



Experimental evaluation into improving the mechanical properties of adobe using palm fibers

H. Mohammadi, A. Eslami*, R. Morshed

Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT: The relatively low compressive strength and negligible tensile resistance aligned with inadequate ductility are considered as major drawbacks of earthen buildings leading to their vulnerability against the gravity and lateral loading including seismic-induced forces. In this study, the possibility of using palm fibers as a natural reinforcement in order to improve the mechanical properties of adobe bricks including compressive strength, tensile strength and ductility are evaluated. To this end, adobe bricks with dimensions of $200 \times 200 \times 50$ mm³ are made by adding palm fibers of 0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1% of soil weight. Compressive properties are determined using cube samples with dimensions of $50 \times 50 \times 50$ mm³ cut from the full-scale adobe bricks while the ductility factor is obtained using the compressive stress-strain curves. To evaluate the tensile strength of specimens, three-point flexural tests are conducted on prismatic specimens of $50 \times 50 \times 200$ mm³ cut from the full-scale adobe bricks. The obtained results indicated adding 0.25% palm fibers can increase the compressive strength of adobe bricks by 50% and adding 1% palm fiber can twice the tensile strength. Further, based on the analysis of the results obtained from the compressive and three-point bending tests, analytical expressions are proposed to estimate the compressive and tensile strengths of adobe bricks reinforced by palm fiber (from 0 to 1%).

Review History:

Received: Feb. 17, 2021

Revised: Oct. 26, 2021

Accepted: Nov. 27, 2021

Available Online: Dec. 02, 2021

Keywords:

Adobe

Palm fibers

Compressive strength

Tensile strength

Ductility

1- Introduction

A considerable portion of residential buildings in our country, Iran, especially in desert and rural areas, are made of earth and adobe bricks which are still in everyday use. Compared to modern construction materials such as steel and concrete, adobe materials are more environmentally friendly and cost-effective while they offer rapid fabrication and local availability [1]. However, the performance of adobe buildings in previous earthquakes has been poor leading to enormous casualties and financial losses [2]. One of the most important weaknesses of adobe materials causing their vulnerability is their low tensile strength and insufficient ductility against seismic-induced forces. Due to the widespread use of this traditional building material, especially in the repair of historical buildings, further studies need to be conducted to improve the mechanical properties of this type of material. In particular, improving the mechanical properties of adobe bricks, which are also constitutive components of adobe walls, can improve the performance of the load bearing walls which in turn would result in upgrading the overall performance and integrity of adobe structure.

The use of natural additives such as straw in soil materials is one of the effective ways to improve the mechanical

properties of adobe bricks and has long been considered in the past. According to the results of previous studies [3-6], the mechanical properties of adobe materials made with or without natural additives highly depend on various parameters such as the type of additive, the amount of additive, the shape of the samples and loading direction. In this experimental study, the effect of adding palm fibers as a natural reinforcement on improving the mechanical properties of adobe bricks including compressive strength, tensile strength and ductility is investigated and the results are discussed in detail.

2- Methodology

In order to evaluate the effect of adding palm fibers on the mechanical properties of adobe bricks, five soil mixes with different fiber to soil weight ratios of 0.25, 0.5, 0.75 and 1% were considered. The soil used was clayey soil provided by a local supplier and was the same as the one which is typically used to make adobe bricks. To make fiber-reinforced adobes, the fibers were first added to the dry soil and then water was added before it was covered by a plastic sheet to prevent evaporation. After 3 days, the paste was trampled and the adobe samples were molded by a mason according to traditional methods. The bricks were made with the dimensions of $50 \times 200 \times 200$ mm³ (Figure 1) and finally,

*Corresponding author's email: a.eslami@yazd.ac.ir





Fig. 1. Adobe brick samples

after complete drying, 6 cube specimens with dimensions of $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ were tested for compressive strength and 6 prism samples with dimensions of $50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$ was cut for the three-point bending test of each mix.

Compression tests were conducted in the form of the displacement-controlled loading with a constant speed of 0.01 mm/s as suggested in previous studies [7]. Finally, using the obtained strain-stress curves, compressive strength (f_c), strain corresponding to the maximum compressive stress, strain at the yielding (ε_y), final strain (ε_u), ductility and modulus of elasticity was determined for each specimen. The ductility coefficient is defined as the ratio of the final strain (ε_u) to the strain at the yielding point (ε_y) in the idealized bilinear curve [7]. The elastic modulus is determined as the secant modulus according to NP EN 1052-1 [8] which is the slope of the line connecting the origin to the point corresponding to one-third of the maximum compressive stress ($1/3f_c$).

