌های تثبیت شده) الیاف از بین دانه‌ها به آرامی خزیده و سبب تغییر شکل تدریجی و در نتیجه سختی کمتری می‌گردند. در اثر واکنش‌های پوزولانی صورت گرفته بین ذرات خاک و مواد چسباننده مشاهده شد که با افزودن آهک به خاک مقاومت فشاری تک‌محوری، افزایش چشمگیری نسبت به خاک بکر داشته و در صورت استفاده از سیمان این افزایش بیشتر شده و رفتار خاک نیز تردتر شده است. این امر بدان علت است که گیرش سیمان زودتر از آهک بوده و همچنین مقدار سیمان در نمونه‌ها بیشتر از مقدار آهک در آنهاست. همچنین با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود در صورت استفاده هم‌زمان از آهک و سیمان در طرح اختلاط، به علت بالا رفتن درصد مواد پوزولانی در نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری (نسبت به استفاده از سیمان یا آهک به تنهایی) افزایش یافته در صورتی که سختی اولیه نمونه‌ها کمتر از نمونه تثبیت‌شده با سیمان و بیشتر از نمونه تثبیت‌شده با آهک است.

کرنش گسیختگی در نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان، آهک و نمونه‌هایی که هم‌زمان با سیمان و آهک تثبیت شده‌اند به ترتیب ۱/۴۶ درصد، ۱/۶۹ درصد و ۲/۲۹ درصد است که در مقایسه با خاک بکر و خاک مسلح الیافی کوچک‌تر است. این امر بدان علت است که وجود واکنش‌های پوزولانی و پیوند قوی بین ذرات سبب رفتار تردتر، در نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های مسلح شده (و همچنین خاک بکر) شده است. اثر هم‌زمان استفاده از الیاف و تثبیت با سیمان و آهک در شکل ۴-ج نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با افزایش میزان الیاف در خاک تثبیت شده با

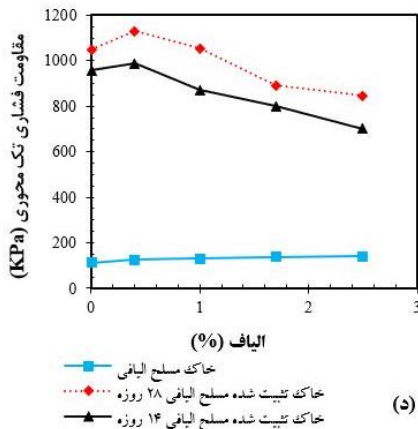
سیمان و آهک مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها کاهش یافته است. کاهش مقاومت بدان علت است که با افزایش میزان الیاف در نمونه‌ها، الیاف به جای اینکه با ذرات خاک در تماس باشند و آنها را محصور کنند، با یکدیگر در تماس قرار می‌گیرند و نیروی قابل‌ملاحظه‌ای برای پیوند دادن آنها به یکدیگر وجود ندارد. به عبارت دیگر، مقدار الیاف بهینه برای حداکثر ساختن مقاومت فشاری نمونه‌ها ۰/۴ درصد است. با مقایسه گراف‌های شکل ۴-ب و شکل ۴-ج مشاهده می‌شود استفاده از الیاف در کنار سیمان و آهک در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده فاقد الیاف، رفتار مصالح حاصل را شکل‌پذیرتر کرده است که این امر به علت نقش مهم الیاف در کنترل عرض ترک‌ها و به تعویق انداختن گسیختگی است. کرنش گسیختگی در نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح شده با ۰/۴ درصد، ۱ درصد، ۱/۷ درصد و ۲/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب ۳/۵۴ و ۳/۱۲، ۲/۹۲، ۲/۷۱ درصد مشاهده شده است.



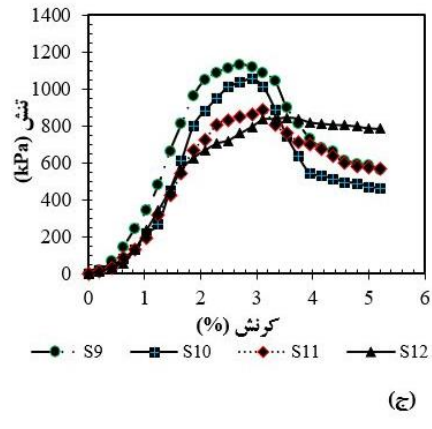
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴. دیاگرام‌های تنش - کرنش و تأثیر الیاف بر مقاومت‌ها: (الف) خاک بکر مسلح‌نشده و مسلح‌شده با درصد الیاف مختلف (ب) خاک بکر و خاک تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک (سن ۲۸ روز - دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد) (ج) خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد سیمان، ۳ درصد آهک و مسلح‌شده با درصدهای مختلف الیاف (سن ۲۸ روز - دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، (د) تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با درصد الیاف مختلف.

