



Effect of different fiber combinations on density and unrestricted compressive strength of clay

H.R. Sadrarhami^{1*}, R. Ajalloeian²

¹ Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT: In recent years, a lot of research has been done on soil reinforced with different fibers. However, in most of these studies, one type of fiber has been used and less attention has been paid to the problems of combining different fibers. Also, the use of waste fibers has been less considered economically and environmentally. Therefore, in this study, the shear strength of clay has been investigated using 5 types of fibers including industrial steel, scrap steel, glass, polypropylene and straw, individually and in combination. The research process is that first, a control design is prepared from fiber-free soil. Then, soil samples were prepared with the mentioned fibers individually with the values of 0.5, 0.75 and 1%. And in the third stage, samples of soil with fibers, in dual composition including: industrial steel and glass, industrial steel and polypropylene, glass and polypropylene, scrap steel and straw with weight percentages (0.25 and 0.75), (0.5 and 0.5) and (0.75 and 0.25), respectively. Finally, the maximum specific gravity and uniaxial compressive strength of all designs have been studied and compared. The results of this study showed that among the samples made with one type of fiber, glass with a value of 1%, the highest specific gravity and compressive strength, and among binary compounds, a combination of industrial steel and glass with a value of (0.75 0.25%), the highest specific gravity and with the amount (0.25 and 0.75%), the highest compressive strength is obtained.

Review History:

Received: Nov. 06, 2020

Revised: Jul. 09, 2021

Accepted: Aug. 12, 2021

Available Online: Aug. 31, 2021

Keywords:

Clay

industrial steel fibers

Glass fibers

Uniaxial compressive strength

Dual composition

1- Introduction

Soil has always been used by humans as a building material, but due to insufficient tensile strength and weak shear strength, designers have always had to use physical processes (such as compaction and drainage) and chemical processes (such as stabilization) or increase this resistance by placing resistant elements (weapons). The issue of reinforced soil was first scientifically addressed by the French engineer and architect Henri Vidal. Vidal defined reinforced soil as a composite material of soil and reinforcing elements. In this composite system, the soil grains are responsible for withstanding the compressive forces and the reinforcement element increases the shear strength of the soil by withstanding tensile stresses [1].

In recent years, research has been conducted on fiber-reinforced soils: Kaoshiket has investigated soil bearing capacity (CBR) on soils reinforced with waste fibers. In this study, four different percentages of fibers with values of 0.3, 0.4, 0.5 and 0.6 have been used and it has been concluded that soil bearing capacity with 0.4% of fibers has the highest efficiency [2]. Hosseini, in his research, using LFRF fibers, which also insulate sound, moisture and heat, has achieved a kind of light soil with high resistance for use in rural houses

to deal with earthquakes, as well as for the restoration of ancient houses. The test results show that by adding 0.75% of LFRF fibers to the soil, the desired strength and goal can be achieved [3]. Oliveira, in his research, used coconut fibers as natural and cheap fibers with 0.5%, 1 and 2% as soil reinforcers and investigated the geotechnical behavior of reinforced soils. The results indicate that by increasing the percentage of fibers to 1%, it has improved soil properties [4].

In most of these studies, one type of fiber has been used and less has been done on the effect of combining several fibers. The use of waste fibers has also received less economic and environmental attention.

2- Methodology

In this research, the geotechnical properties of clay, including unit weight by volume, unlimited compressive strength of soil and shear strength using 5 types of fibers including: industrial steel, scrap steel, glass, polypropylene and straw, have been investigated individually and in combination. First, a control design is prepared from fiber-free soil. Then, soil samples were prepared with the mentioned fibers individually with the values of 0.5, 0.75 and 1%. And in

*Corresponding author's email: h.sadrarhami@sci.iaun.ac.ir



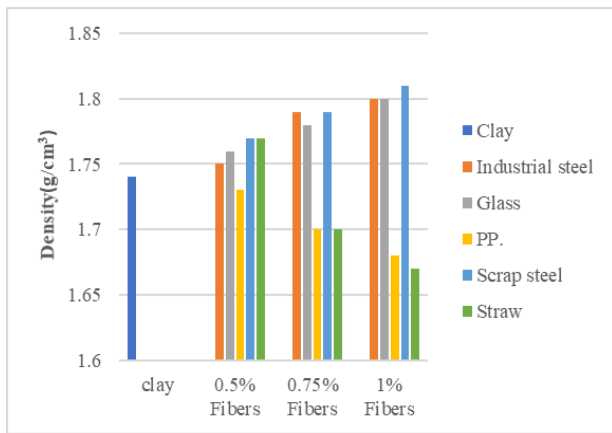


Fig. 1. Graph of the density of soil combined with five kinds of fibers and with different percentages individually

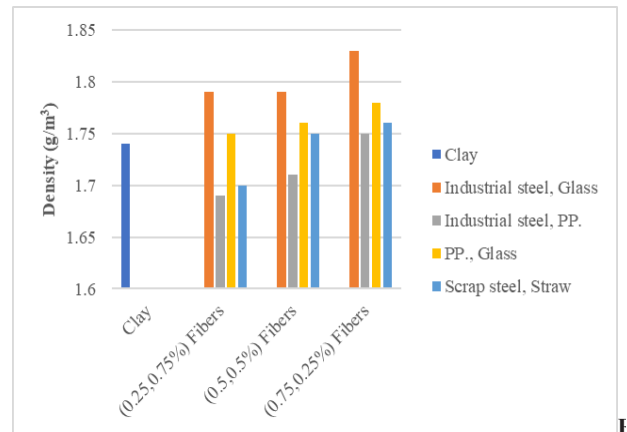


Fig. 2. Graph of the density of soil combined with fibers in pairs and with different percentages

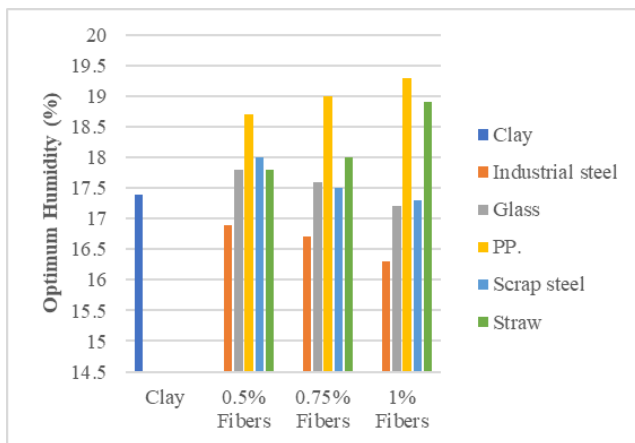


Fig. 3. Diagram of the optimal humidity of soil

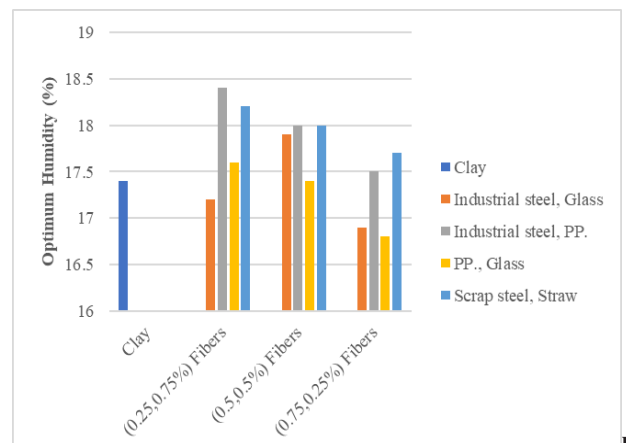


Fig. 4. Graph of optimal humidity of soil combined with fibers in pairs and with different percentages

the third stage, samples of soil with fibers, in the form of dual composition including: industrial steel and glass, industrial steel and polypropylene, glass and polypropylene, scrap steel and straw with weight percentages (0.25 and 0.75), (0.5 and 0.5) and (0.75 and 0.25), prepared. Finally, the density and uniaxial compressive strength of all designs have been evaluated and compared according to ASTM D698 [5] and ASTM D2166 [6] standards.

3- Results and Discussion

In Figures 1 and 2, the results of the density test, in Figures 3 and 4, the results of optimal humidity and in Figures 5 and 6, the results of compressive strength of reinforced soil with one type of fiber and the combination of two types of fibers with different percentages are presented:

4- Conclusions

In general, the following can be concluded from the data of this research:

a) The addition of fibers of industrial steel, scrap steel

and glass has increased by about 4% and the addition of polypropylene and straw fibers has increased by about 1% by the density of soil.

b) The addition of fibers of industrial steel and scrap steel by 30%, glass fibers 45% and polypropylene and straw fibers 40%, has increased the compressive strength of the soil.

c) By comparing the results between fibers in single compounds, it can be concluded that the performance of glass fibers has been better than other fibers in improving soil conditions. On the other hand, the use of polypropylene fibers and, to some extent straw fibers has increased the ductility and softness of reinforced soil, which can be used in the field of repair, restoration and also the construction of clay bricks.

d) In the composition part, depending on the use of fibers in each composition, different results have been obtained. Thus, in the compounds used in glass fibers, the compressive strength, in the compounds used in steel fibers, the density, and in the compounds used in polypropylene and straw, the optimum humidity and ductility increased.

e) In general, the performance of industrial steel,

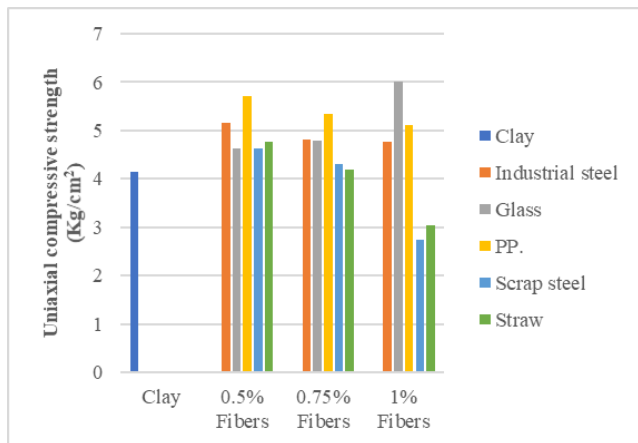


Fig. 5. Uniaxial compressive strength diagram of soil that combined with five kinds of fibers and with different percentages individually

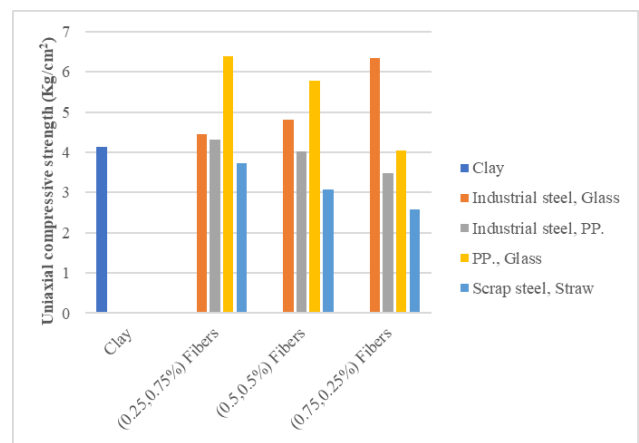


Fig. 6. Diagram of uniaxial compressive strength of soil combined with five kinds of fibers and with different percentages as a pairs compound

polypropylene and glass has been better than scrap steel and straw. And this shows that synthetic fibers are of higher quality and its use is superior to other fibers. However, the use of waste and plant fibers is economically and environmentally justifiable and appropriate in projects such as the restoration of archeological and historical monuments, temporary embankments, access roads, the foundation of low importance structures and similar cases.

f) The use of more fiber combinations (triplets and more) is questionable both in terms of use and functionality and requires further research.

References

[1] F. Schlosser, P. Delage, Reinforced soil retaining structures and polymeric materials, in: *The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures*, Springer, (1988) 3-65.

[2] R. Kaushik, T. Sharma, Influence of waste polypropylene fibers on resilient modulus of clay soil, *Int. J. Res. Advent*

Technol, 7(1) (2019) 251-255.

[3] M. Zaryoun, M. Hosseini, Lightweight fiber-reinforced clay as a sustainable material for disaster resilient architecture of future buildings, *Architectural Engineering and Design Management*, 15(6) (2019) 430-444.

[4] A. de Oliveira Júnior, J.F. Jucá, J. Ferreira, L. Guilherme, Geotechnical Behavior and Soil-Fiber Interaction of Clayey Soil Mixed with Randomly Dispersed Coconut Fibers, *Soils and Rocks*, 42 (2019) 127-138.

[5] ASTM D-698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, (2012).