In order to determine the tensile strength of prism specimens, the three-point bending test was performed with a displacement-controlled loading at a constant rate of 0.01 mm/s . The tensile strength is defined according to ASTM C348-14 [9] using Euler-Bernoulli theory as:

$$f_t = 1.5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (1)$$

Where (f_t) is the tensile strength in MPa, (F) maximum force on the sample in N, (l) net distance between supports in mm, (b) sample width in mm and (d) sample depth in mm.

3- Results and Discussion

The results of compression tests including the compressive strength, elastic modulus and ductility for adobe samples

Table 1. Results of compressive strength, ductility, and elastic modulus

Specimen	NF	0.25F	0.5F	0.75F	1.0F
Compressive strength (MPa)	3.36	5.03	4.75	4.43	3.94
Difference (%)	-	49.7	41.4	31.8	17.3
Ductility	1.62	1.92	2.90	2.19	2.04
Difference (%)	-	18.5	79	35.2	25.9
Modulus of elasticity (MPa)	465.23	672.19	604.75	557.65	550.46
Difference (%)	-	44.5	30.0	19.9	18.3

Table 2. Tensile strength of mixes

Specimen	Tensile strength (MPa)	Difference (%)
NF	0.55	-
0.25F	0.84	52.7
0.5F	0.99	80
0.75F	1.08	96.3
1.0F	1.12	103.6

and their variations compared to the control sample, are summarized in Table 1. NF stands for the control specimens, and fiber-reinforced specimens are designated according to the fiber content (for example, 0.25F refers to the mixes reinforced with 0.25% fiber content).

According to Table 1, the samples reinforced with 0.25% fiber content (0.25F) offered the best performance in terms of compressive strength with nearly 50% higher strength than the control counterpart. In addition, the compressive strength values of all fiber-reinforced specimens were higher than the control specimens. A similar trend was also observed concerning the elastic modulus, with the highest improvement in the mix reinforced with 0.25% fiber content with about 45% increase compared to the control specimen. In terms of the ductility behavior, the optimal percentage was found for the samples reinforced with 0.5% fiber content, where 79% increase was obtained in comparison with the unreinforced specimen.

A summary of the results obtained from the three-point bending test is reported in Table 2. The results indicate that the tensile strength of the specimens increased with adding the fiber content so that the maximum tensile strength was determined for the specimen reinforced with 1% fibers with an average of 1.12 MPa while the minimal tensile strength belonged to the control specimen (without fibers) with an average of 0.55 MPa.

4- Conclusions

Based on the obtained experimental results, the use of palm fibers by 0.25% weight percentage can increase the compressive strength and elastic modulus of adobe bricks up to 50% and 45% compared to the unreinforced samples, respectively. In addition, adding 0.5% weight percentage of palm fiber can improve the ductility by about 79% compared to the control sample. However, the results of this study showed that the use of fibers in excess of 0.5% (up to 1%) of soil weight could be less effective in improving the ductility behavior. On the other hand, the tensile strength of samples was continuously improved with increasing the fiber content.

References

- [1] F. Tootoonchy, B. Asgarian, F. Danesh, Experimental in-plane behavior and retrofitting method of mud-brick walls, *International Journal of Civil Engineering*, 13(2) (2015) 191-201.
- [2] A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour, A. Bakhshi, Reinforcement Approach in Experimental Investigations of Mud Brick Wall under Diagonal Tension, *Journal of Housing and Rural Environment*, 35(154) (2016) 107-124 (in persian).
- [3] M. Bouhicha, F. Aouissi, S. Kenai, Performance of composite soil reinforced with barley straw, Cement and concrete composites, 27(5) (2005) 617-621.
- [4] A.V. Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour, Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests, *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 137-147.
- [5] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 719-728.
- [6] Ş. Yetgin, Ö. Çavdar, A. Cavdar, The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes, *Construction and Building Materials*, 22(3) (2008) 222-227.
- [7] F. Parisi, D. Asprone, L. Fenu, A. Prota, Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers, *Composite Structures*, 122 (2015) 300-307.
- [8] NP EN 1052-1: 2002 Methods of test for masonry – Part 1: Determination of compressive strength. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ); 2002 [Portuguese].
- [9] ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2014.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Mohammadi, A. Eslami, R. Morshed, *Experimental evaluation into improving the mechanical properties of adobe using palm fibers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 465-468.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19652.7222](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19652.7222)





ارزیابی آزمایشگاهی بهبود خواص مکانیکی خشت با استفاده از الیاف خرما

حسین محمدی، ابوالفضل اسلامی*، رضا مرشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

کلمات کلیدی:

خشت
الیاف خرما
مقاومت کششی
مقاومت فشاری
شکل پذیری

خلاصه: مقاومت فشاری نسبتاً پایین و نیز مقاومت کششی ناچیز به همراه عدم شکل پذیری کافی از ضعف‌های اساسی ساختمان‌های گلین به شمار می‌رود که باعث آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر بارهای ثقلی و جانبی از جمله بار زلزله می‌گردد. در این مطالعه آزمایشگاهی امکان استفاده از الیاف درخت خرما به عنوان یک مسلح کننده طبیعی جهت بهبود خواص مکانیکی خشت شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و شکل پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور بلوک‌های خشتی در ابعاد $50 \times 200 \times 200$ میلی‌متر مکعب و با افزودن الیاف خرما به مقدار ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ وزنی خاک ساخته می‌شود. مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب که از بلوک‌های خشت کامل بریده شده و شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز با استفاده از منحنیهای تنش - کرنش فشاری حاصل محاسبه می‌شود. به منظور ارزیابی مقاومت کششی نمونه‌ها، از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد $50 \times 50 \times 200$ میلی‌متر مکعب که از بلوک‌های خشت کامل بریده شده، استفاده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزودن مقدار ۰/۲۵٪ الیاف خرما می‌تواند مقاومت فشاری خشت را تا حدود ۵۰٪ و افزودن ۱٪ الیاف مقاومت کششی آن را تا بیش از ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. همچنین بر پایه آنالیز نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فشاری و خمش سه نقطه‌ای، روابط تحلیلی برای تخمین مقاومت فشاری و کششی مصالح خشتی مسلح شده با الیاف خرما (با مقدار الیاف ۰ تا ۱٪) پیشنهاد می‌شود.

۱- مقدمه

ساله دارند. از ویژگی‌های مثبت مصالح خشتی می‌توان به سازگاری با محیط زیست، اقتصادی بودن، سرعت اجرا و دسترسی آسان اشاره کرد [۲]. با این وجود، عملکرد سازه‌های خشتی در زلزله‌های گذشته مطلوب نبوده و عمدتاً همراه با خسارت‌های جانی و مالی زیادی همراه بوده است [۴]. همچنین فقدان آیین‌نامه و استاندارد مناسب برای طراحی ساختمان‌های خشتی در برابر بارهای ثقلی و لرزه‌ای، نیاز به بررسی و بهبود خواص مکانیکی مصالح خشتی را ضروری می‌سازد. از طرفی انتخاب شهر یزد به عنوان شهر میراث جهانی در سال ۲۰۱۷ میلادی توسط سازمان یونسکو [۵] اهمیت حفظ و مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی را در این شهر تاریخی چند برابر می‌کند.

استفاده از افزودنی‌های طبیعی در مصالح خاکی مانند خشت، یکی از راه‌کارهای موثر در بهبود خصوصیات مکانیکی این نوع مصالح به حساب می‌آید و از دیرباز مورد توجه گذشتگان بوده است. بسیاری از افزودنی‌های طبیعی نظیر کاه، خرده چوب، الیاف خرما و آهک نسبتاً ارزان بوده و معمولاً

خاک یکی از قدیمی‌ترین و نخستین مصالح ساختمانی بوده که از گذشته تاکنون در ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مصالح خاکی هنوز در بسیاری از کشورهای جهان که روش‌های مدرن برای ساخت و ساز پرهزینه محسوب می‌شود، یک روش متداول به شمار می‌رود [۱]. در حال حاضر تقریباً بیش از ۳۰٪ جمعیت جهان در ساختمان‌های ساخته شده با مصالح خاکی زندگی می‌کنند [۲]. آمارهای موجود نشان می‌دهد میزان قابل توجهی از ساختمان‌های مسکونی ساخته شده در کشورمان ایران به ویژه در مناطق کویری و روستایی از جنس خاک و از نوع خشتی هستند. قدیمی‌ترین بقایای باقی مانده از این ساختمان‌های خشتی در ایران مربوط به حدود ۶۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح بوده که در دره‌های شهر دهلران پیدا شده است [۳]. همچنین بسیاری از آثار تاریخی و فرهنگی به جا مانده نظیر نارین قلعه میبد و مسجد جامع فهرج یزد از نوع گلی و خشتی هستند که قدمت چندین هزار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.eslami@yazd.ac.ir



در دسترس هستند. علاوه بر آن استفاده از این نوع افزودنی‌ها به عنوان تثبیت یا مسلح کننده نیاز به تکنولوژی خاص و پیچیده‌ای ندارد. از طرفی افزودنی‌های طبیعی مشکلات و آلودگی‌های زیست محیطی کمتری نسبت به افزودنی‌های غیرطبیعی مثل سیمان بر جای می‌گذارند.