با توجه به شکل ۴-ب در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، سیمان یا نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و آهک به صورت هم‌زمان، دیاگرام تنش - کرنش از مبدأ حرکت می‌کند تا به نقطه بیشینه خود برسد، پس از رسیدن به نقطه بیشینه که

معرف مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها است به علت گسیختن پیوند بین ذرات که در اثر واکنش‌های پوزولانی به وقوع پیوسته‌اند، به‌طور ناگهانی نمونه گسیخته می‌شود و ثبت ادامه دیاگرام تنش - کرنش غیرممکن می‌گردد. این امر معرف رفتار شکننده و ترد نمونه‌ها است. اما در نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف پس از گسیختگی، کاهش تنش در نمونه‌ها به‌صورت تدریجی رخ داده است و الیاف توانسته‌اند انسجام و ارتباط بین ذرات خاک را پس از گسیختگی نیز تا حدودی حفظ کنند. همچنین به دلیل همین حفظ انسجام و ارتباط ذرات خاک پس از گسیختگی که الیاف سبب آن شده‌اند، همان‌طور که در شکل ۴-ج مشاهده شده است، مقاومت نهایی ماندگار نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح‌شده با افزایش مقدار الیاف افزایش پیدا کرده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که استفاده از الیاف به‌خوبی توانسته رفتار مصالح را شکل‌پذیرتر کند و سبب شود گسیختگی در کرنش‌های بالاتری به‌وقوع بپیوندد. به عبارت دیگر با توجه به شکل ۴-ج می‌توان گفت که با افزایش میزان الیاف در توده خاک، رفتار خاک از حالت کرنش نرم‌شوندگی به سمت کرنش سخت‌شوندگی سوق پیدا می‌کند و مقاومت نمونه‌های حاوی ۰/۴ درصد الیاف نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. شکل ۴-د تأثیر استفاده از الیاف بر مقاومت فشاری خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با سیمان و آهک پس از ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری در گرمکن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-د می‌توان مشاهده کرد الیاف در حضور تثبیت‌کننده‌هایی نظیر سیمان و آهک نقش مهم‌تری برعهده دارند و نسبت به نمونه‌های تثبیت‌نشده مقاومت فشاری را بیشتر دستخوش تغییر قرار می‌دهند و افزایش می‌دهند؛ به‌طوری‌که با تغییر میزان الیاف از ۰ درصد به ۰/۴ درصد در خاک تثبیت‌شده و عمل‌آوری پس از ۱۴ و ۲۸ روز، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها به‌ترتیب از ۹۵۷ به ۹۹۰ و از ۱۰۵۱ به ۱۱۳۰ رسیده است که به‌ترتیب معادل ۳/۴ درصد و ۷/۵ درصد افزایش است. در حالی که وجود الیاف در افزایش مقاومت خاک تثبیت‌نشده تأثیر چندانی ندارد. این امر بدان علت است که وجود الیاف در حضور چسباننده‌هایی نظیر سیمان و آهک و وقوع واکنش‌های پوزولانی، سبب درگیری بیشتر و بهتر سطوح الیاف با ذرات خاک شده است. همچنین با توجه به شکل ۴-د می‌توان مشاهده کرد که افزایش بیش از ۰/۴ درصد الیاف سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. علت این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که با زیادتر شدن میزان الیاف در توده خاک از مقدار بهینه، اتصال دانه‌ها ضعیف شده و قفل و بست بین آنها کاهش پیدا کرده است. در پژوهش حاضر و با استفاده از مقادیر الیاف مصرفی معرفی شده در جدول ۴ چنین مشاهده گردید که با استفاده از ۰/۴ درصد الیاف، بیشترین مقاومت فشاری در مقایسه با دیگر نمونه‌ها حاصل شده است. بدیهی است در صورت استفاده از مقادیر دیگری الیاف در طرح اختلاط (برای مثال ۰/۳ درصد یا ۰/۶ درصد) امکان افزایش مقاومت فشاری بیشتر از نمونه‌های مسلح شده با ۰/۴ درصد الیاف رد نمی‌گردد. با توجه به شکل ۴-ج و ۴-ب مشاهده شد الیاف در کنار سیمان و آهک علاوه بر افزایش مقاومت فشاری تک‌محوی، به نحو مطلوبی سبب شده‌اند تا گسیختگی در کرنش‌های بزرگ‌تری به وقوع بپیوندد و همین امر نشان‌دهنده این است که استفاده از الیاف در کنار تثبیت خاک به‌عنوان روشی نوین که مزایای تثبیت و تسلیح را در کنار هم دارد می‌تواند در پروژه‌هایی که هدف آنها بهبود پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری خاک به‌صورت هم‌زمان است مورد استفاده قرار گیرد.