[6] ASTM D-2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, (2013).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H.R. Sadrarhami, R. Ajalloeian, *Effect of different fiber combinations on density and unrestricted compressive strength of clay*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 215-218.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19164.7108





بررسی تأثیر ترکیب الیاف گوناگون بر تراکم و مقاومت فشاری محصور نشدهی خاک رس

حمیدرضا صدرارحامی^{۱*}، رسول اجل لوییان^۲

۱-دانشکده عمران، دانشگاه آزاد نجف آباد، نجف آباد، ایران

۲-دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

خاک رس

الیاف، وزن واحد حجم

مقاومت فشاری تک محوره

ترکیب دوگانه

خلاصه: در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی خاک مسلح به الیاف مختلف انجام شده است. لیکن در اکثر این تحقیقات از یک نوع الیاف استفاده و کمتر به تأثیر ترکیب چند الیاف پرداخته شده است. همچنین استفاده از الیاف ضایعاتی از نظر اقتصادی و محیط زیست نیز، کمتر مورد توجه بوده است. لذا در این تحقیق به بررسی مقاومت برشی خاک رس با استفاده از ۵ نوع الیاف شامل: فولاد صنعتی، فولاد ضایعاتی، شیشه، پلی پروپیلن و کاه به صورت تکی و ترکیبی پرداخته شده است. روند تحقیق به این صورت است که ابتدا یک طرح شاهد از خاک بدون الیاف تهیه شده است. سپس، نمونه‌هایی از خاک، با الیاف‌های ذکر شده به صورت تکی با مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪، تهیه شده است. و در مرحله سوم، نمونه‌هایی از خاک با الیاف، به صورت ترکیب دوتایی شامل: فولاد صنعتی و شیشه، فولاد صنعتی و پلی پروپیلن، شیشه و پلی پروپیلن، فولاد ضایعاتی و کاه با درصد‌های وزنی (۰/۲۵ و ۰/۷۵)، (۰/۵ و ۰/۷۵) و (۰/۲۵ و ۰/۷۵)، تهیه شده است. در نهایت وزن واحد حجم و مقاومت فشاری تک محوره‌ی کلیه طرح‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده که در بین نمونه‌های ساخته شده با یک نوع الیاف، شیشه با مقدار ۱٪، بیشترین وزن واحد حجم و مقاومت فشاری، و در بین ترکیب‌های دوتایی، ترکیب فولاد صنعتی و شیشه، با مقدار (۰/۷۵ و ۰/۲۵٪)، بیشترین وزن واحد حجم و با مقدار (۰/۲۵ و ۰/۷۵٪)، بیشترین مقاومت فشاری حاصل شده است.

۱- مقدمه

شد. ویدال خاک مسلح را به عنوان ماده‌ای مرکب از خاک و الیاف تسلیح تعریف کرد. در این سیستم مرکب، دانه‌های خاک، وظیفه‌ی تحمل نیروهای فشاری را بر عهده دارند و الیاف تسلیح با تحمل تنش‌های کششی، مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد. الیاف به عنوان یکی از انواع الیاف تسلیح، جهت افزایش مقاومت برشی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی خاک مسلح به الیاف انجام شده است. کائوشیک^۲ [۲] ظرفیت باربری خاک (CBR) را روی خاک مسلح به الیاف ضایعاتی مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق از چهار درصد مختلف الیاف با مقادیر ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ استفاده و نتیجه گرفته است که ظرفیت باربری خاک با میزان ۰/۴٪ الیاف، بیشترین بازده را به همراه دارد. حسینی^۳ [۳] در تحقیق خود با استفاده از الیاف LFRC^۴ که عایق صدا، رطوبت و حرارت نیز می‌باشد به نوعی خاک سبک با مقاومت بالا جهت استفاده در خانه‌های روستایی برای مقابله با زلزله و همچنین جهت

خاک به عنوان یکی از مصالح ساختمانی همواره مورد استفاده‌ی بشر بوده است، لیکن به سبب ناکافی بودن مقاومت کششی و ضعف مقاومت برشی آن، طراحان همیشه مجبور بوده‌اند با استفاده از فرآیندهای فیزیکی (نظیر تراکم و زهکشی) و فرآیندهای شیمیایی (نظیر تثبیت) یا با قرار دادن عناصر مقاوم (تسلیح) این مقاومت را افزایش دهند. تثبیت خاک به روش‌های مکانیکی در مورد خاک‌های یکنواخت و غیرقابل تراکم چندان موثر نمی‌باشد. تثبیت چنین خاک‌هایی با روش‌های شیمیایی متداول، نظیر افزودن سیمان، آهک یا قیر موثر بوده و می‌تواند خواص خاک را به طور چشمگیر افزایش دهد. عموماً این گونه افزودنی‌ها به میزان ۴ تا ۱۰٪ وزنی خاک خشک با خاک مخلوط می‌شوند. اما این گونه افزودنی‌ها هزینه‌ی اجرای پروژه را به میزان قابل توجهی بالا می‌برد. برای نخستین بار مبحث خاک مسلح به صورت علمی توسط مهندس و معمار فرانسوی، هانری ویدال^۱ مطرح

2 R.Kaushik

3 M.Hosseini

4 Lightweight fiber-reinforced clay

1 R. Vidal

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.sadrarhami@sci.iaun.ac.ir



مقاومت فشاری محدود نشده‌ی خاک و مقاومت برشی با استفاده از ۵ نوع الیاف شامل: فولاد صنعتی، فولاد ضایعاتی، شیشه، پلی‌پروپیلن و کاه به صورت ترکیبی و ترکیبی پرداخته شده است.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

خاک رس مصرفی در این تحقیق از زمین‌های شرق اصفهان (گردنه‌ی زینل) تهیه شده است. مشخصات خاک مصرفی در جدول ۱ و در شکل ۱ نیز نمودار دانه‌بندی خاک نشان داده شده است.

در این تحقیق از ۵ نوع الیاف، شامل فولاد صنعتی، فولاد ضایعاتی، شیشه، پلی‌پروپیلن و کاه استفاده شده است. الیاف‌های فولاد صنعتی و شیشه از شرکت میسون واقع در تهران (شکل‌های ۲ و ۵)، الیاف فولاد ضایعاتی از کارگاه‌های تراشکاری واقع در شهرک صنعتی امیرکبیر اصفهان (شکل ۳)، الیاف پلی‌پروپیلن از شرکت نوین بتن واقع در شهرک صنعتی اشرجان اصفهان (شکل ۴) و در نهایت الیاف کاه از مزارع گندم واقع در حومه‌ی شهر اصفهان تهیه شده است (شکل ۶). لازم به توضیح است الیاف فولاد ضایعاتی، پس از جمع‌آوری از کارگاه‌های تراشکاری، جداسازی، تفکیک و به اندازه‌های مورد نیاز بریده و سپس سطح آن از روغن و مواد زائد تمیز شده است. الیاف‌های فولاد، به خصوص ضایعاتی دارای لبه‌های تیز و آسیب‌رسان می‌باشند که باید تمهیدات لازم در هنگام استفاده از آن‌ها به عمل آید. الیاف‌های شیشه و پروپیلن نیز بعضاً به هم چسبیده بودند که باید الیاف‌ها به نحو مطلوب از هم جدا و سپس مورد استفاده قرار گیرند. این کار زمان نسبتاً زیادی را به خصوص در حجم بالا نیاز دارد که محقق باید زمان مورد نیاز را در روند انجام پروژه مد نظر داشته باشد. بهتر است پس از جداسازی جهت جلوگیری از به هم چسبیده شدن مجدد، این الیاف با آب اختلاط مخلوط و سپس مورد استفاده قرار گیرد. الیاف‌های کاه در حالت خشک احتیاج چندانی به آماده‌سازی ندارند. اگر کاه خیس باشد بهتر است که ابتدا خشک گردد و سپس مورد استفاده قرار گیرد. مشخصات هر کدام از الیاف‌ها در جدول ۲ آمده است.

همچنین جهت جلوگیری از اثرات نامطلوب احتمالی آب در ترکیب با خاک و الیاف، آب مصرفی در این پروژه، از سیستم لوله‌کشی آب شرب مورد استفاده در آزمایشگاه تهیه شده است.

مرمت خانه‌های باستانی دست پیدا نموده است. نتایج آزمایش نشان داده که با اضافه نمودن ۰/۷۵٪ از الیاف LFRC به خاک می‌توان به مقاومت و هدف مورد نظر دست پیدا نمود. البیورا^۱ [۴] در تحقیق خود از الیاف نارگیل به عنوان الیاف طبیعی و ارزان و با سه درصد ۰/۵، ۱ و ۲ به عنوان مسلح کننده در خاک استفاده کرده و رفتار ژئوتکنیکی خاک مسلح را مورد بررسی قرار داده است. نتایج حاصل شده حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف تا میزان ۱٪ باعث بهبود خواص خاک شده است. چنگ و همکاران^۲ [۵] در تحقیق خود مقاومت فشاری محدود نشده‌ی خاک رس مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان را مورد بررسی قرار دادند. الیاف پلی‌پروپیلن به عنوان تقویت کننده‌ی فیزیکی و سیمان به عنوان مکمل شیمیایی جهت مسلح نمودن و تقویت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه‌ی حاصل از آن نشان داده که استفاده‌ی همزمان از این دو باعث افزایش و بهبود خواص مکانیکی خاک رس می‌گردد. شارما^۳ [۶] اثرات همزمان الیاف پلی‌پروپیلن، سیمان و خاکستر ساقه‌های نیشکر را در خاک رس مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق از درصدهای مختلف الیاف و سیمان استفاده شد و نتیجه گرفت که استفاده‌ی همزمان از الیاف و سیمان مقاومت خاک، به خصوص در بخش دوام نسبت به زمانی که فقط از الیاف و یا سیمان استفاده می‌شود بیشتر شده است. دایان^۴ [۷] اثر انجماد و ذوب خاک رس را با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، آهک و دوده‌ی سیلیس مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق از سه درصد مختلف الیاف و دوده سیلیس با مقدار ثابت آهک استفاده و نتایج حاصله نشان داد که استفاده از ۰/۲۵٪ از الیاف همراه با ۱۰٪ دوده سیلیس موجب افزایش دوام خاک و بیش از آن اثر منفی در مقاومت در برابر انجماد و ذوب دارد. میرزابابایی و همکاران^۵ [۸] در تحقیقی که انجام دادند اثرات همزمان الیاف و پلی‌وینیل‌الکل را بر دوام خاک رس در معرض رطوبت مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از درصدهای مختلف الیاف و پلی‌وینیل استفاده و نشان داده شد که استفاده‌ی همزمان از این دو ماده تأثیر قابل توجهی بر دوام و مقاومت خاک در برابر رطوبت دارد.

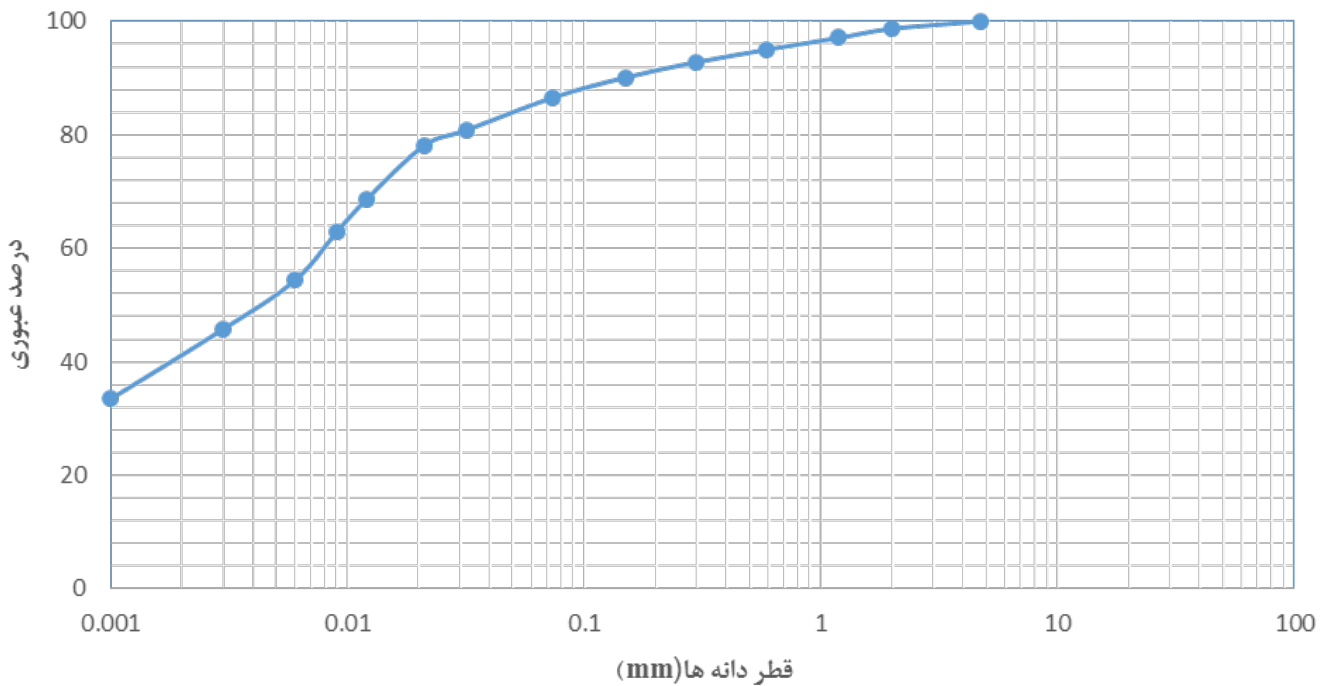
در اکثر این تحقیقات از یک نوع الیاف استفاده و کمتر به تأثیر ترکیب دو و یا چند الیاف پرداخته شده است. همچنین استفاده از الیاف ضایعاتی از نظر اقتصادی و محیط زیست نیز، کمتر مورد توجه بوده است. لذا در این تحقیق به بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک رس شامل وزن واحد حجم،

- 1 A.I. Oliveira
- 2 Q. Cheng, J. Zhang, N. Zhou, Y. Guo, S. Pan
- 3 T. Sharma
- 4 M. Dayan
- 5 M. Mirzababaei, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس مصرفی