در سال‌های اخیر محققان زیادی به بررسی و بهبود خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی با استفاده از افزودنی‌های طبیعی پرداخته‌اند [۶-۸]. با توجه به نتایج مطالعات گذشته، خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی ساخته شده با و یا بدون افزودنی‌های طبیعی به پارامترهای مختلفی نظیر نوع افزودنی، مقدار افزودنی، شکل نمونه‌ها و نحوه بارگذاری نمونه بستگی دارد [۱۰-۸ و ۶]. بر اساس نتایج آزمایش‌های بوهیکا^۱ و همکاران [۶]، استفاده از مقادیر مناسب الیاف کاه در بلوک‌های خشتی موجب کاهش جمع‌شدگی، افزایش مقاومت کششی، فشاری و بهبود مقاومت برشی نمونه‌ها می‌شود. اودراوگو^۲ و همکاران [۱۱] تأثیر نوعی الیاف طبیعی به نام فونیو^۳ و میزان آن را (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۱ وزنی خاک) روی خواص مکانیکی و فیزیکی بلوک‌های خشتی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد استفاده از الیاف، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را به ترتیب تا ۱۸ و ۱۲٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌بخشد. همچنین در مطالعه آن‌ها افزایش مقدار الیاف از مقدار ۰/۲ تا ۰/۴٪ وزنی خاک، باعث افزایش مقاومت فشاری شد، در حالی که افزایش مقدار الیاف از ۰/۴ تا ۰/۱٪ به تدریج باعث کاهش مقاومت فشاری شده به طوری که مقاومت فشاری نمونه مسلح شده با ۰/۶٪ الیاف، کمتر از مقاومت نمونه شاهد به دست آمد. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری دنسو^۴ و همکاران [۱۲]، اضافه کردن الیاف طبیعی مانند الیاف نارگیل و الیاف تقاله نیشکر تا میزان ۰/۵٪ وزنی خاک در خشت، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که با افزایش مقدار الیاف به بیش از ۰/۵٪ مقاومت فشاری کاهش یافته و در بعضی نمونه‌ها مقاومت فشاری از مقاومت نمونه شاهد کمتر به دست آمد. کانچا - ریدل^۵ و همکاران [۱۳] تأثیر الیاف گیاه جوت^۶ (کنف هندی) با مقادیر (۰/۵ و ۰/۲٪ وزنی خاک) و طول‌های مختلف (۷، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر) را روی خواص مکانیکی خشت بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد به طور کلی افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد می‌شود. این افزایش

- 1 Bouhicha
- 2 Ouedraogo
- 3 Fonio straw
- 4 Danso
- 5 Concha - Riedel
- 6 Jute fiber

در نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲٪ الیاف و با طول الیاف ۳۰ میلی‌متر نسبت به سایر نمونه‌های مسلح شده مشهودتر بود. همچنین در مطالعه آن‌ها اضافه کردن الیاف حتی در مقادیر کم (۰/۵٪ وزنی خاک) تأثیر قابل توجهی در کاهش عرض ترک‌های جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن داشت. ایگ^۷ و همکاران [۱۴] اثر افزودن الیاف درخت موز با مقادیر مختلف (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۱٪ وزنی خاک) را بر خواص مکانیکی و فیزیکی خشت بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد افزودن مقدار ۰/۷۵٪ الیاف به خشت می‌تواند مقاومت فشاری را تا حدود ۴۹٪ و افزودن مقدار ۰/۵٪ الیاف مقاومت کششی را تا حدود ۱۱۴٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. با این حال نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد اضافه کردن بیش از حد الیاف به خشت تأثیر کمتری در بهبود مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها دارد. اولاسیا^۸ و همکاران [۱۵] در مطالعه خود تأثیر دو نوع الیاف طبیعی کاه و نوعی گیاه دریایی^۹ با مقادیر (۰/۵، ۱/۵ و ۳٪ وزنی خاک) و طول‌های مختلف (۱۰ و ۳۰ میلی‌متر و طول بلند) را بر خواص مکانیکی خشت بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد استفاده از مقدار و طول مناسب از الیاف کاه می‌تواند مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را به ترتیب ۶۹ و ۳۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. همچنین استفاده از مقدار و طول مناسب از الیاف گیاه دریایی می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا حدود ۶۰٪ و مقاومت کششی را تا حدود ۴۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. با این حال به طور کلی نمونه‌های دارای الیاف گیاه دریایی خواص مکانیکی بهتری از خود نشان دادند. در جدول ۱ خلاصه نتایج برخی مطالعات گذشته که از الیاف طبیعی برای بهبود خواص مکانیکی خشت استفاده کرده‌اند، آورده شده است.