### کنترل پارامترهای حاصل از آزمایش تک‌محوری

در اثر افزودن الیاف به خاک، به‌منظور بهسازی و تثبیت آن و نیز شکل‌پذیر کردن رفتار مصالح ممکن است مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه‌ها (در اثر استفاده از درصد خاصی از الیاف) افزایش یابد. این بهبودیافتگی را می‌توان با اصطلاح عامل بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری (I<sub>UCS</sub>) به‌صورت رابطه زیر بیان کرد.

$$I_{UCS} = \frac{q_{UR} - q_{UU}}{q_{UU}} \quad (۱)$$

در رابطه فوق،  $I_{UCS}$  عامل بهبود مقاومت فشاری تک‌محوی است و  $q_{UR}$  و  $q_{UU}$  به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مسلح با الیاف و خاک فاقد عامل تسلیح است و مقدار  $I_{UCS}$  هرچه بزرگ‌تر باشد حاکی از آن است که الیاف توانسته‌اند به نحو مطلوب‌تری عمل مسلح‌سازی را انجام دهند و مقاومت خاک مسلح شده را افزایش دهند. این پارامتر در جدول ۵ برای خاک تثبیت‌شده و مسلح (با درصد‌های مختلف الیاف) محاسبه و ارائه شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده شد  $I_{UCS}$  برای نمونه‌هایی که با ۰/۴ درصد الیاف مسلح شده‌اند، بیشترین مقدار را نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند و در نتیجه میزان الیاف بهینه برای تسلیح خاک موردنظر در طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش، مقدار ۰/۴ درصد است.

### بررسی تأثیر الیاف بر مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی مصالح

در پژوهش حاضر به منظور تعیین مدول الاستیسیته مصالح از شیب دیاگرام تنش-کرنش در ناحیه خطی استفاده شده است [۳۲]. با توجه به شکل ۵-ب می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش میزان الیاف، مدول الاستیسیته مصالح کاهش پیدا کرده است که این روند کاهش با تحقیقات انجام شده در مراجع [۱۲؛ ۲۹؛ ۳۳] مطابقت دارد. کرنش گسیختگی  $\epsilon_f$  نیز به عنوان کرنش متناظر با مقاومت فشاری تک‌محوری (کرنش متناظر با تنش حداکثر در دیاگرام تنش-کرنش) تعریف شده است. با توجه به مقادیر کرنش گسیختگی نمونه‌های مختلف در جدول ۵ و همچنین مقادیر پارامتر  $I_d$  در شکل ۵-الف چنین مشاهده شد که هرچه کرنش گسیختگی در مصالح بیشتر شود، نشان‌دهنده آن است که مصالح موردنظر رفتاری شکل‌پذیرتر داشته‌اند.

### بررسی تأثیر الیاف بر ضریب افزایش شکل‌پذیری مصالح

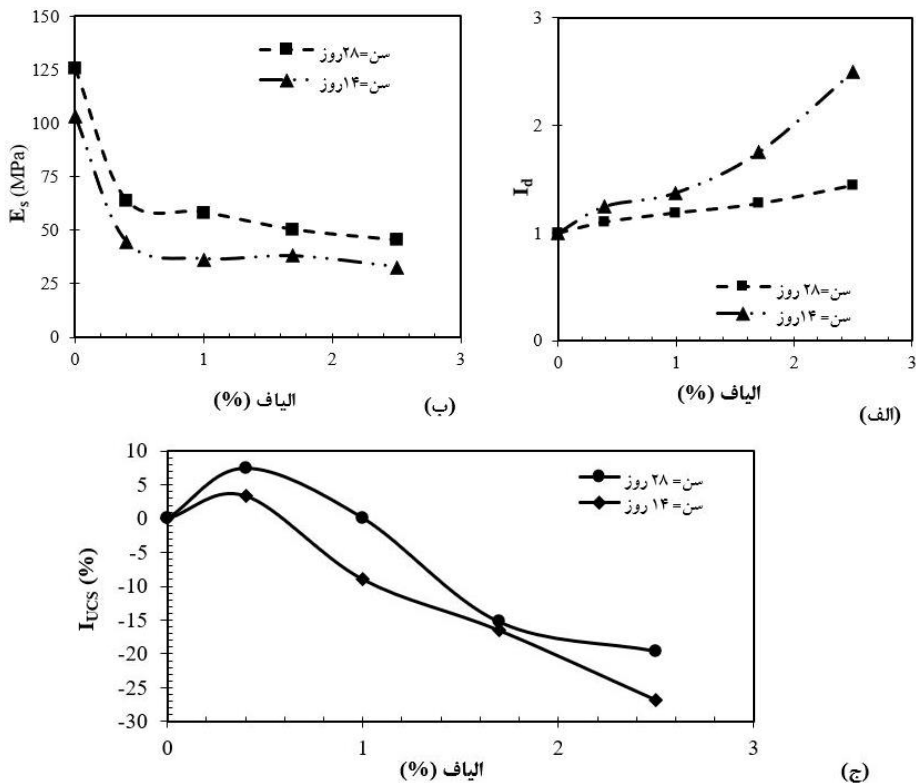
پارامتر دیگری که نشان‌دهنده میزان شکل‌پذیری رفتار خاک و سنگ می‌باشد، ضریب افزایش شکل‌پذیری است [۳۴]. این ضریب با رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$I_d = \frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{cu}} \quad (2)$$