Table 1. Physical characteristics of consumed clay

مرجع	مقدار	مشخصات فیزیکی
ASTM D4318 [9]	۲۱/۵۶	حد خمیری (PL)
ASTM D4318 [9]	۳۴/۰۱	حد روانی (LL)
ASTM D4318 [9]	۱۲/۴۵	شاخص خمیری (PI)
ASTM C127 [10]	۱/۴۲	وزن واحد حجم (gr/cm^3)
ASTM D854 [11]	۲/۶۴	وزن مخصوص خشک دانه‌ها (Gs)
ASTM D698 [12]	۱/۷۴	حداکثر چگالی خشک (gr/cm^3)
ASTM D698 [12]	۱۷/۴	رطوبت بهینه (%)
	۷/۸	PH خاک
ASTM D2487 [13]	CL	طبقه بندی خاک



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک رس [۱۴]

Fig. 1. Clay granulation diagram



شکل ۳. الیاف فولادی ضایعاتی

Fig. 3. Scrap steel fibers



شکل ۲. الیاف فولاد صنعتی

Fig. 2. Industrial steel fibers



شکل ۵. الیاف شیشه

Fig. 5. Glass fibers



شکل ۴. الیاف پلی پروپیلن

Fig. 4. Polypropylene fibers



شکل ۶. الیاف کاه

Fig. 6. Straw fibers

جدول ۲. مشخصات الیاف‌های مصرفی [۱]

Table 2. Specifications of consumable fibers

کاه	پلی پروپیلن	شیشه	فولاد ضایعاتی	فولاد صنعتی	مشخصات الیاف
۰/۲	۰/۹	۲/۶	۷/۱	۷/۸	وزن واحد حجم (g/cm ³)
۲-۱	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۱۰±۲	۱۰±۲	قطر (mm)
۲۰-۶	۱۲	۱۲	۲۵۰±۲	۲۵۰±۲	طول (mm)
-----	۵	۸۰	-----	۲۰۰	ضریب ارتجاعی (GPa)
-----	۰/۵	۴-۲	-----	۳-۱	مقاومت کششی (GPa)
-----	۲۰	۳-۲/۵	-----	۴-۳	کرنش گسیختگی (%)
متوسط	خوب	عالی	متوسط	خوب	دوام در شرایط خوردگی

۲-۲ نام‌گذاری نمونه‌ها

به دلیل اینکه در طرح‌های ساخته شده، از خاک رس و الیاف استفاده گردیده است، لذا در کلیه‌ی طرح‌ها مقدار خاک رس ثابت در نظر گرفته شده و فقط الیاف با نوع و مقدار مختلف به عنوان پارامتر متغیر در هر طرح استفاده شده است. با توجه به کثرت نمونه‌ها و تنوع در مقدار الیاف، جهت سهولت در شناسایی نمونه‌ها و استفاده از یک قاعده‌ی مشخص، از عبارت زیر استفاده گردیده است:

$$\left(\begin{array}{c} \text{درصد الیاف} \\ \text{قسمت سوم} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{نوع الیاف} \\ \text{قسمت دوم} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{نحوه اختلاط الیاف} \\ \text{قسمت اول} \end{array} \right)$$

حرف اول قسمت اول، نشانه‌ی این است که الیاف به صورت تکی یا ترکیبی استفاده شده است. حرف S برای الیاف تکی و حرف C برای الیاف ترکیبی در نظر گرفته شده است. حرف دوم قسمت دوم، نشانه‌ی نوع الیاف می‌باشد. حرف S1 برای فولاد صنعتی، حرف P برای پلی پروپیلن، حرف G برای شیشه، حرف S2 برای فولاد ضایعاتی و حرف S برای کاه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در این قسمت اگر الیاف به صورت ترکیبی باشد از دو حرف استفاده می‌گردد (مثلاً G,P یعنی الیاف شیشه و پلی پروپیلن). در قسمت سوم نیز درصد الیاف استفاده شده ذکر گردیده است. به طور مثال (C-S1,G-۰.۷۵,۰.۲۵) یعنی ترکیب فولاد صنعتی و شیشه به مقدار ۰/۷۵٪ فولاد صنعتی و ۰/۲۵٪ شیشه.

جدول ۳. وزن واحد حجم و رطوبت بهینه‌ی هر طرح

Table 3. Density and optimal humidity of each design

رطوبت بهینه (%)	وزن واحد حجم (g/cm ³)	درصد الیاف					طرح
		کاه	فولاد ضایعاتی	پلی پروپیلن	شیشه	فولاد صنعتی	
۱۷/۴	۱/۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	خاک رس
۱۶/۹	۱/۷۵	۰	۰	۰	۰	۰/۵	(S-S ₁ -0.5)
۱۶/۷	۱/۷۹					۰/۷۵	(S-S ₁ -0.75)
<u>۱۶/۳</u>	۱/۸					۱	(S-S ₁ -1)
۱۷/۸	۱/۷۶				۰/۵		(S-G-0.5)
۱۷/۶	۱/۷۸				۰/۷۵		(S-G-0.75)
۱۷/۲	۱/۸				۱		(S-G-1)
۱۸/۷	۱/۷۳			۰/۵			(S-P-0.5)
۱۹	۱/۷			۰/۷۵			(S-P-0.75)
<u>۱۹/۳</u>	۱/۶۸			۱			(S-P-1)
۱۸	۱/۷۷		۰/۵				(S-S ₂ -0.5)
۱۷/۵	۱/۷۹		۰/۷۵				(S-S ₂ -0.75)
۱۷/۳	<u>۱/۸۱</u>		۱				(S-S ₂ -1)
۱۷/۸	۱/۷۷	۰/۵					(S-S-0.5)
۱۸	۱/۷	۰/۷۵					(S-S-0.75)
۱۸/۹	<u>۱/۶۷</u>	۱					(S-S-1)

۳-۲- آزمایش‌های انجام شده

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت برشی مستقیم می‌باشد.

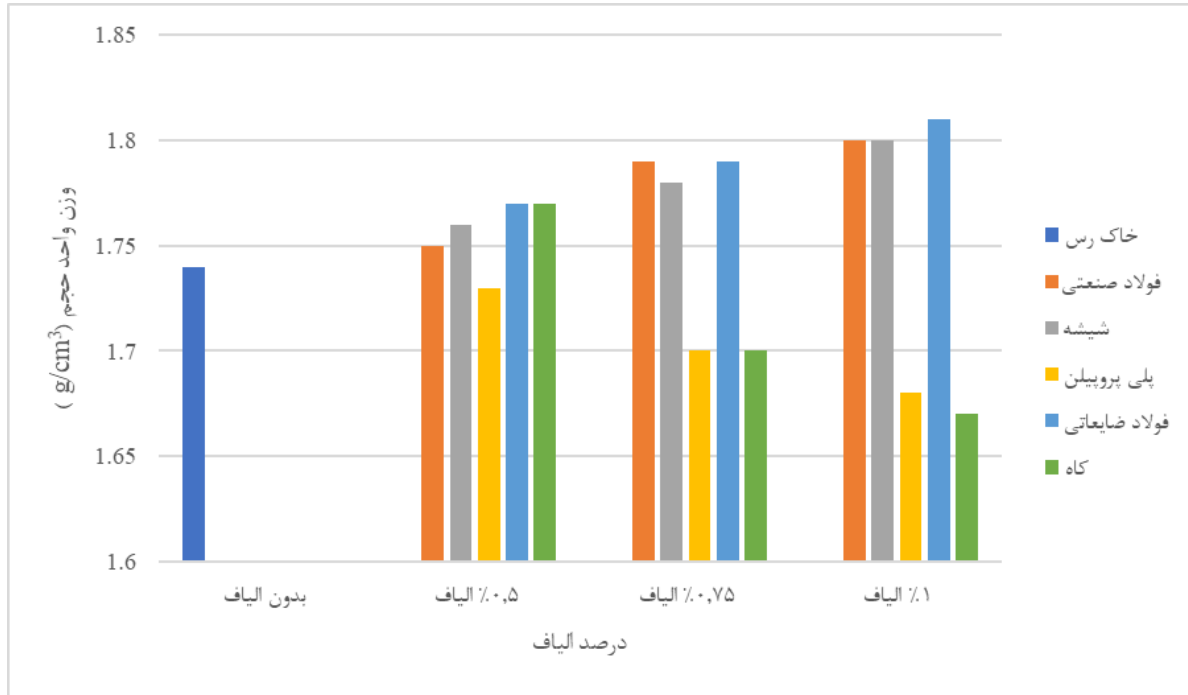
آزمایش تعیین حداکثر وزن واحد حجم طبق استاندارد ASTM D698 [۱۲] انجام شده است. آزمایش فشاری تک محوری روش سریعی برای تعیین C_{II} (مقاومت برشی زهکشی نشده) خاک‌های رسی است که بر اساس استاندارد ASTM D2166 [۱۵] انجام می‌گیرد. به طوری که با تعیین مقاومت تک محوری و نصف کردن مقدار آن، می‌توان مقدار مقاومت برشی را به دست آورد ($q_{II}=2C_{II}$). آزمایش برش مستقیم نیز طبق استاندارد ASTM D4767 [۱۵] انجام گرفته است و بر اساس آن پارامترهای برشی خاک شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت برشی خاک به دست آمده است.

۳-۱- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش تراکم خاک مسلح شده با یک نوع الیاف

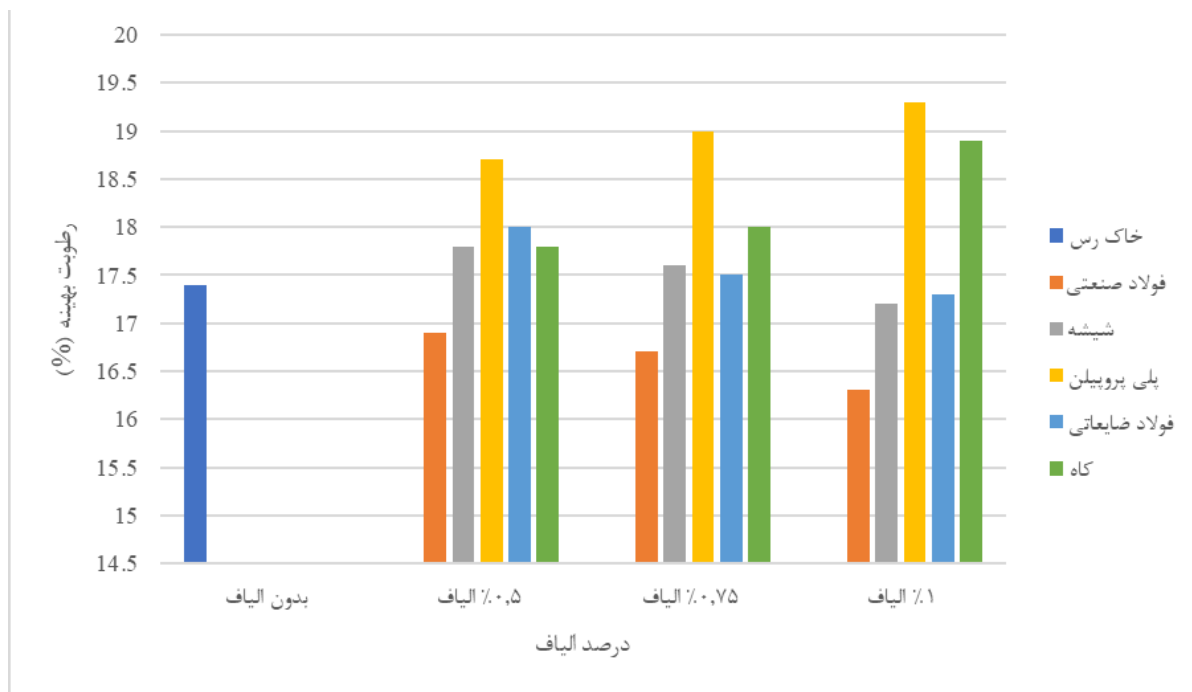
در این بخش نتایج آزمایش تراکم خاک مسلح شده با یک نوع الیاف شامل وزن واحد حجم و رطوبت بهینه‌ی هر ترکیب آورده شده است. همانطور که گفته شد الیاف‌ها شامل پنج نوع که هر کدام با درصدهای ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ با خاک ترکیب شده است که جمعاً شامل ۱۵ طرح می‌باشد. در جدول ۳ نتایج عددی و در شکل‌های ۷ و ۸ نیز نمودار میله‌ای نتایج آورده شده است. از جدول ۳ و از نمودارهای ۷ و ۸ نتایج زیر حاصل شده است:

- در خاک مسلح شده با الیاف فولاد صنعتی، ضایعاتی و شیشه، با افزایش درصد الیاف، میزان وزن واحد حجم افزایش و میزان رطوبت بهینه کاهش پیدا نموده است. ولی در خاک مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن و کاه، با افزایش درصد الیاف، میزان وزن واحد حجم کاهش و میزان رطوبت بهینه



شکل ۷. نمودار وزن واحد حجم خاک مخلوط شده با پنج نوع الیاف و با درصدهای مختلف به صورت تکی

Fig. 7. Graph of density of soil that combined with five kind of fibers and with different percentages individually



شکل ۸. نمودار میزان رطوبت بهینه‌ی طرح‌های ترکیبی خاک با یک نوع الیاف و با درصدهای مختلف

Fig.8. Diagram of the optimal humidity of soil composite designs with one kind of fibers and with different percentages

جدول ۴. وزن واحد حجم و رطوبت بهینه‌ی خاک رس ترکیب شده با دو نوع الیاف

Table 4. Density and optimal humidity of clay that combined with two kind of fibers