از مهم‌ترین ضعف‌های مصالح خشتی مقاومت کششی پایین آن‌ها و عدم شکل‌پذیری کافی در برابر بارهای وارده است. با توجه به مصرف گسترده این ماده ساختمانی قدیمی به ویژه در مرمت و بازسازی بافت‌های تاریخی، مطالعات بیشتری در زمینه بهبود خواص مکانیکی این نوع مصالح لازم به نظر می‌رسد. از طرفی عملکرد سازه‌های خشتی به طور قابل توجهی به اجزاء تشکیل دهنده آن‌ها یعنی دیوار و سقف بستگی داشته و مقاوم‌سازی دیوارهای خشتی می‌تواند باعث بهبود عملکرد سازه‌ای این نوع ساختمان‌ها شود [۲۰]. همچنین بهبود خواص مکانیکی بلوک‌های خشتی که اجزاء سازنده دیوارها هستند، می‌تواند عملکرد دیوارها را نیز ارتقاء دهد. بنابراین در این مطالعه آزمایشگاهی اثر افزودن مقادیر مختلف وزنی الیاف درخت

- 7 Ige
- 8 Olacia
- 9 Seagrass fiber

جدول ۱. خلاصه نتایج برخی مطالعات گذشته

Table 1. Summary of the results of the past studies

مرجع	بیشترین مقاومت کششی		بیشترین مقاومت فشاری		طول الیاف (mm)	مقدار الیاف (درصد وزنی خاک)	نوع الیاف
	میزان الیاف (%)	مقدار (MPa)	میزان الیاف (%)	مقدار (MPa)			
[۸]	۰/۶	۰/۰۸	۰/۶	۶/۹۱	-	۰/۳، ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۹	خرده چوب
[۸]	۰/۳	۰/۱	۰/۹	۸/۷۱	۱۰-۴۰	۰/۳، ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۹	کاه
[۷]	۰/۲۵	۱/۴۵	۰/۲۵	۴/۴۴	-	۰/۵ و ۰/۲۵	پشم گوسفند
[۱۴]	۰/۵	۰/۳	۰/۷۵	۱/۷۶	۷۵	۰/۲۵، ۰/۱۵، ۰/۷۵ و ۱	الیاف درخت موز
[۱۵]	۰/۵	۰/۵۶	۰/۵	۲/۸۲	۳۰ و ۱۰	۰/۵، ۰/۱۵ و ۳	کاه
[۱۶]	۰/۵	۱/۹۵	۰	۴/۵۳	۱۰-۴۰	۰/۵، ۰/۳، ۰/۳ و ۵	کاه
[۱۷]	۰/۲	۱/۱۵	۰/۴	۲/۸۵	۳۰ و ۶۰	۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸	الیاف گیاه بامیه
[۱۸]	۰/۵	۰/۶۶	۰	۲/۴۸	۳۰ و ۱۵، ۷	۰/۵ و ۲	الیاف گیاه جوت
[۱۹]	-	-	۰	۲/۸۸	۲۰-۸۰	۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۹	کاه

فشاری و کششی در نمونه‌های خشت مسلح شده با مقادیر الیاف کمتر از ۱٪ وزنی خاک به دست آمده است. همچنین با توجه به این که استفاده بیش از حد الیاف (بیش از ۱٪) باعث گلوله شدن و چسبیدن الیاف خرما به هم در زمان ترکیب با خاک و در نتیجه عدم کارایی مناسب آن می‌شود، بنابراین مقادیر الیاف برای ساخت خشت‌ها برابر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ وزنی خاک در نظر گرفته شد. همچنین خشت‌های بدون الیاف (شاهد) نیز به منظور کنترل و مقایسه نتایج ساخته شد.

به منظور توزیع یکنواخت الیاف در نمونه‌ها و همچنین تطابق بلوک‌های خشتی با شرایط کارگاهی، ابتدا خشت‌های کامل در ابعاد کاربردی (۵۰ × ۲۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر مکعب) ساخته شده و سپس نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از خشت‌های کامل بریده شدند. مشخصات و ابعاد خشت‌های کامل و نمونه‌های بریده شده از آن‌ها برای آزمایش‌های فشاری و خمش سه نقطه‌ای در جدول ۲ خلاصه شده است. در هنگام برش نمونه‌ها دقت کافی به عمل آمده تا از آسیب به آن‌ها جلوگیری شود. در مجموع در این تحقیق آزمایش‌های (۱) دانه‌بندی و هیدرومتري خاک (۲) تعیین مشخصات مکانیکی الیاف خرما (۳) فشاری خشت و (۴) خمش سه نقطه‌ای خشت صورت گرفتند.