که  $I_d$  ضریب افزایش شکل‌پذیری مصالح در اثر استفاده از الیاف بود و  $\epsilon_{ct}$  و  $\epsilon_{cu}$  به ترتیب کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح می‌باشد. با توجه به شکل ۵-الف می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش میزان الیاف، شکل‌پذیری افزایش پیدا کرده است. همچنین در نمونه‌های ۱۴ روزه به دلیل داشتن رطوبت بیشتر و سن عمل‌آوری پایین‌تر نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه شکل‌پذیری بیشتر است. در حالی که در نمونه‌های ۲۸ روزه مدول الاستیسیته، بیشتر از نمونه‌های ۱۴ روزه است (شکل ۵-ب). به‌طور کلی هرچه رطوبت مصالح بیشتر باشد، لغزش بین دانه‌های تشکیل‌دهنده آن راحت‌تر انجام می‌شود و باعث پایین آمدن مقاومت می‌گردد. برای مثال مقاومت یک خاک اشباع به مراتب کمتر از مقاومت همان خاک در حالت خشک است. هرچه سن نمونه بالاتر رود مقاومت و شکل‌پذیری آن نسبت به نمونه‌های دارای سن پایین‌تر به ترتیب بیشتر و کمتر خواهد شد. اما این مطلب به این معنا نیست که مثلاً در نمونه‌های با سن بالاتر، الیاف نقشی در افزایش شکل‌پذیری نخواهند داشت. وجود الیاف با توزیع تصادفی سبب کنترل عرض ترک‌ها می‌شود و در اثر استفاده از آنها در طرح اختلاط (فارغ از سن نمونه) افزایش شکل‌پذیری حاصل می‌گردد. به عبارت دیگر، آبی که در طرح اختلاط وارد واکنش با مواد چسباننده موجود می‌شود نیز به‌عنوان یک متغیر قادر خواهد بود تا بر شکل‌پذیری تأثیر داشته باشد. در شکل ۵-ج تغییرات عامل بهبود مقاومت فشاری ( $I_{UCS}$ ) در نمونه‌های با درصد الیاف مختلف و سن عمل‌آوری، متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-

ج مشاهده شد بیشترین رشد در مقاومت فشاری تک محوری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف مربوط به شرایطی است که ۰/۴ درصد الیاف در طرح اختلاط به کار رفته است.

در پژوهش حاضر، فلسفه اصلی استفاده از الیاف جلوگیری از گسترش ترک‌ها و شکل پذیر کردن رفتار مصالح بوده است. همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۵-الف و ب نشان داده شده است با افزایش میزان الیاف، شاخص شکل پذیری نسبت به نمونه‌های شاهد (نمونه‌های فاقد الیاف) روندی صعودی داشته اما با توجه به شکل ۵-ج در درصد الیاف ۰/۴ درصد مقاومت فشاری نیز به مقدار حداکثر خود رسیده است.



شکل ۵. تغییرات الف) شاخص شکل پذیری، ب) مدول الاستیسیته و ج)  $I_{ucs}$  در نمونه‌های با درصد الیاف مختلف.