رطوبت بهینه (%)	وزن واحد حجم (g/cm ³)	درصد الیاف				طرح
		کاه	فولاد ضایعاتی	پلی پروپیلن	شیشه فولاد صنعتی	
۱۷/۴	۱/۷۴	.	.	.	.	خاک رس
۱۶/۹	<u>۱/۸۳</u>	.	.	.	۰/۲۵	(C-S ₁ ,G-0.75,0.25)
۱۷/۹	۱/۷۹	.	.	.	۰/۵	(C-S ₁ ,G-0.5,0.5)
۱۷/۲	۱/۷۹	.	.	.	۰/۷۵	(C-S ₁ ,G-0.25,0.75)
۱۷/۵	۱/۷۵	.	.	۰/۲۵	۰/۷۵	(C-S ₁ ,P-0.75,0.25)
۱۸	۱/۷۱	.	.	۰/۵	۰/۵	(C-S ₁ ,P-0.5,0.5)
<u>۱۸/۴</u>	<u>۱/۶۹</u>	.	.	۰/۷۵	۰/۲۵	(C-S ₁ ,P-0.25,0.75)
<u>۱۶/۸</u>	۱/۷۸	.	.	۰/۲۵	۰/۷۵	(C-G,P-0.75,0.25)
۱۷/۴	۱/۷۶	.	.	۰/۵	۰/۵	(C-G,P-0.5,0.5)
۱۷/۶	۱/۷۵	.	.	۰/۷۵	۰/۲۵	(C-G,P-0.25,0.75)
۱۷/۷	۱/۷۶	۰/۲۵	۰/۷۵	.	.	(C-S ₂ ,S-0.75,0.25)
۱۸	۱/۷۵	۰/۵	۰/۵	.	.	(C-S ₂ ,S-0.5,0.5)
۱۸/۲	۱/۷	۰/۷۵	۰/۲۵	.	.	(C-S ₂ ,S-0.25,0.75)

۳-۲- نتایج آزمایش تراکم خاک مسلح شده با ترکیب دو نوع الیاف در این بخش نتایج خاک مسلح شده از ترکیب دوگانه‌ی الیاف شامل وزن واحد حجم و رطوبت بهینه‌ی هر طرح آورده شده است. هر ترکیب دوگانه شامل سه طرح با درصدهای (۰/۲۵ و ۰/۷۵)، (۰/۵ و ۰/۷۵) و (۰/۲۵ و ۰/۷۵) می‌باشد که جمعاً شامل ۱۲ طرح می‌باشد. در جدول ۴ مقادیر عددی و در اشکال ۹ و ۱۰ نمودار میله‌ای نتایج آورده شده است.

از جدول ۴ و از نمودارهای ۹ و ۱۰ نتایج زیر حاصل شده

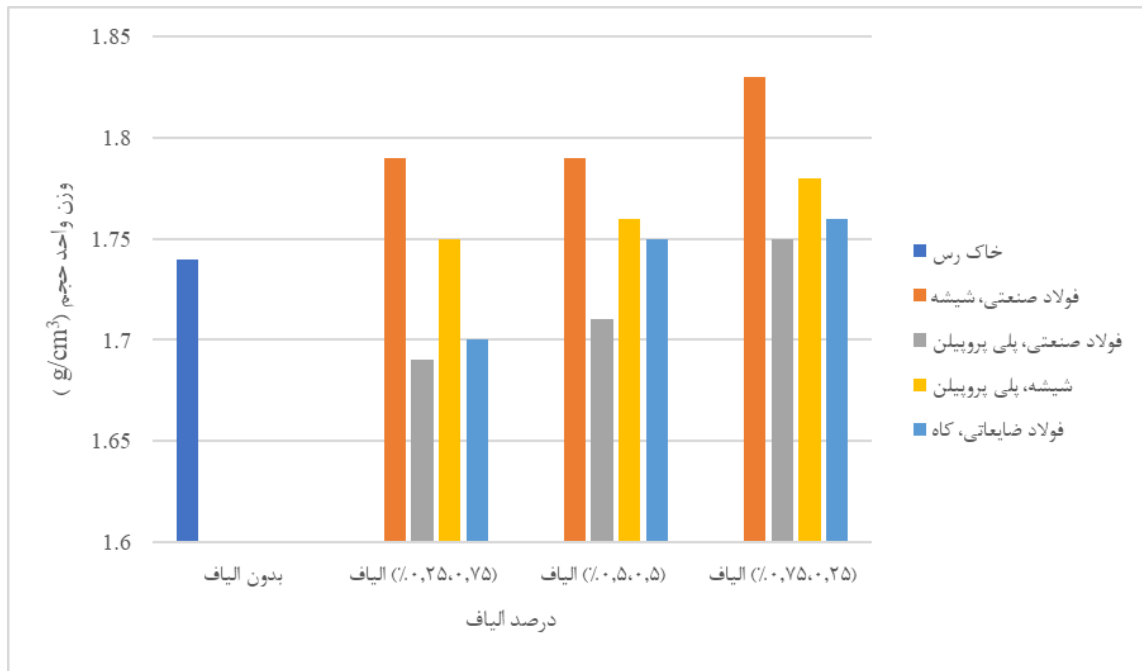
است:

- بیشترین وزن واحد حجم مربوط به ترکیب فولاد صنعتی و شیشه با (۰/۷۵ و ۰/۲۵) الیاف و به میزان ۱/۸۳ g/cm³ می‌باشد که نسبت به خاک بدون الیاف ۵/۲٪ افزایش داشته است. همچنین بیشترین رطوبت بهینه نیز مربوط به ترکیب فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن با (۰/۲۵ و ۰/۷۵) و به مقدار ۱۸/۴٪ می‌باشد که نسبت به خاک بدون الیاف ۶/۹٪ افزایش داشته است.

افزایش پیدا نموده است. دلیل افزایش وزن واحد حجم خاک با الیاف‌های فولادی و شیشه، به دلیل بالا بودن وزن واحد حجم این گونه الیاف در مقایسه با الیاف‌های پلی‌پروپیلن و کاه می‌باشد. از طرفی افزایش میزان رطوبت الیاف پلی‌پروپیلن و کاه نسبت به دیگر الیاف‌ها به دلیل ماهیت جذب آب این گونه از الیاف می‌باشد.

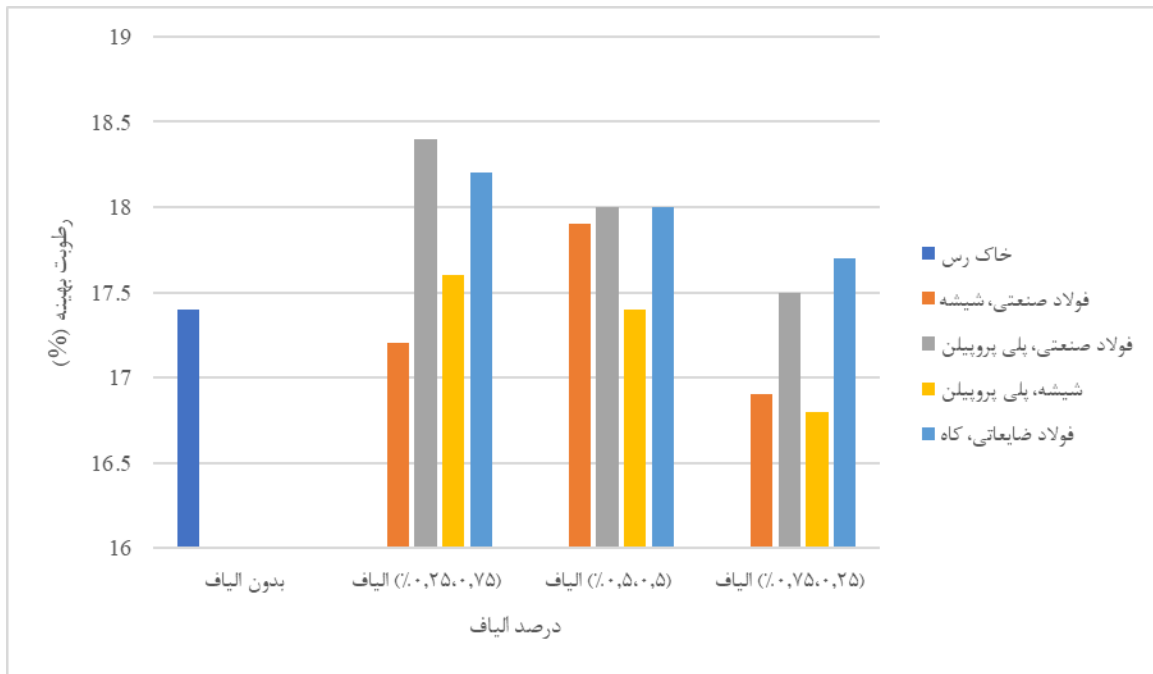
- بیشترین وزن واحد حجم در ترکیب‌های به دست آمده مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ الیاف فولاد ضایعاتی و به میزان ۱/۸۱ g/cm³ بوده است. که نسبت به خاک بدون الیاف ۴٪ افزایش داشته است. همچنین بیشترین رطوبت بهینه مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن و به میزان ۱۹/۳٪ بوده است که نسبت به خاک بدون الیاف ۱۰/۹٪ افزایش نشان می‌دهد.

- کمترین وزن واحد حجم در ترکیب‌های به دست آمده مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ کاه و به میزان ۱/۶۷ g/cm³ بوده است. که نسبت به خاک بدون الیاف ۴٪ کاهش داشته است. همچنین کمترین رطوبت بهینه مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ فولاد صنعتی و به میزان ۱۶/۳٪ که نسبت به خاک بدون الیاف ۶/۳٪ کاهش داشته است.



شکل ۹. نمودار وزن واحد حجم خاک ترکیب شده با الیاف به صورت دوتایی و با درصدهای مختلف

Fig. 9. Graph of density of soil combined with fibers in pairs and with different percentages



شکل ۱۰. نمودار رطوبت بهینه‌ی خاک ترکیب شده با الیاف به صورت دوتایی و با درصدهای مختلف

Fig.10. Graph of optimal humidity of soil combined with fibers in pairs and with different percentages

جدول ۵. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری حاصل از ترکیب خاک رس با پنج نوع از الیاف به صورت تکی و با درصدهای مختلف

Table 5. Uniaxial compressive strength values combining clay with five kind of fibers individually and with different percentages

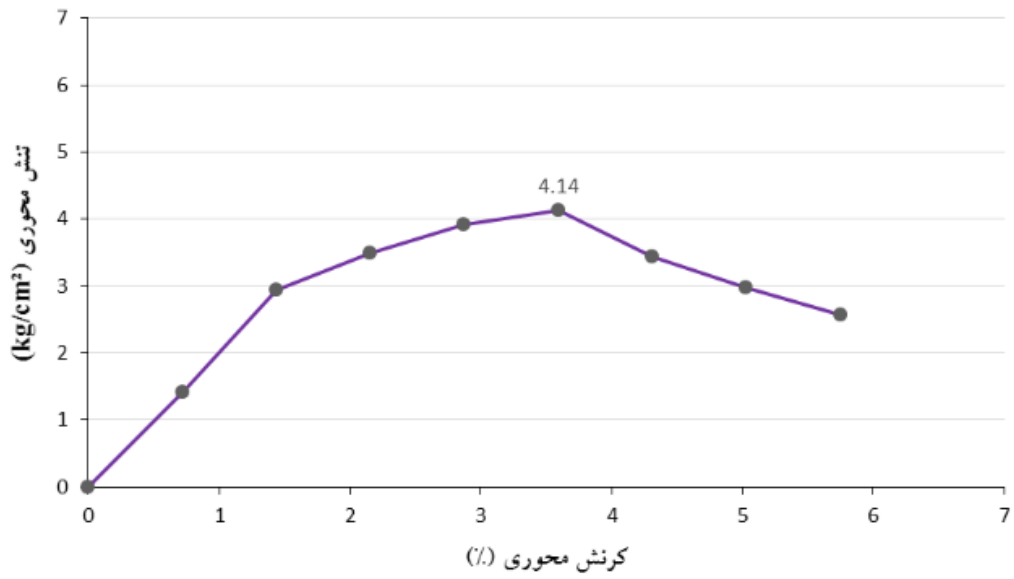
مقاومت فشاری (kg/cm ²)	درصد الیاف					طرح
	کاه	فولاد ضایعاتی	پلی پروپیلن	شیشه	فولاد صنعتی	
۴/۱۴	.	.	.	.	.	خاک رس
۵/۱۵					۰/۵	(S-S ₁ -0.5)
۴/۸۱					۰/۷۵	(S-S ₁ -0.75)
۴/۷۶					۱	(S-S ₁ -1)
۴/۶۳				۰/۵		(S-G-0.5)
۴/۸				۰/۷۵		(S-G-0.75)
<u>۶/۰۲</u>				۱		(S-G-1)
۵/۷۲			۰/۵			(S-P-0.5)
۵/۳۵			۰/۷۵			(S-P-0.75)
۵/۱۲			۱			(S-P-1)
۴/۶۳		۰/۵				(S-S ₂ -0.5)
۴/۳۱		۰/۷۵				(S-S ₂ -0.75)
<u>۲/۷۵</u>		۱				(S-S ₂ -1)
۴/۷۶	۰/۵					(S-S-0.5)
۴/۲	۰/۷۵					(S-S-0.75)
۳/۰۳	۱					(S-S-1)

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک مسلح شده با یک نوع الیاف

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی خاک مسلح ترکیب شده با پنج نوع از الیاف به صورت تکی همراه با نتیجه‌ی مقاومت فشاری تک محوری خاک بدون الیاف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نحوه‌ی ترکیب الیاف و تعداد طرح‌ها مشابه قسمت قبلی می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر عددی نتایج و در اشکال ۱۱ الی ۱۶ نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری هر کدام از الیافها آورده شده است. همچنین در شکل ۱۷ نمودار میله‌ای نتایج نشان داده شده است.