خرما به عنوان یک مسلح کننده طبیعی بر بهبود خواص مکانیکی خشت بررسی می‌گردد. اگر چه مطالعات محدودی در زمینه استفاده از الیاف خرما برای مسلح کردن خشت صورت گرفته، از نظر برنامه آزمایشگاهی (شامل روند ساخت بلوک‌های خشت، تعداد و ابعاد نمونه‌های آزمایش، روش انجام آزمایش‌ها و...) با مطالعه حاضر تفاوت اساسی دارند؛ به ویژه آن که مطالعات گذشته کمتر به بررسی خاصیت شکل‌پذیری پرداخته‌اند. در این مطالعه ابتدا بلوک‌های خشت با مقادیر مختلف الیاف به روش سنتی ساخته و در نهایت آزمایش‌های فشاری و خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های بریده شده از آن‌ها انجام شد و نتایج با نمونه شاهد مقایسه گردید. نتایج این مطالعه می‌تواند در زمینه بهبود خصوصیات مکانیکی مصالح خشتی مورد استفاده قرار گیرد.

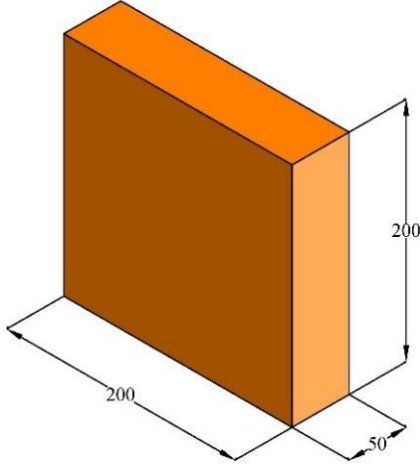
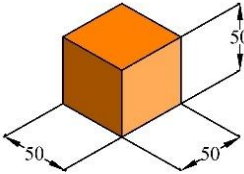
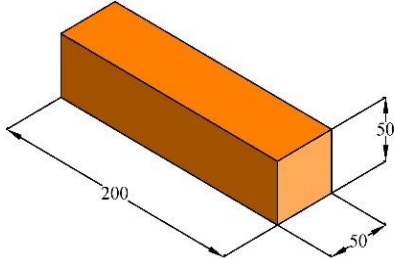
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- برنامه آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی تأثیر افزودن الیاف خرما بر خواص مکانیکی خشت، ۵ طرح اختلاط خاک با درصدهای مختلف وزنی الیاف خرما ساخته شد. بر اساس نتایج مطالعات گذشته (جدول ۱)، در اکثر موارد بیشترین مقاومت

جدول ۲. نمونه های آزمایش

Table 2. Experimental specimens

توضیحات	نوع آزمایش	نمونه
خشت های سنتی ساخته شده در ابعاد کاربردی - در ۵ طرح اختلاط (شامل نمونه شاهد و ۴ طرح اختلاط مسلح به الیاف با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۱)	-	
۶ نمونه از خشت های کامل از هر طرح اختلاط بریده شد.	آزمایش فشاری	
۶ نمونه از خشت های کامل از هر طرح اختلاط بریده شد	آزمایش خمش سه نقطه ای	

شاخص خمیری مطابق با استاندارد ASTM D4318-17 [۲۳] تعیین گردید. همان گونه که در جدول ۳ نشان داده شده، خاک مورد استفاده از نوع رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) طبقه بندی می شود.