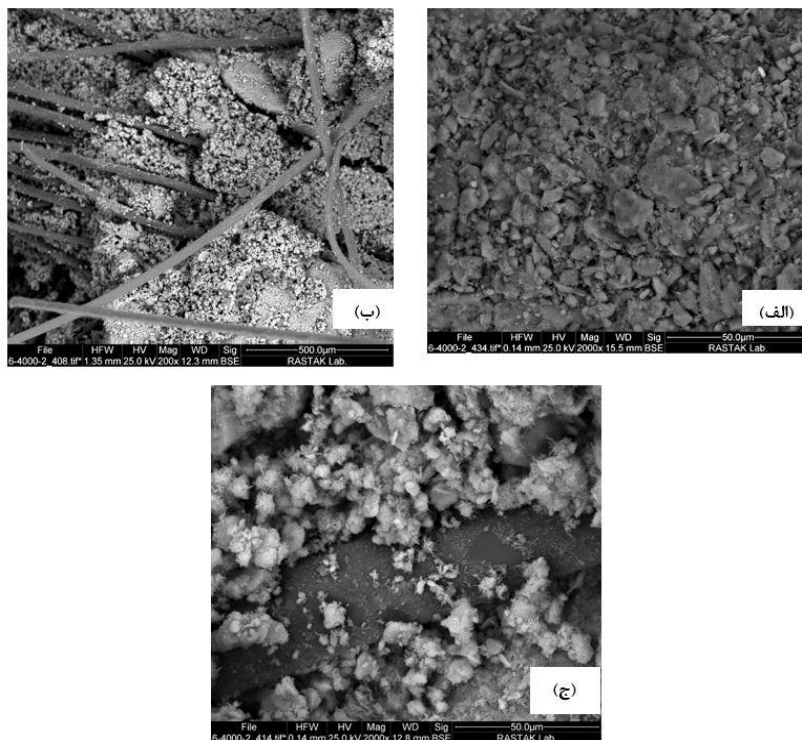
جدول ۵. پارامترهای مکانیکی محاسبه شده حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف و در شرایط نگهداری در گرمکن (دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد).

درصد الیاف (%)	سن عمل آوری	سیمان (%)	آهک (%)	$q_u$ (KPa)	$E_s$ (MPa)	$\varepsilon_f$ (%)	$I_d$	$I_{ucs}$
۰	۱۴	۴	۳	۹۵۷/۲۴	۱۰۳/۲۱	۱/۶۶۷	۱/۰۰	۰
۰/۴	۱۴	۴	۳	۹۸۹/۹۷	۴۴/۶۰	۲/۰۸۲	۱/۲۵	۳/۴۲
۱/۰	۱۴	۴	۳	۸۷۱/۵۲	۳۶/۷۵	۲/۲۹۰	۱/۳۸	-۸/۹۵
۱/۷	۱۴	۴	۳	۷۹۸/۸۹	۳۸/۰۴	۲/۹۱۵	۱/۷۵	-۱۶/۵۴
۲/۵	۱۴	۴	۳	۷۰۰/۲۹	۳۲/۹۵	۴/۱۶۴	۲/۵۰	-۲۶/۸۴

درصد الیاف (%)	سن عمل آوری	سیمان (%)	آهک (%)	$q_u$ (KPa)	$E_s$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$I_d$	$I_{ucs}$
۰	۲۸	۴	۳	۱۰۵۰/۸۳	۱۲۵/۷۳	۲/۴۵۱	۱/۰۰	۰
۰/۴	۲۸	۴	۳	۱۱۲۹/۸۸	۶۳/۹۳	۲/۷۰۶	۱/۱۰	۷/۵۲
۱/۰	۲۸	۴	۳	۱۰۵۲/۵۳	۵۸/۴۳	۲/۹۱۵	۱/۱۹	۰/۱۶
۱/۷	۲۸	۴	۳	۸۹۰/۲۷	۵۰/۲۱	۳/۱۲۳	۱/۲۷	-۱۵/۲۸
۲/۵	۲۸	۴	۳	۸۴۴/۹۰	۴۵/۳۲	۳/۵۳۹	۱/۴۴	-۱۹/۶۰