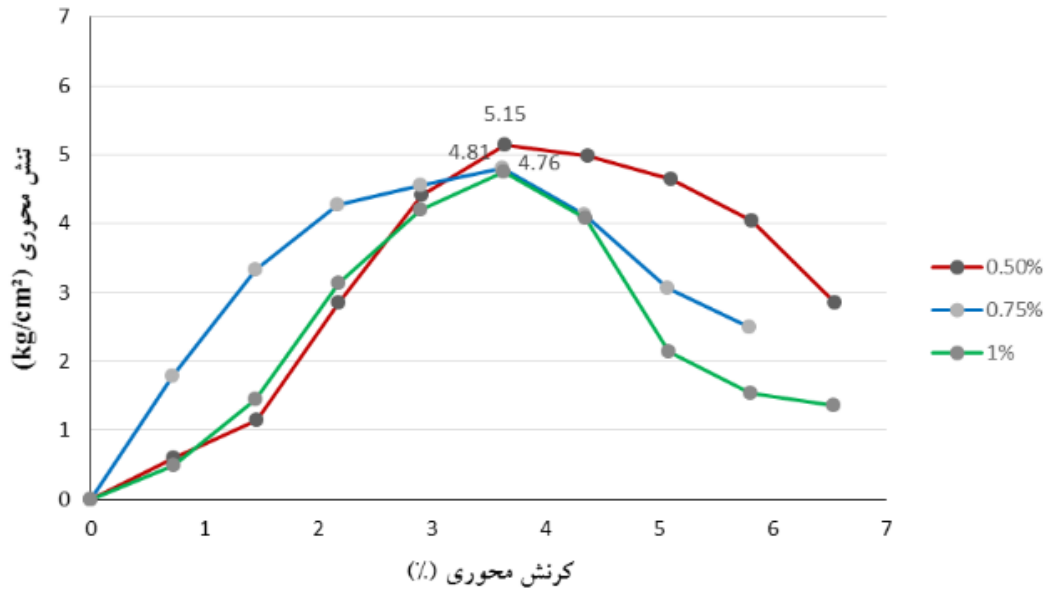
- کمترین وزن واحد حجم مربوط به ترکیب فولاد صنعتی و پلی پروپیلن، با (۰/۷۵ و ۰/۲۵٪) الیاف و به میزان ۱/۶۹ g/cm³ که نسبت به خاک بدون الیاف ۲/۹٪ کاهش داشته است. همچنین کمترین رطوبت بهینه نیز مربوط به ترکیب شیشه و پلی پروپیلن با ترکیب (۰/۷۵ و ۰/۲۵٪) و به میزان ۱۶/۸٪ است که نسبت به خاک بدون الیاف ۳/۵٪ کاهش داشته است.

- پلی پروپیلن و کاه به دلیل جذب آب، در ترکیب‌هایی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عموماً میزان رطوبت بهینه را افزایش داده‌اند. از طرفی وجود فولاد صنعتی و ضایعاتی و شیشه به دلیل بالا بودن وزن مخصوصشان، باعث افزایش وزن واحد حجم در ترکیب‌ها شده است.



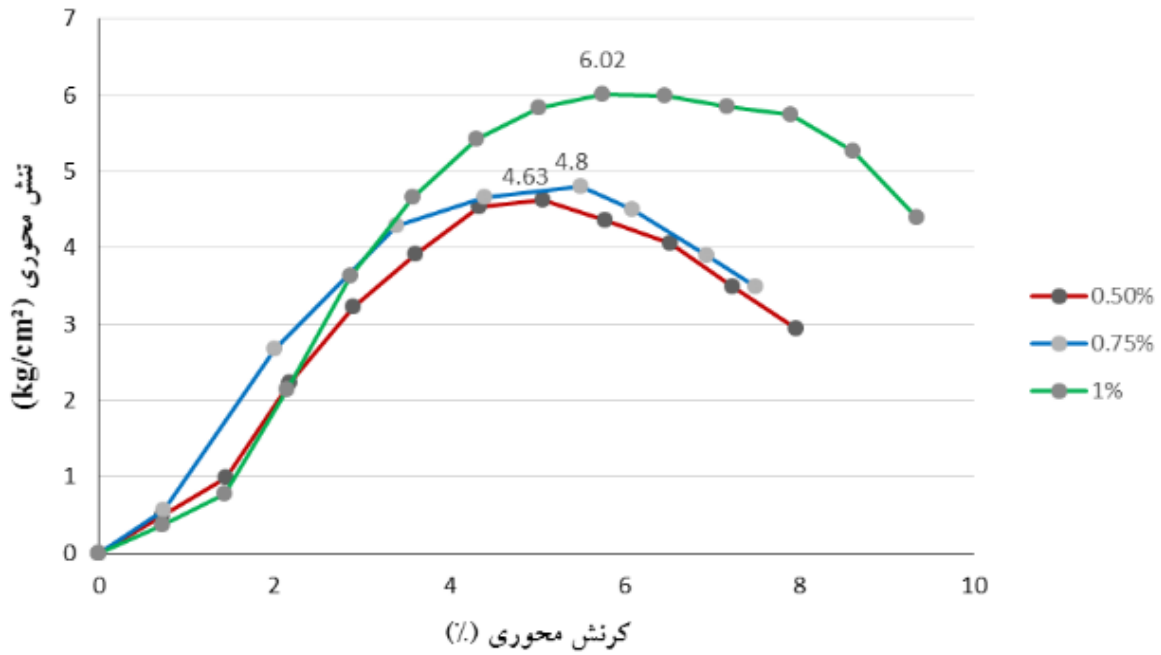
شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش خاک رس بدون الیاف

Fig. 11. Diagram of Stress - strain of clay without fibers



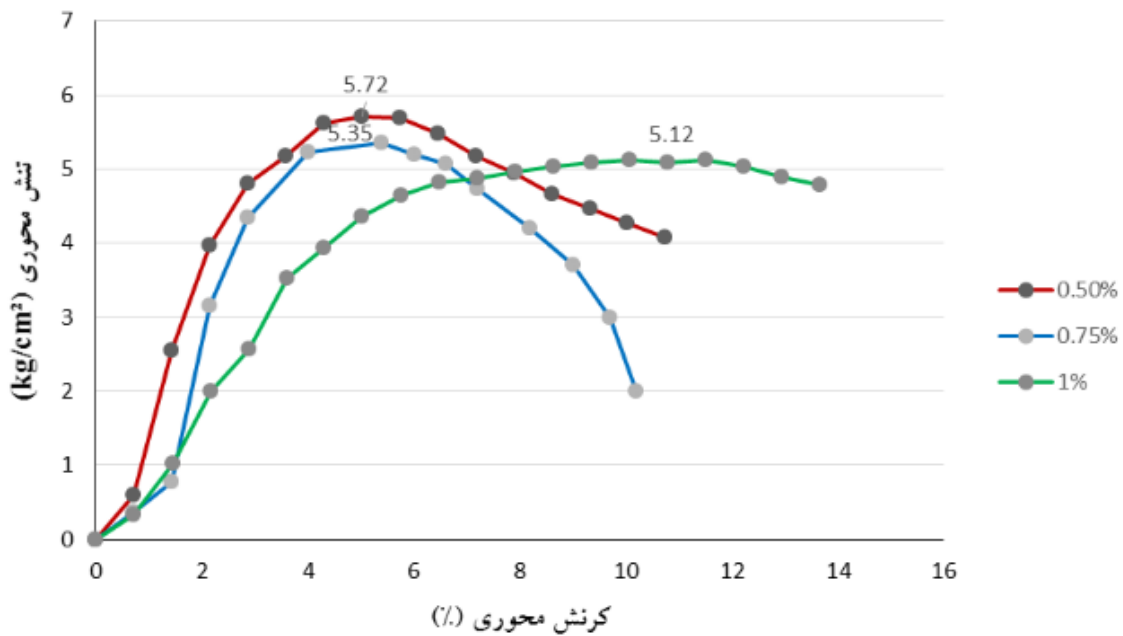
شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش خاک با الیاف فولاد صنعتی

Fig. 12. Diagram of Stress - strain of clay with Industrial steel fibers



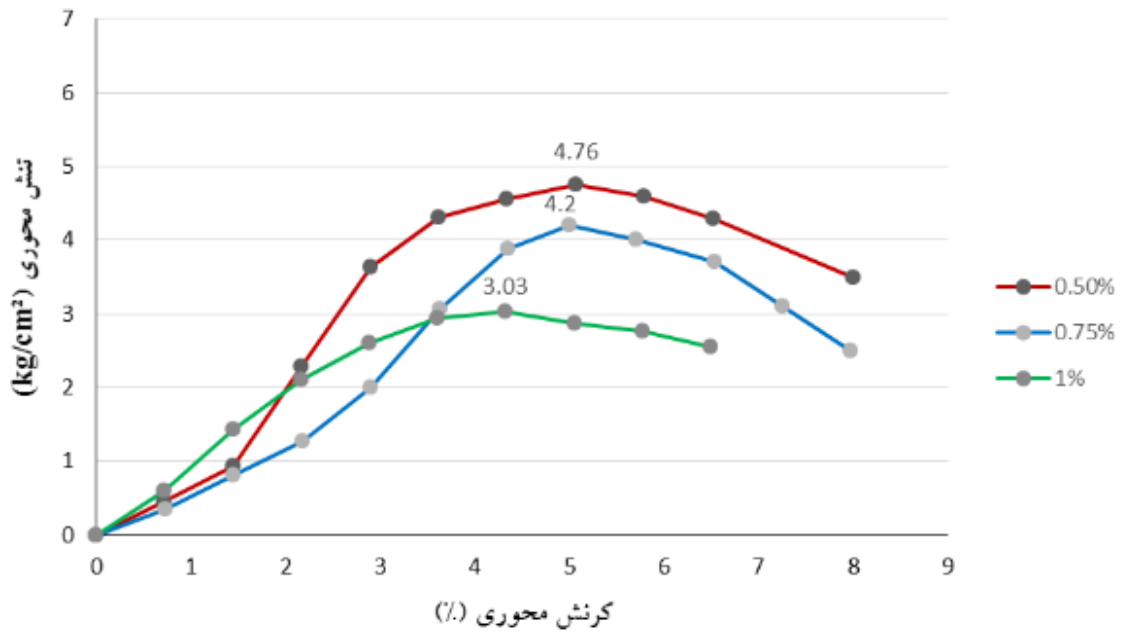
شکل ۱۳. نمودار تنش- کرنش خاک با الیاف شیشه

Fig. Diagram of Stress - strain of clay with glass fibers



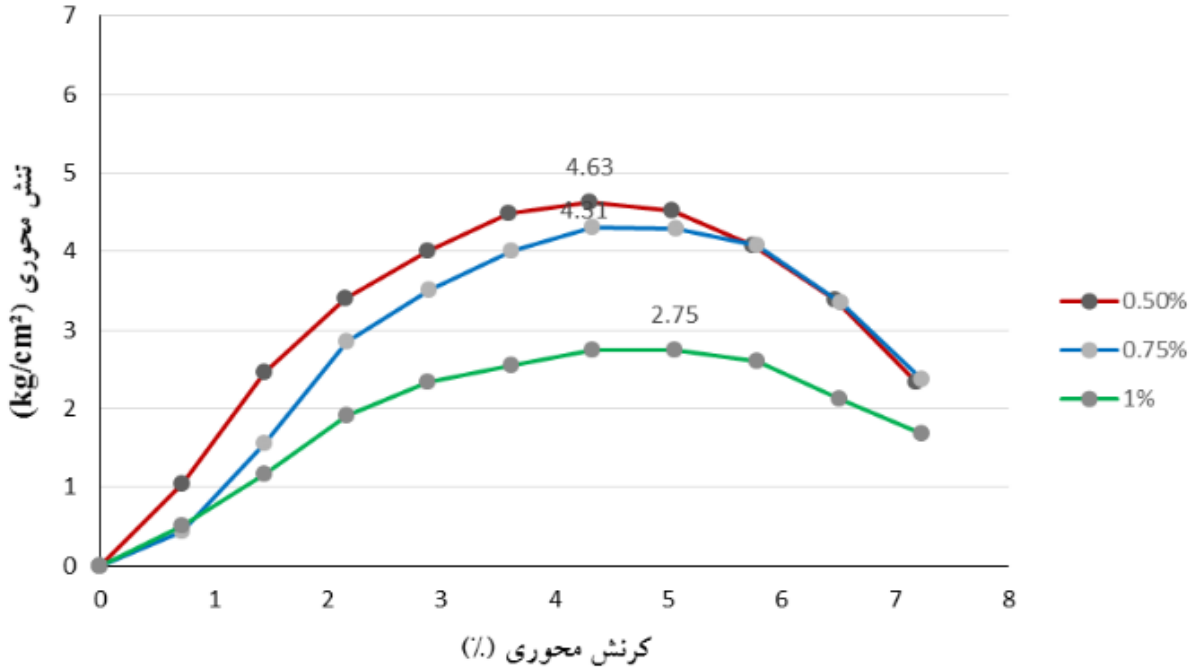
شکل ۱۴. نمودار تنش- کرنش خاک با الیاف پلی پروپیلن