۲-۲-۲ الیاف خرما

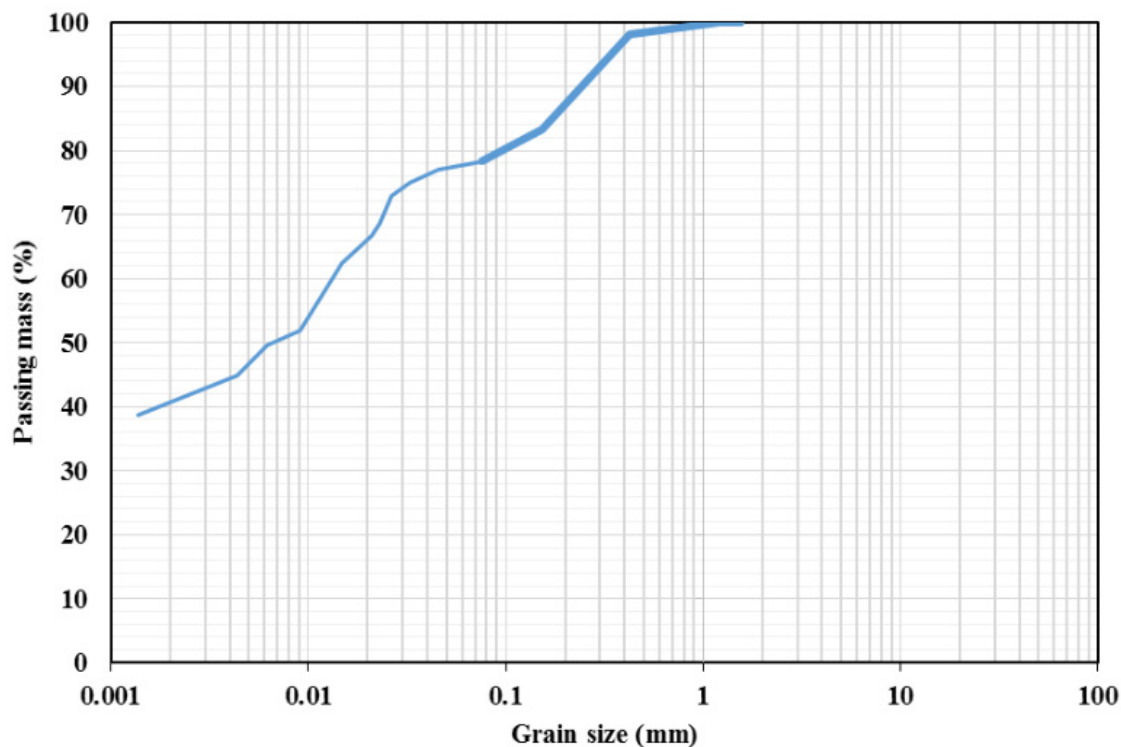
الیاف خرما در حالت طبیعی به صورت بافته به دور تنه درخت خرما پیچیده اند که دارای ساختاری توپر و جذب آب نسبتاً قابل توجه هستند. پس از جداسازی این الیاف از درخت و خیساندن، تار و پود آن را از هم جدا می کنند. در این تحقیق الیاف به قسمت های کوچک تر خرد شد. شکل ۲ الیاف خرما خرد شده و یک تصویر میکروسکوپی بزرگ شده از آن را نشان می دهد.

۲-۲-۲ مشخصات مصالح مصرفی

۲-۲-۱-۲ خاک

برای ساخت بلوک های خشت، از خاک مورد استفاده در کوره های سنتی آجر شهر یزد که در حال حاضر نیز برای ساخت خشت خام و آجر مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده گردید. دانه بندی خاک برای ذرات کوچک تر از ۷۵ میکرومتر توسط آزمایش هیدرومتري مطابق استاندارد ASTM D7928-17 [۲۱] و برای ذرات بزرگ تر از ۷۵ میکرومتر توسط آزمایش دانه بندی با الک، مطابق استاندارد ASTM D6913/ASTM D6913M-17 [۲۲] انجام شد. منحنی دانه بندی حاصل در شکل ۱ نشان داده شده است.

مشخصات فیزیکی خاک رس مورد استفاده، شامل حدود اتبرگ و



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک

Fig.1. Particle size distribution of soil

جدول ۳. مشخصات فیزیکی خاک

Table 3. Physical properties of soil

اجزاء خاک (%)		حدود اتربرگ (%)		نشانه خمیری	وزن واحد حجم (kN/m ³)
رس	لای	حد خمیری	حد روانی		
۴۰/۶	۳۷/۴	۲۰/۸	۳۱/۲	۱۰/۴	۱۵/۲

جدول ۵ آورده شده است. این مشخصات، میانگین ۲۰ نمونه از الیاف با قطرهای مختلف است که آزمایش کشش مستقیم روی آن‌ها انجام شده است. برای انجام این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D3822-07 [۲۴]، طول خالص هر نمونه از الیاف زیر دستگاه بارگذاری ۱۰۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۰/۰۵ میلی‌متر بر ثانیه بود.

مشخصات فیزیکی الیاف خرما مورد استفاده شامل طول، قطر، وزن مخصوص و جذب آب در جدول ۴ آمده است.

مشخصات مکانیکی الیاف خرما شامل مقاومت کششی، کرنش نقطه گسیختگی و مدول الاستیسیته، که با انجام آزمایش کشش مستقیم روی الیاف و مطابق با استاندارد ASTM D3822-07 [۲۴] تعیین شده، در



ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از الیاف



الف) الیاف خرما ی خرد شده

شکل ۲. الیاف خرما

Fig. 2. Palm fibers

جدول ۴. مشخصات فیزیکی الیاف خرما

Table 4. Physical properties of palm fibers

طول (mm)	قطر (mm)	وزن مخصوص (kN/m ³)	جذب آب تا حد اشباع (درصد وزنی الیاف)
۶۰-۵	۰/۱-۱	۶/۹ - ۱۸/۶	۱۵۴

جدول ۵. مشخصات مکانیکی الیاف خرما

Table 5. Mechanical properties of palm fibers

مقاومت کششی			کرنش نقطه گسیختگی			مدول الاستیسیته		
محدوه (MPa)	میانگین (MPa)	ضریب تغییرات (%)	محدوه	میانگین	ضریب تغییرات (%)	محدوه (MPa)	میانگین (MPa)	ضریب تغییرات (%)
۱۳۶-۳۶	۸۶	۲۹	-۰/۱۸۰	۰/۱۰۹	۳۳	۷۴۳ - ۴۰۳۲	۲۳۸۲	۳۲