### بررسی و تفسیر عکس‌های الکترونی روبشی (SEM)

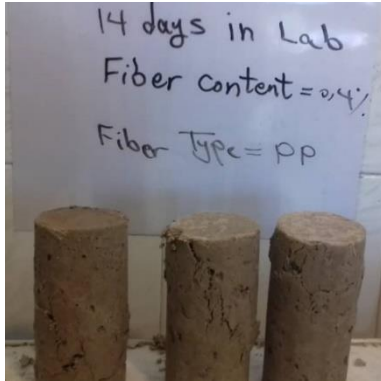
برای بررسی آنالیز ریزساختاری نمونه‌ها، عکس‌برداری الکترونی روبشی با استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاه پرتونگاری رستاک تهران روی نمونه‌های موردنظر صورت پذیرفت. نتایج نشان داد در خاک رس تثبیت‌نشده، حفرات زیادی وجود دارد که به‌طور تصادفی در توده خاک پخش شده‌اند (شکل ۶-الف). در صورتی که خاک تثبیت‌شده با سیمان و آهک به دلیل واکنش‌های پوزولانی صورت گرفته و تشکیل CSH، CAH و CASH دارای ساختاری متراکم‌تر، مستحکم‌تر و حفرات کمتری در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده است (شکل ۶-ب). این امر سبب می‌شود پارامترهای مقاومتی خاک نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته بهبود یابد. با توجه به شکل ۶-الف مشاهده شد سطح الیاف با کانی‌های خاک رس به‌خوبی پوشانده شده و همین امر سبب اصطکاک بین الیاف و خاک شده است. الیاف در یک شبکه سه‌بعدی، دانه‌های خاک را محصور کرده است، قفل و بست آنها را بالا برده و تغییر مکان آنها را همانند یک عضو مفید شده کاهش داده‌اند (شکل ۶-ب). در نتیجه نه الیاف به‌راحتی می‌توانند در درون خاک حرکت کنند و نه دانه‌های خاک به‌آسانی می‌توانند از سطوح الیاف جدا شوند و هرچه چسبندگی بین الیاف و توده خاک بیشتر شود (خاک تثبیت‌شده در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده) نقش الیاف برای بهبود پارامترهای مقاومتی چشمگیرتر شده است. به عبارت دیگر در خاک تثبیت‌شده نسبت به خاک تثبیت‌نشده، الیاف دارای راندمان کاری بهتری در تقویت مصالح هستند. با توجه به شکل ۶-ب مشاهده می‌شود هنگامی که نمونه مسلح شده بارگذاری می‌شود و در محلی ترک می‌خورد، الیاف همانند یک پل با تحمل نیروی کششی از باز شدن و گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده‌اند و به همین دلیل سبب رفتار شکل‌پذیر خاک شده‌اند. همچنین با پخش شدن الیاف در درون جسم خاک (مانند ریشه گیاهان در درون زمین) نیروهای واردشده، پخش و از تمرکز تنش و بروز ترک، ممانعت می‌شود. همچنین شکل ۶-ج به‌خوبی نشان‌دهنده پوشش مناسب الیاف به‌وسیله فراورده‌های حاصل از واکنش‌های پوزولانی (که سوزنی شکل است) می‌باشد. با توجه به اینکه در خاک مسلح‌شده و تثبیت‌نشده در مقایسه با خاک مسلح‌شده و تثبیت‌شده، اثری از واکنش‌های پوزولانی نمی‌باشد، تنها عاملی که نقش کلیدی در بالا بردن مقاومت‌ها و بهبود رفتار خاک را بر عهده دارد، اندرکنش بین سطوح الیاف و دانه‌های خاک می‌باشد و این در حالی است که اندرکنش بین سطوح الیاف و محصولات حاصل از فراورده‌های پوزولانی در خاک تثبیت‌شده که با قدرت بیشتری (نسبت به خاک تثبیت‌نشده) دانه‌های خاک را به الیاف می‌چسبانند، عامل اساسی در بهبود رفتار خاک است.



شکل ۶. عکس‌های SEM (الف) محصولات حاصل از واکنش‌های پوزولانی که به الیاف چسبیده‌اند، (ب) شبکه ایجاد شده توسط الیاف، (ج) خاک تثبیت‌نشده و دارای حفرات زیاد.