Fig. Diagram of Stress - strain of clay with Polypropylene fibers



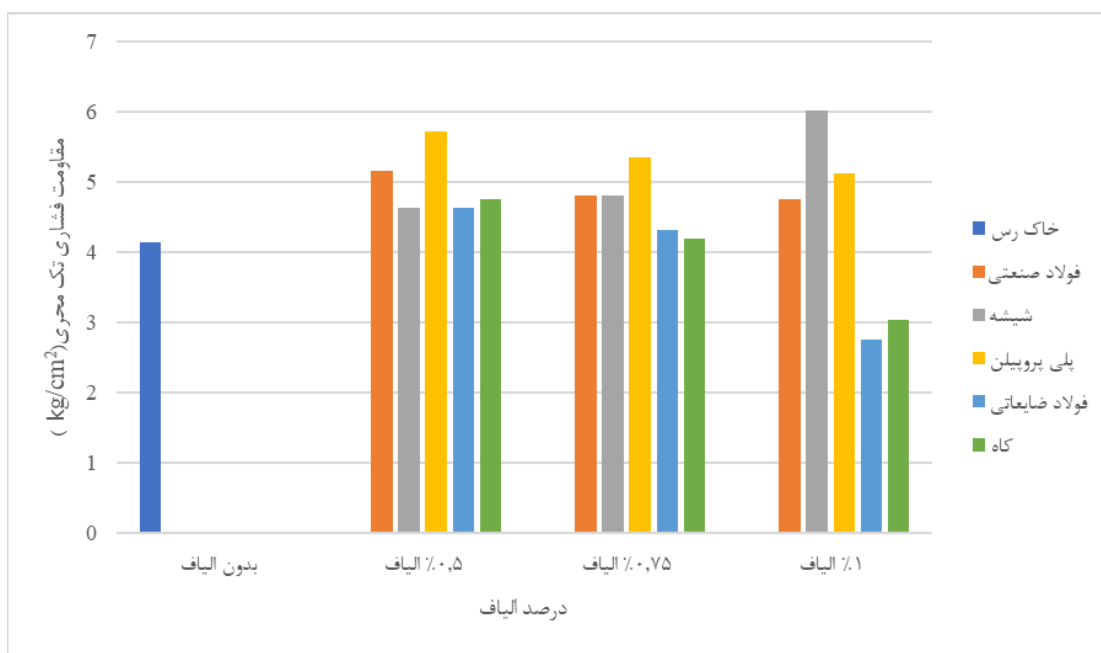
شکل ۱۵. نمودار تنش- کرنش خاک با الیاف فولاد ضایعاتی

Fig. 15. Diagram of Stress - strain of clay with Scrap steel fibers



شکل ۱۶. نمودار تنش- کرنش خاک با الیاف کاه

Fig. 16. Diagram of Stress - strain of clay with Straw



شکل ۱۷. نمودار مقاومت فشاری تک محوری خاک ترکیب شده با پنج نوع الیاف و با درصدهای مختلف به صورت تکی

Fig. 17. Uniaxial compressive strength diagram of soil that combined with five kind of fibers and with different percentages individually

نسبت به خاک بدون الیاف ۴/۴۵٪ افزایش داشته است. همچنین کمترین مقاومت فشاری در ترکیب‌های به دست آمده نیز مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ الیاف فولاد ضایعاتی و به میزان $2/75 \text{ kg/cm}^2$ بوده است. که نسبت به خاک بدون الیاف ۳/۳۳٪ کاهش داشته است.

- در بین ترکیب‌های با ۰٫۵٪ الیاف، خاک مسلح شده با پلی پروپیلن با مقدار $5/72 \text{ kg/cm}^2$ بیشترین و خاک مسلح شده با شیشه و فولاد ضایعاتی با مقدار $4/63 \text{ kg/cm}^2$ کمترین مقاومت فشاری را داشته است.

- در بین ترکیب‌های با ۰٫۷۵٪ الیاف، خاک مسلح شده با پلی پروپیلن و با مقدار $5/35 \text{ kg/cm}^2$ بیشترین و خاک مسلح شده با کاه با مقدار $4/2 \text{ cm}^2$ کمترین مقاومت فشاری را داشته است.

- در بین ترکیب‌های با ۱٪ الیاف، خاک مسلح شده با شیشه و به میزان $6/02 \text{ kg/cm}^2$ بیشترین و خاک مسلح شده با فولاد ضایعاتی با مقدار $2/75 \text{ cm}^2$ کمترین مقاومت فشاری را داشته است.

- با توجه به سطح زیر نمودار در نمودارهای تنش-کرنش، مشاهده می‌شود که خاک مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن از شکل‌پذیری بسیار خوبی نسبت به دیگر الیاف‌ها برخوردار است.

از جدول ۵ و نمودارهای ارائه شده در این بخش نتایج زیر حاصل شده است:

- با افزایش درصد الیاف، میزان مقاومت فشاری تک محوری کاهش پیدا نموده است و تنها مقاومت فشاری تک محوری خاک مسلح با الیاف شیشه با افزایش درصد الیاف افزایش داشته است. کاهش مقاومت فشاری خاک با الیاف‌های فولادی در درصدهای بالا را می‌توان این گونه توجیه نمود که به دلیل عدم انسجام کافی بین الیاف و خاک، الیاف عملکرد لازم را نمی‌توانند انجام دهند. همچنین کاهش مقاومت فشاری خاک با الیاف‌های پلی پروپیلن و کاه در درصدهای بالا نیز، به علت گلوله شدگی الیاف و ایجاد فضاهای خالی در خاک می‌تواند باشد. افزایش مقاومت فشاری خاک با الیاف شیشه نشان از عملکرد مناسب این گونه الیاف به دلیل چسبندگی مناسب با خاک و همچنین عدم گلوله شدن و ایجاد حفره در خاک می‌باشد. هر چند اضافه نمودن الیاف به خاک در مجموع نسبت به خاک بدون الیاف، باعث بالا بردن مقاومت فشاری تک محوری شده است.

- بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب‌های به دست آمده مربوط به ترکیب خاک با ۱٪ الیاف شیشه و به میزان $6/02 \text{ kg/cm}^2$ بوده است. که

جدول ۵. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری حاصل از ترکیب خاک رس با پنج نوع از الیاف به صورت تکی و با درصد‌های مختلف

Table 5. Uniaxial compressive strength values combining clay with five kind of fibers individually and with different percentages

مقاومت فشاری (kg/cm ²)	درصد الیاف					طرح
	کاه	فولاد ضایعاتی	پلی پروپیلن	شیشه	فولاد صنعتی	
۴/۱۴	.	.	.	.	.	خاک رس
۵/۱۵					۰/۵	(S-S ₁ -0.5)
۴/۸۱					۰/۷۵	(S-S ₁ -0.75)
۴/۷۶					۱	(S-S ₁ -1)
۴/۶۳				۰/۵		(S-G-0.5)
۴/۸				۰/۷۵		(S-G-0.75)
<u>۶/۰۲</u>				۱		(S-G-1)
۵/۷۲			۰/۵			(S-P-0.5)
۵/۳۵			۰/۷۵			(S-P-0.75)
۵/۱۲			۱			(S-P-1)
۴/۶۳		۰/۵				(S-S ₂ -0.5)
۴/۳۱		۰/۷۵				(S-S ₂ -0.75)
<u>۲/۷۵</u>		۱				(S-S ₂ -1)
۴/۷۶	۰/۵					(S-S-0.5)
۴/۲	۰/۷۵					(S-S-0.75)
۳/۰۳	۱					(S-S-1)

مربوط به ترکیب فولاد ضایعاتی و کاه، به میزان $2/58 \text{ kg/cm}^2$ که نسبت به خاک بدون الیاف $37/7\%$ کاهش داشته است. و بیشترین آن مربوط به ترکیب شیشه و پلی پروپیلن و به میزان $6/4 \text{ kg/cm}^2$ می باشد که نسبت به خاک بدون الیاف $54/59\%$ افزایش داشته است.

- بیشترین مقاومت فشاری در طرح‌های با $(0/5$ و $0/5)$ الیاف، مربوط به ترکیب پلی پروپیلن و شیشه با مقدار $5/78 \text{ kg/cm}^2$ می باشد که نسبت به خاک بدون الیاف $39/6\%$ افزایش داشته است و کمترین آن مربوط به ترکیب فولاد ضایعاتی و کاه با مقدار $3/08 \text{ kg/cm}^2$ می باشد که نسبت به خاک بدون الیاف $25/6\%$ کاهش داشته است.

- با مشاهده‌ی سطح زیر نمودار تنش-کرنش در ترکیب‌های به دست آمده، ملاحظه می شود در ترکیب‌هایی که از پلی پروپیلن استفاده شده است، خاک مسلح، نرم تر و شکل پذیرتر می باشد.

۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک مسلح شده با ترکیب دو نوع الیاف

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی خاک مسلح ترکیب شده با پنج نوع از الیاف به صورت ترکیب دوتایی الیاف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نحوه‌ی ترکیب الیاف و تعداد طرح‌ها مشابه بخش ۳-۲ می باشد. در جدول ۶ مقادیر عددی نتایج و در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری هر کدام از ترکیب الیاف‌ها آورده شده است. همچنین در شکل ۲۲ نمودار میله‌ای نتایج نشان داده شده است.

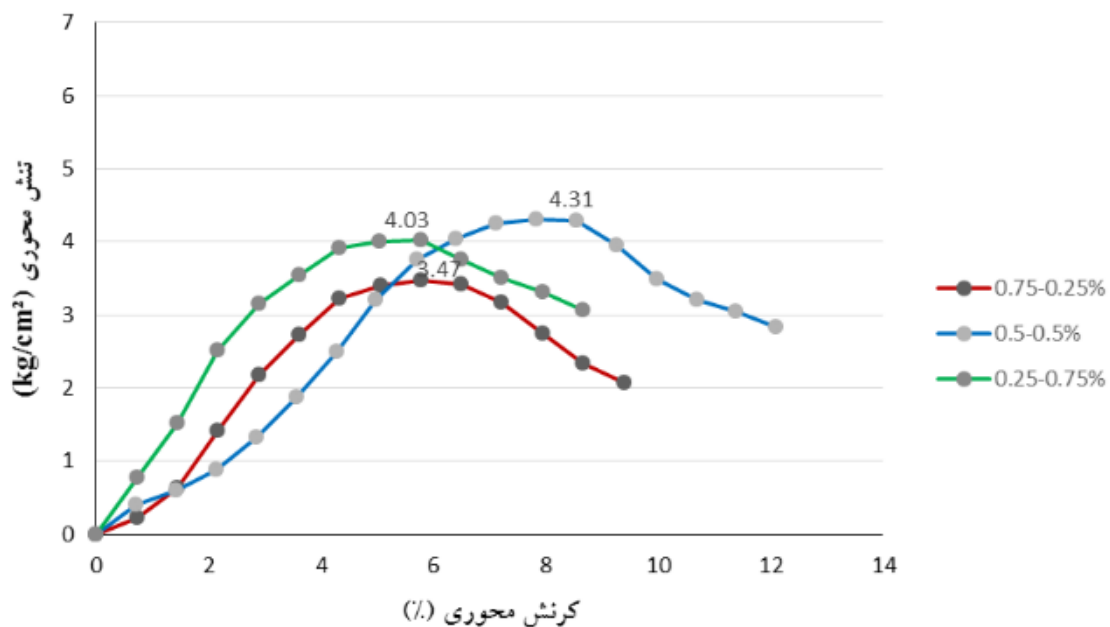
از جدول ۶ و نمودارهای ارائه شده در این بخش نتایج زیر حاصل شده است:

- کمترین مقاومت فشاری در طرح‌های با $(0/25$ و $0/75)$ الیاف،

جدول ۶. مقادیر مقاومت فشاری خاک مسلح شده با ترکیب دو نوع الیاف

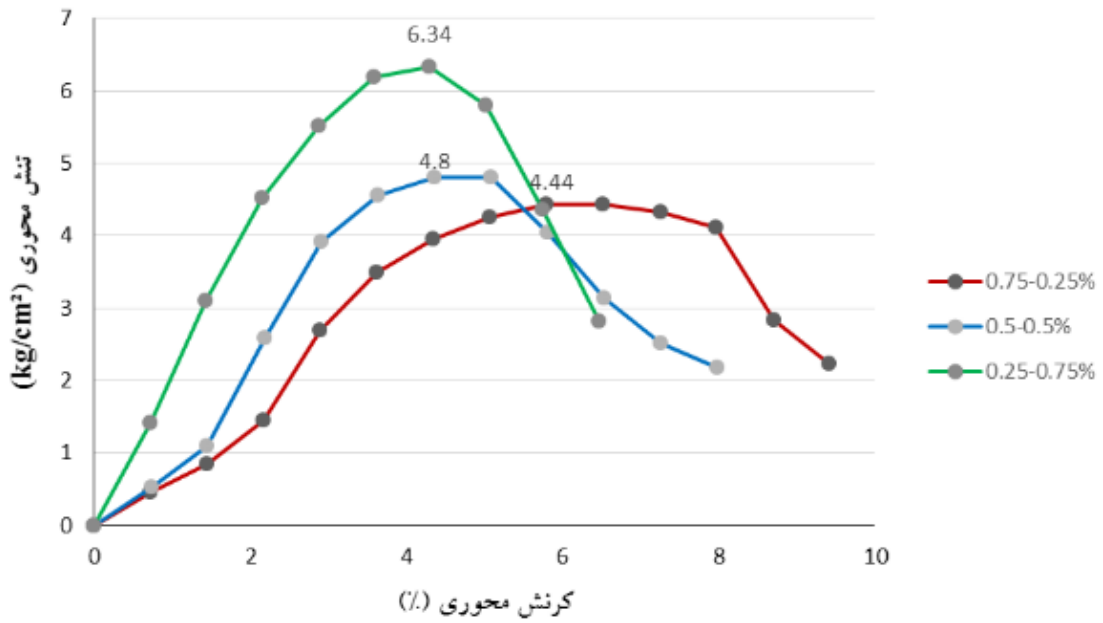
Table 6. Compressive strength values of reinforced soil by combining two types of fibers