### بررسی تأثیر الیاف بر الگوی شکست نمونه‌ها

خاک تثبیت‌شده بدون الیاف، رفتاری ترد دارد و اولین ترک سبب بروز گسیختگی نهایی می‌شود. به عبارت دیگر اولین ترک، آخرین ترک نیز می‌باشد. در شکل ۷-الف مشاهده شده که ترک در این نوع نمونه‌ها عریض و طویل می‌باشد و از بالا تا پایین نمونه گسترش پیدا کرده است. در نمونه‌های مسلح‌شده، ترک‌های کشتی متعددی در نمونه قبل از شکست ظاهر شده‌اند و الیاف موجود که یک سر آن‌ها در دیواره سمت چپ و سر دیگر آن‌ها در دیواره سمت راست ترک قرار دارد همانند یک عضو کشتی عمل کرده و از باز شدن عرض ترک‌ها جلوگیری کرده‌اند. با توجه به شکل ۷-ب و ۷-د مشاهده می‌شود که با افزایش میزان الیاف در جسم خاک، تعداد ترک‌ها بیشتر و عرض آنها کمتر شده و همین امر سبب افزایش کرنش گسیختگی و شکل‌پذیر شدن رفتار نمونه‌های خاک شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷. الگوی شکست در نمونه‌ها (الف) ترک عریض و طولیل در نمونه فاقد الیاف، ب و د) ترک‌های غیرممتد، کوتاه و کم‌عرض در اثر استفاده از الیاف، ج) نقش پل زدن الیاف و کنترل عرض ترک‌ها.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های متعدد مقاومت فشاری تک‌محوری به‌منظور مطالعه تأثیر استفاده از الیاف بر مقاومت و رفتار مکانیکی نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با سیمان و آهک صورت پذیرفت. تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و شکل‌پذیری نمونه‌ها بررسی شد. اندرکنش بین الیاف و جسم خاک با استفاده از عکس‌برداری الکترونی روبشی (SEM) نیز مطالعه شد. نتایج شاخص حاصل از آزمایش‌های فوق به شرح ذیل بیان می‌گردند:

- وجود الیاف در خاک تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش گسیختگی شده است. همچنین افزایش میزان الیاف در خاک، افت مقاومت پس از گسیختگی را کاهش داده و سبب کاهش سختی نمونه‌ها گردیده است.

- ۲- استفاده از الیاف در کنار تثبیت کننده‌هایی نظیر سیمان و آهک در مقایسه با استفاده از الیاف به تنهایی، مقاومت نمونه‌ها را به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است؛ به نحوی که در نمونه‌های تثبیت شده در صورت استفاده از ۰/۴ درصد الیاف مقاومت نمونه‌های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب ۳/۴ درصد و ۷/۵ درصد (نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف) افزایش یافته است.
- ۳- مقدار الیاف بهینه در نمونه‌های تثبیت شده با ۳ درصد آهک و ۴ درصد سیمان، ۰/۴ درصد به دست آمد. همچنین با افزایش میزان الیاف (بیشتر از مقدار بهینه ۰/۴ درصد) از مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها کاسته شده است. علت این امر را می‌توان بدین صورت بیان کرد که افزایش الیاف بیشتر از مقدار بهینه، سبب شده تا تماس دانه‌های خاک (به دلیل وجود الیاف) با یکدیگر کم شود و قفل بست بین آنها کاهش یابد.
- ۴- نقش الیاف در کنترل عرض ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آنها به‌عنوان عاملی مؤثر در تغییر رفتار خاک از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر می‌باشد و رفتار خاک را از حالت کرنش نرم‌شونده به کرنش سخت‌شونده تغییر داده است.
- ۵- با استفاده از تصاویر عکس‌برداری الکترونی روبشی مشاهده شد که در خاک تثبیت نشده، اندرکنش بین سطوح الیاف و دانه‌های خاک، نقش کلیدی در بالا بردن مقاومت‌ها و تغییر رفتار خاک را بر عهده دارد و این در حالی است که در خاک تثبیت شده اندرکنش بین سطوح الیاف و فراورده‌های ناشی از واکنش‌های پوزولانی نقش اساسی در تغییر رفتار خاک را بر عهده دارد.
- ۶- استفاده از الیاف در کنار تثبیت خاک، روشی است که مزایای تسلیح و تثبیت را در کنار هم دارد و از این روش می‌توان در پروژه‌های عمرانی که نیاز به بهسازی خاک است استفاده کرد.
- ۷- با افزایش میزان الیاف در طرح اختلاط، شاخص شکل‌پذیری افزایش می‌یابد در حالی که مقاومت فشاری تک‌محوری تا میزان الیاف ۰/۴ درصد روندی صعودی داشته و از آن به بعد روندی نزولی را طی کرده است.

## References

- [1] Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., & Chaiprakaikeow, S. (2006). Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.04.003>
- [2] Aiban, S. A. (1994). A study of sand stabilization in Eastern Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 38(1), 65-79. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90025-6)
- [3] Saberian, M., & Khabiri, M. M. (2018). Effect of oil pollution on function of sandy soils in protected deserts and investigation of their improvement guidelines (case study: Kalmand area, Iran). *Environmental Geochemistry and Health*, 40(1), 243-254. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9897-y>
- [4] Chemedá, Y. C., Deneele, D., Christidis, G. E., & Ouvrard, G. (2015). Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles. *Applied Clay Science*, 107, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.019>
- [5] Dash, S. K., & Hussain, M. (2015). Influence of Lime on Shrinkage Behavior of Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015041. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001301](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001301)
- [6] Azadegan, O., & Li, J. (2015). Effects of lime and cement treated platform on the behavior of circular footing founded on soft clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(2), 214-221. <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000041>

- [7] Esaifan, M., Khoury, H., Aldabsheh, I., Rahier, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2016). Hydrated lime/potassium carbonate as alkaline activating mixture to produce kaolinitic clay based inorganic polymer. *Applied Clay Science*, 126, 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.026>
- [8] Garzón, E., Cano, M., O'Kelly, B. C., & Sánchez-Soto, P. J. (2016). Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, 329-334. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.042>
- [9] Jahandari, S., Toufigh, M. M., Li, J., & Saberian, M. (2018). Laboratory Study of the Effect of Degrees of Saturation on Lime Concrete Resistance Due to the Groundwater Level Increment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 413-424. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0335-4>
- [10] Jahandari, S., Saberian, M., Tao, Zh., Mojtahedi, S. F., Li, J., Ghasemi, M., Rezvani, S. S., & Li, W. (2019). Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes. *Cold Regions Science and Technology*, 160(1), 242-251. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.02.011>
- [11] Schnaid, F., Prietto, P. D. M., & Consoli, N. C. (2001). Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 857-868. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(857\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(857))
- [12] Park, S-S. (2011). Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1134-1138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.017>
- [13] Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., & Ulbrich, L. A. (1998). Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1211-1214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(1998\)124:12\(1211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(1998)124:12(1211))
- [14] Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., & Prietto, P. D. M. (2003). Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 96-101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:1\(96\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:1(96))
- [15] Kaniraj, S. R., & Havanagi, V. G. (2001). Behavior of Cement-Stabilized Fiber-Reinforced Fly Ash-Soil Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 574-584. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(5\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(5))
- [16] Maher, M., & Ho, Y. (1993). Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal*, 16(3), 330-338. <https://doi.org/10.1520/GTJ10054J>
- [17] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- [18] Park, S-S. (2009). Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.001>
- [19] Shukla, S. K. (2017). *Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3063-5>
- [20] Falorca, I., & Pinto, M. (2011). Effect of short, randomly distributed polypropylene microfibrils on shear strength behaviour of soils. *Geosynthetics International*, 18(1), 2-11. <https://doi.org/10.1680/gein.2011.18.1.2>

- [21] Jafari, M., & Esna-ashari, M. (2012). Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.012>
- [22] Hamidi, A., & Hooresfand, M. (2013). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.10.005>
- [23] Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., & Ovando-Shelley, E. (2015). Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.003>
- [24] Saghari, S., Bagheri, G., & Shabanzadeh, H. (2015). Evaluation of permeability characteristics of a polymer fibers-reinforced soil through laboratory tests. *Journal of the Geological Society of India*, 85(2), 243-246. <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0210-y>
- [25] Hidalgo Signes, C., Garzón-Roca, J., Martínez Fernández, P., Garrido de la Torre, M. E., & Insa Franco, R. (2016). Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres. *Applied Clay Science*, 132-133, 768-773. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.027>
- [26] Butt, W. A., Mir, B. A., & Jha, J. N. (2016). Strength Behavior of Clayey Soil Reinforced with Human Hair as a Natural Fibre. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 411-417. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9953-x>
- [27] Gelder, C., & Fowmes, G. J. (2016). Mixing and compaction of fibre-and lime-modified cohesive soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 169(2), 98-108. <https://doi.org/10.1680/grim.14.00025>
- [28] Wei, L., Chai, S. X., Zhang, H. Y., & Shi, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, 172, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>
- [29] Duan, X-l., & Zhang, J-s. (2019). Mechanical Properties, Failure Mode, and Microstructure of Soil-Cement Modified with Fly Ash and Polypropylene Fiber. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019(2), 1-13. <https://doi.org/10.1155/2019/9561794>
- [30] Valipour, M., Shourijeh, P. T., & Mohammadinia, A. (2021). Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 27, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>
- [31] Saberian, M., Li, J., Kilmartin-Lynch, S., & Boroujeni, M. (2021). Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase. *Science of The Total Environment*, 769(112), 145527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145527>
- [32] Tang, L., Cong, S., Geng, L., Ling, X., & Gan, F. (2018). The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils. *Cold Regions Science and Technology*, 145, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.004>
- [33] Li, L., Shao, W., Li, Y., & Cetin, B. (2015). Effects of Climatic Factors on Mechanical Properties of Cement and Fiber Reinforced Clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(3), 537-548. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9838-4>
- [34] Karaca, Z., & Onargan, T. (2012). A new approach to stone deformation: stone deformability index. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 165(3), 189-195. <https://doi.org/10.1680/coma.9.00031>