مقاومت فشاری (kg/cm ²)	درصد الیاف				طرح
	کاه	فولاد ضایعاتی	پلی پروپیلن	فولاد صنعتی	
۴/۱۴	۰	۰	۰	۰	خاک رس
۴/۴۴				۰/۲۵	(C-S ₁ ,G-0.75,0.25)
۴/۸				۰/۵	(C-S ₁ ,G-0.5,0.5)
۶/۳۴				۰/۷۵	(C-S ₁ ,G-0.25,0.75)
۴/۳۱			۰/۲۵	۰/۷۵	(C-S ₁ ,P-0.75,0.25)
۴/۰۳			۰/۵	۰/۵	(C-S ₁ ,P-0.5,0.5)
۳/۴۷			۰/۷۵	۰/۲۵	(C-S ₁ ,P-0.25,0.75)
۶/۴			۰/۲۵	۰/۷۵	(C-G,P-0.75,0.25)
۵/۷۸			۰/۵	۰/۵	(C-G,P-0.5,0.5)
۴/۰۴			۰/۷۵	۰/۲۵	(C-G,P-0.25,0.75)
۳/۷۲	۰/۲۵	۰/۷۵			(C-S ₂ ,S-0.75,0.25)
۳/۰۸	۰/۵	۰/۵			(C-S ₂ ,S-0.5,0.5)
۲/۵۸	۰/۷۵	۰/۲۵			(C-S ₂ ,S-0.25,0.75)



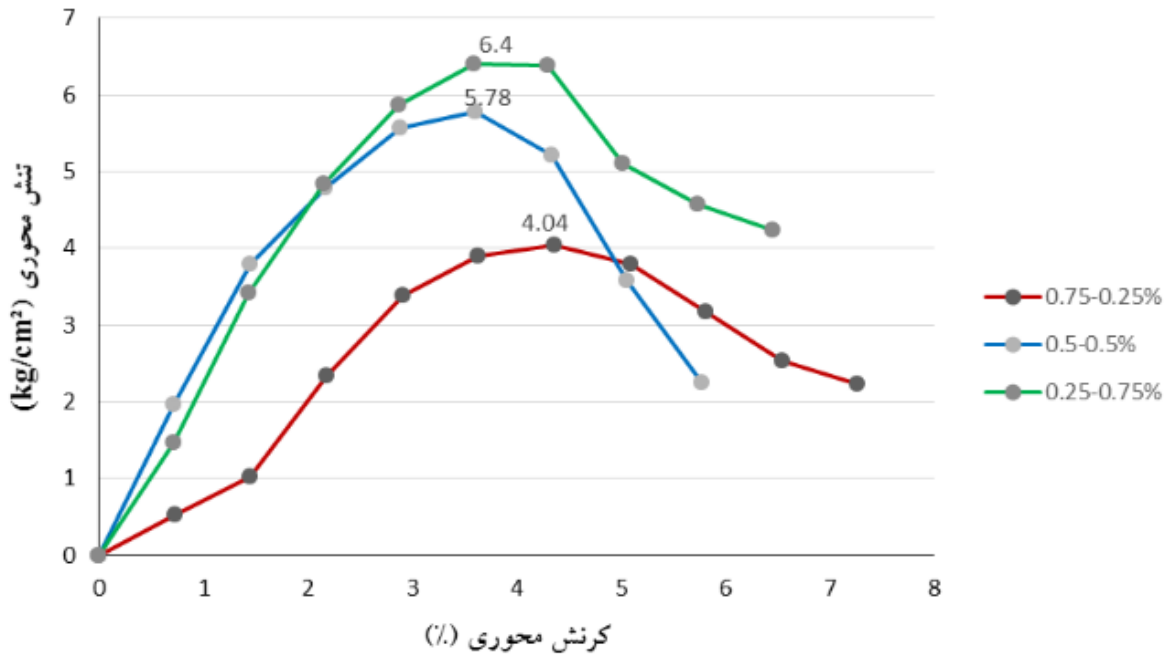
شکل ۱۸. نمودار تنش-کرنش خاک با ترکیب الیاف فولاد صنعتی و پلی پروپیلن

Fig. 18. Soil stress-strain diagram with a combination of Industrial steel and Polypropylene fibers



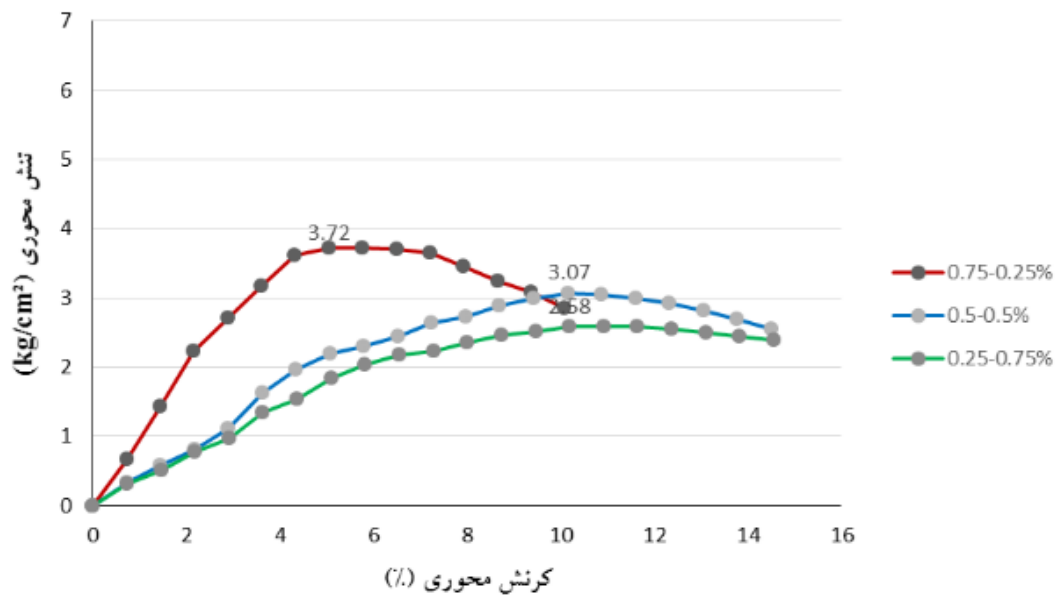
شکل ۱۹. نمودار تنش- کرنش خاک با ترکیب الیاف فولاد صنعتی و شیشه

Fig. 19. Soil stress-strain diagram with a combination of industrial steel and Glass fibers



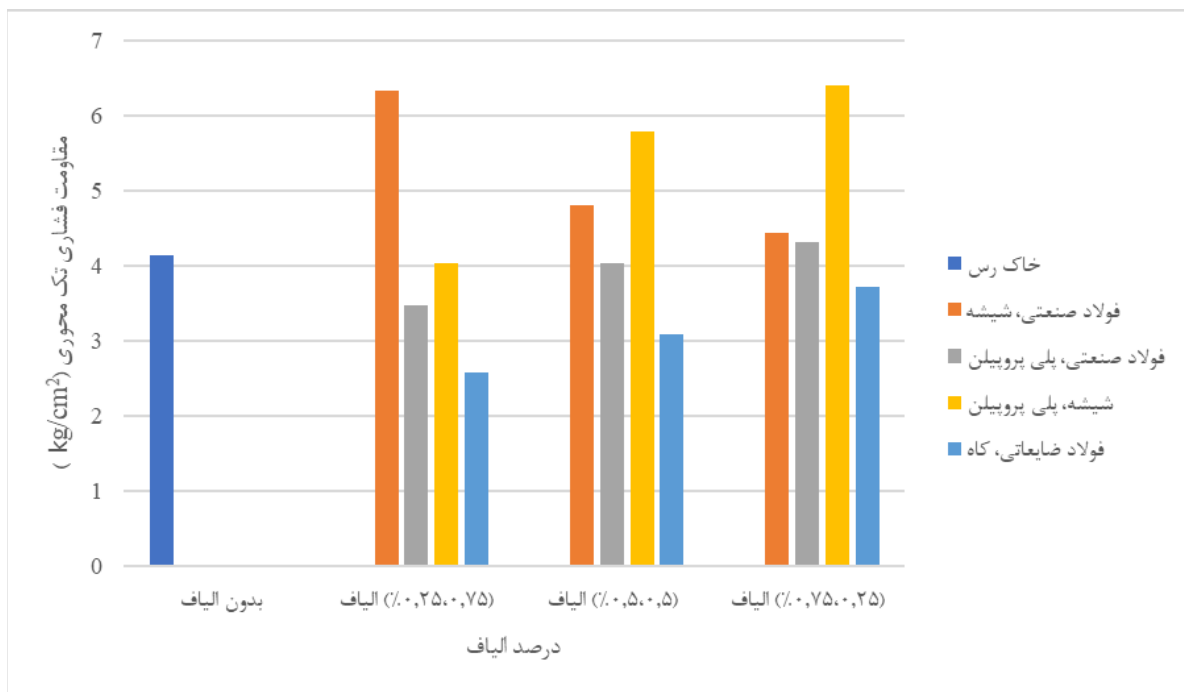
شکل ۲۰. نمودار تنش- کرنش خاک با الیاف پلی پروپیلن و شیشه

Fig. 20. Soil stress-strain diagram with a combination of Polypropylene and Glass fibers



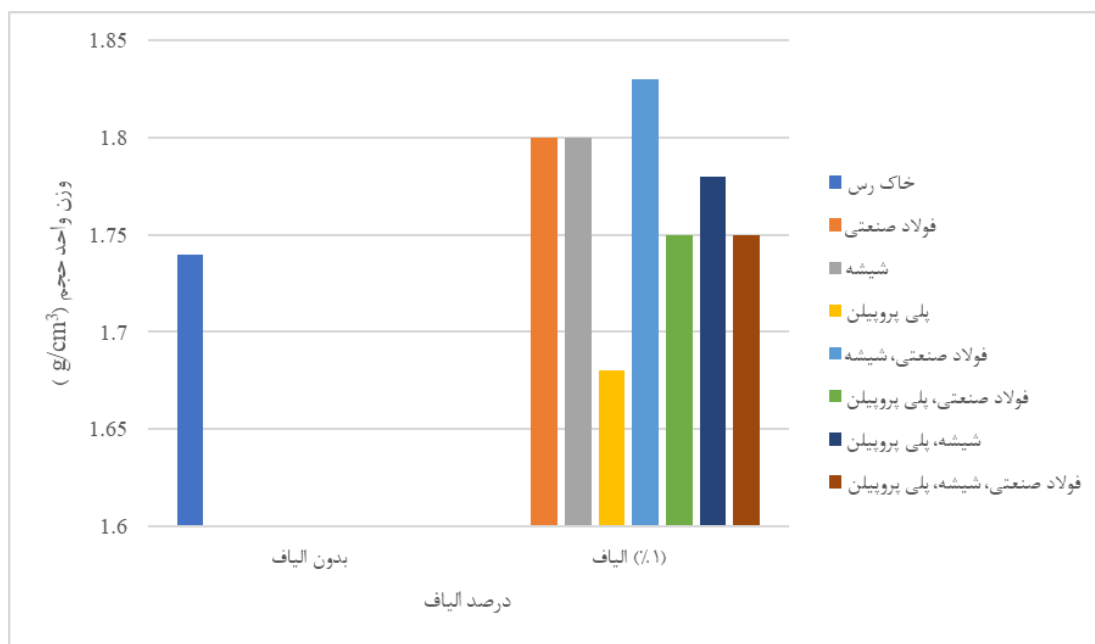
شکل ۲۱. نمودار تنش - کرنش خاک با الیاف فولاد ضایعاتی و کاه

Fig. 21. Soil stress-strain diagram with a combination of Scrap steel and Straw



شکل ۲۲. نمودار مقاومت فشاری تک محوری خاک ترکیب شده با پنج نوع الیاف و با درصدهای مختلف به صورت ترکیب دوتایی

Fig. 22. Diagram of uniaxial compressive strength of soil combined with five kind of fibers and with different percentages as a pairs compound



شکل ۲۳. نمودار وزن واحد حجم تجمعی نمونه‌های تکی و ترکیبی با درصد مساوی الیاف

Fig. 23. Density diagram of cumulative of single and composite samples with equal percentage of fibers

بیشترین وزن واحد حجم در حالی که بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب دوتایی شیشه، پلی پروپیلن بوده است.
- مقاومت فشاری و وزن مخصوص در استفاده از سه نوع الیاف (ترکیب سه‌تایی) تغییر محسوسی نداشته است.

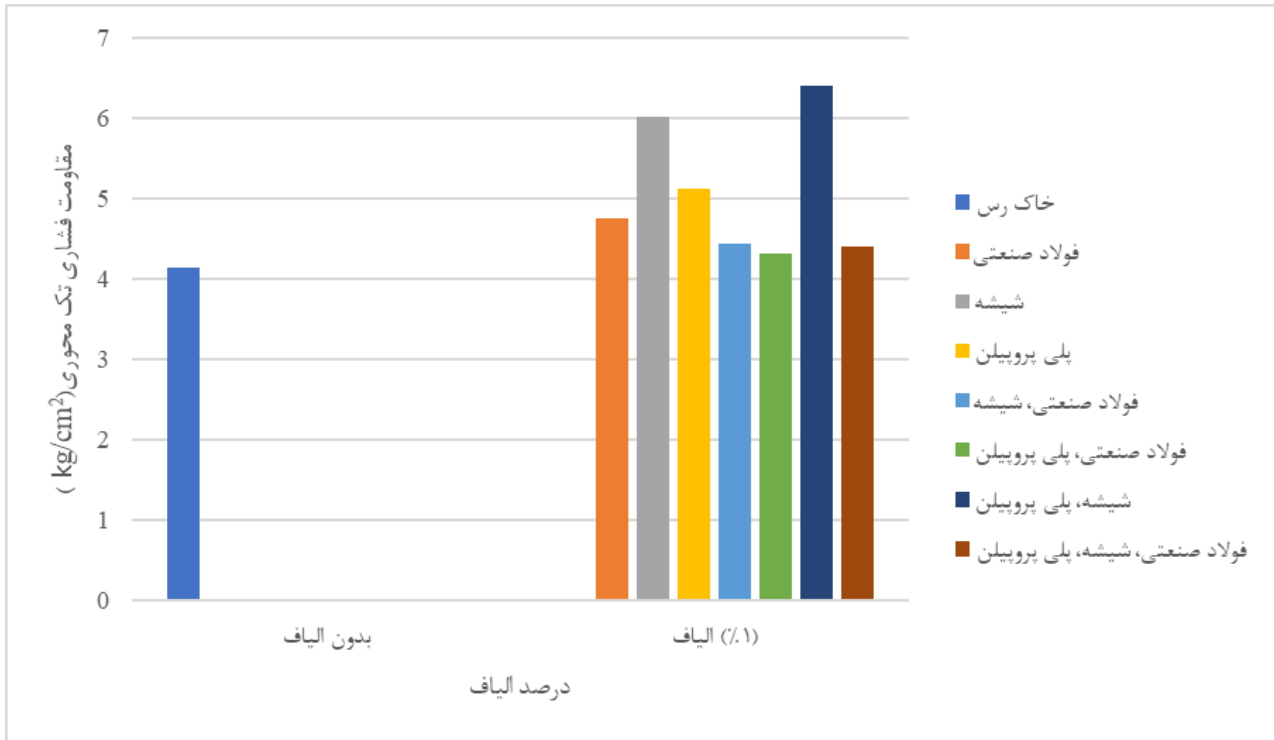
۳-۶- تأثیر الیاف بر پارامترهای مقاومت برشی خاک

در پایان به منظور بررسی بهتر تأثیر الیاف بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، آزمایش برش مستقیم نیز بر روی نمونه‌ی خاک بدون الیاف و نمونه‌های خاک مسلح شده با مقدار ۱٪ از الیاف‌های مختلف انجام شد. و مقادیر چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی این نمونه‌ها به دست آمد که نتایج آن در جدول ۷ و نمودار ۲۵ آورده شده است.

۳-۵- مقایسه‌ی بین نمونه‌های تکی و ترکیبی

در این قسمت جهت مقایسه و نتیجه‌گیری بهتر در خصوص عملکرد نمونه‌های ترکیبی، نتایج کلیه‌ی نمونه‌های تکی با مقدار یک درصد الیاف به همراه نمونه‌های دوتایی الیاف با درصدهای ۰/۷۵ و ۰/۲۵ و به انضمام نتیجه‌ی نمونه با ترکیب سه‌تایی الیاف در قالب نمودار نشان داده شده است (شکل‌های ۲۳ و ۲۴). (لازم به ذکر است ترکیب سه‌تایی شامل فولاد صنعتی، شیشه و پلی پروپیلن با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۵٪ در نظر گرفته شده است).

از نمودارهای ارائه شده در این بخش می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:
- با ترکیب مناسب الیاف در یک درصد مشخص می‌توان به همان نتایج و یا حتی بهتر از نتایج حاصل از نمونه‌ی با یک نوع الیاف دست پیدا نمود. همان گونه که مشاهده می‌شود، ترکیب دوتایی فولاد صنعتی، شیشه دارای



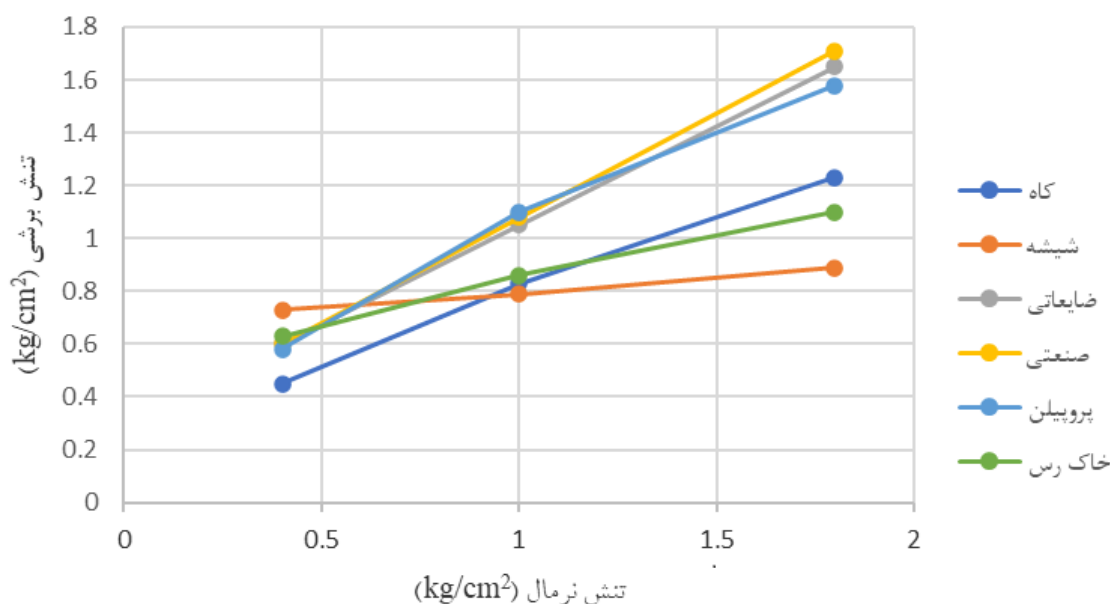
شکل ۲۴. نمودار مقاومت فشاری تک محوری تجمعی نمونه‌های تکی و ترکیبی با درصد مساوی الیاف

Fig. 24. Uniaxial compressive strength diagram of cumulative of single and composite samples with equal percentage of fibers

جدول ۷. پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف مختلف

Table 7. Shear strength parameters of soil reinforced with different fibers

زاویه اصطکاک داخلی (φ)	چسبندگی C ($\frac{kg}{cm^2}$)	نوع الیاف ترکیب شده با خاک
۱۹	۰/۵	خاک رس بدون الیاف
۳۵	۰/۳۴	خاک رس با الیاف پروپیلن
۷	۰/۶۸	خاک رس با الیاف شیشه
۳۸	۰/۲۹	خاک رس با الیاف فولاد صنعتی
۳۷	۰/۳	خاک رس با الیاف فولاد ضایعاتی
۲۸	۰/۳	خاک رس با الیاف کاه



شکل ۲۵. نمودار تنش برشی حداکثر خاک مسلح شده با الیاف‌های مختلف

Fig. 25. Shear stress diagram of maximum soil reinforced with different fibers

- با مقایسه‌ی نتایج بین الیاف‌ها در ترکیب‌های تکی، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد الیاف شیشه نسبت به سایر الیاف‌ها در بهبود وضعیت خاک بهتر بوده است. از طرفی استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و تا حدودی الیاف کاه باعث افزایش شکل‌پذیری و نرمی خاک مسلح شده است که می‌توان از این نوع الیاف در زمینه‌های تعمیر، مرمت و همچنین ساخت آجرهای سفالی بهره جست.

- در بخش ترکیبی، بسته به نوع استفاده از الیاف در هر ترکیب نتایج متفاوتی حاصل شده است. بدین صورت که در ترکیب‌هایی که از الیاف شیشه استفاده شده مقاومت فشاری، در ترکیب‌هایی که از الیاف فولادی استفاده شده، وزن واحد حجم و در ترکیب‌هایی که از الیاف پلی‌پروپیلن و کاه استفاده شده رطوبت بهینه و شکل‌پذیری افزایش داشته است.

- در بعضی از ترکیب‌های دوتایی مقاومت فشاری و وزن واحد حجم از حالت تکی (با مجموع درصد یکسان الیاف) بیشتر شده است (افزایش مقاومت فشاری در ترکیب شیشه، پلی‌پروپیلن و افزایش وزن واحد حجم در ترکیب فولاد صنعتی، شیشه) و این نشان دهنده‌ی این است که می‌توان با ترکیب مناسب از الیاف، به مقاومت مورد نظر دست یافت.

- در مجموع عملکرد فولاد صنعتی، پلی‌پروپیلن و شیشه نسبت به فولاد ضایعاتی و کاه بهتر بوده است. و این نشان دهنده‌ی این است که الیاف

۴- نتیجه‌گیری

در مجموع از داده‌های این تحقیق موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

- اضافه نمودن الیاف فولادی صنعتی و ضایعاتی باعث افزایش حداکثر ۴٪ وزن واحد حجم و ۳۰٪ مقاومت فشاری نسبت به خاک بدون الیاف شده است. از طرفی با افزایش میزان الیاف، مقاومت فشاری کاهش داشته است. علت آن را این گونه می‌توان استدلال نمود که در درصد‌های بالا، به علت کاهش انسجام، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

- ترکیب‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن و کاه نسبت به ترکیب‌های دارای الیاف فلزی از وزن واحد حجم کمتری برخوردار بوده‌اند، که به دلیل پایین بودن وزن واحد حجم این گونه از الیاف می‌باشد. ولی نسبت به خاک بدون الیاف، باعث افزایش حدود ۱٪ وزن واحد حجم خاک شده است. از طرفی اضافه نمودن این گونه از الیاف به خصوص الیاف پلی‌پروپیلن، به دلیل چسبندگی قابل قبول با خاک باعث افزایش مقاومت فشاری خاک به میزان حدود ۴۰٪ شده است که نسبت به الیاف فلزی عملکرد بهتری داشته‌اند.

- عملکرد الیاف شیشه نسبت به الیاف‌های دیگر متفاوت بوده است بدین صورت که اضافه نمودن الیاف، باعث افزایش وزن واحد حجم به میزان ۴٪ و افزایش ۴۵٪ مقاومت فشاری شده است.

- Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Composite Cemented Clay, Crystals, 10(4) (2020) 247.
- [6] T. Sharma, R. Kaushik, Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Bagasse Ash-Cement Stabilized Clay Soil, 10 (2019) 255-266.
- [7] A. Saygılı, M. Dayan, Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers, Cold Regions Science and Technology, 161 (2019).
- [8] M. Mirzababaei, A. Arulrajah, A. Soltani, N. Khayat, Stabilization of soft clay using short fibers and poly vinyl alcohol, Geotextiles and Geomembranes, 46 (2018).
- [9] ASTM Standard D-4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, (2010).
- [10] ASTM Standard C-127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, (2001).
- [11] ASTM D-854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, (2010).
- [12] ASTM D-698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, (2012).
- [13] ASTM D-2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, (2011).
- [14] ASTM Standard D-422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, (2007).
- [15] ASTM D-2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, (2013).
- [16] ASTM D-4767, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, ASTM International, (2011).
- مصنوعی از کیفیت بالاتری برخوردار بوده و استفاده از آن نسبت به دیگر الیاف دارای ارجحیت است. هر چند استفاده از الیاف ضایعاتی و گیاهی، به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی در پروژه‌هایی مثل مرمت و بازسازی آثار باستانی و تاریخی، خاکریزهای موقت، راه‌های دسترسی، پی سازی سازه‌های با اهمیت کم و موارد مشابه توجیه‌پذیر و مناسب است.
- استفاده از ترکیب‌های بیشتر الیاف (سه‌تایی و بیشتر) هم به لحاظ اجرایی و هم به لحاظ عملکردی مورد تردید بوده و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.
- مزیت استفاده از ترکیب الیاف را می‌توان این‌گونه عنوان نمود که:
- (الف) از گلوله شدگی الیاف در درصد‌های بالا جلوگیری می‌نماید.
- (ب) می‌توان از دو نوع الیاف با مشخصات متفاوت در بهبود عملکرد خاک استفاده نمود.
- (ج) می‌توان خواص مکانیکی خاک از جمله مقاومت فشاری و برشی آن را با تغییر در درصد الیاف‌ها (در محدوده‌ی ۱٪ تعیین شده در این تحقیق) تغییر داد.

منابع

- [1] F. Schlosser, P. Delage, Reinforced soil retaining structures and polymeric materials, in: The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures, Springer, (1988) 3-65.
- [2] R. Kaushik, T. Sharma, Influence of waste polypropylene fibers on resilient modulus of clay soil, Int. J. Res. Advent Technol, 7(1) (2019) 251-255.
- [3] M. Zaryoun, M. Hosseini, Lightweight fiber-reinforced clay as a sustainable material for disaster resilient architecture of future buildings, Architectural Engineering and Design Management, 15(6) (2019) 430-444.
- [4] A. de Oliveira Júnior, J.F. Jucá, J. Ferreira, L. Guilherme, Geotechnical Behavior and Soil-Fiber Interaction of Clayey Soil Mixed with Randomly Dispersed Coconut Fibers, Soils and Rocks, 42 (2019) 127-138.
- [5] Q. Cheng, J. Zhang, N. Zhou, Y. Guo, S. Pan, Experimental Study on Unconfined Compression

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H.R. Sadrarhami , R. Ajalloeian, Effect of different fiber combinations on density and unrestrained compressive strength of clay, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 1077-1100.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19164.7108