۲-۳- نحوه ساخت بلوک‌های خشت

نقطه متناظر با ۰/۸ تنش فشاری حداکثر ($0.8f_c$) بعد از نقطه اوج منحنی تعیین می‌شود. همچنین مطابق شکل ۵ مساحت زیر دو نمودار اصلی و دو خطی از مبدأ تا باری معادل ۰/۸ تنش فشاری حداکثر ($0.8f_c$) با یکدیگر برابر بوده و دو نمودار همدیگر را در باری معادل ۰/۷ تنش حداکثر ($0.7f_c$) قطع می‌کنند. مدول الاستیسیته نیز به صورت مدول سکانتی مطابق با استاندارد NP EN 1052-1 [۲۷] و به صورت شیب خط وصل شده بین مبدا و نقطه متناظر با یک سوم تنش فشاری حداکثر ($1/3f_c$) تعریف می‌شود.

۲-۴-۲- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

به منظور تخمین مقاومت کششی نمونه‌ها، آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد $50 \times 50 \times 200$ میلی‌متر مکعب که از هر طرح اختلاط از بلوک‌های خشت کامل بریده شده بود، انجام شد. بارگذاری نمونه به صورت جابجایی - کنترل و با سرعت ثابت ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت [۲۶]. برای قرار دادن نمونه زیر دستگاه بارگذاری مطابق شکل ۶ و با توجه به استاندارد ASTM C348-14 [۲۸]، ابتدا از هر طرف به فاصله ۲۰ میلی‌متر با استفاده از میلگرد بدون آج (به طول حداقل ۲۰ میلی‌متر بزرگ‌تر از عرض نمونه) تکیه‌گاه‌هایی ایجاد شد به طوری که فاصله خالص تکیه‌گاه ابتدایی و انتهایی از هم برابر ۱۶۰ میلی‌متر بود. همچنین یک میلگرد در وسط و بالای نمونه طوری قرار گرفت که بار توسط دستگاه به صورت نقطه‌ای به وسط نمونه وارد شود. سپس حداکثر نیروی قابل تحمل برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. در نهایت با توجه به استاندارد EN1015-11 [۲۹] مقاومت کششی (مدول گسیختگی) هر نمونه با استفاده از تئوری اوپلر - برنولی مطابق رابطه (۱) به دست آمد:

$$f_t = 1.5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (1)$$

که در آن f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال، F حداکثر نیروی وارد بر نمونه بر حسب نیوتون، l فاصله خالص بین تکیه‌گاه‌ها بر حسب میلی‌متر، b عرض نمونه بر حسب میلی‌متر و d عمق نمونه بر حسب میلی‌متر است.

برای ساخت خشت‌های مسلح شده با الیاف در کارگاه، پس از مخلوط کردن الیاف با خاک خشک، آب به آن به صورت آب‌خوره اضافه شد و روی آن جهت جلوگیری از تبخیر پوشانده شد. مقدار آب مورد استفاده برای ساخت خشت شاهد تقریباً ۰/۲۵٪ وزنی خاک و برای خشت‌های مسلح شده با الیاف با توجه به جذب آب الیاف تقریباً ۰/۲۷ تا ۰/۳۰٪ وزنی خاک بود. بعد از گذشت ۳ روز، مخلوط به خوبی با پا ورز داده شد تا نرم و یکنواخت شود. چنانچه گل حاصل حالت خمیری مناسب نداشته باشد باید مقدار کمی آب به مخلوط اضافه کرد و یا در صورت اضافه بودن آب باید اجازه داد مقداری از آب مخلوط تبخیر شود و آن‌گاه قالب‌گیری انجام شود. به منظور همسان بودن با روند سنتی ساخت خشت، هنگام قالب‌گیری هیچ گونه عملیات متراکم‌سازی انجام نشده و خشت‌های حاصل بدون تراکم و با دست ساخته شدند. شکل ۳ مراحل خشت زنی را نشان می‌دهد. خشت‌های ساخته شده در ابعاد $50 \times 200 \times 200$ میلی‌متر مکعب بودند و پس از ساخت به مدت یک ماه در محیط کارگاه نگهداری شده تا کاملاً خشک شوند. در نهایت ۶ نمونه مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب جهت آزمایش مقاومت فشاری و ۶ نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد $50 \times 50 \times 200$ میلی‌متر مکعب جهت آزمایش خمش سه نقطه‌ای از خشت‌های هر طرح اختلاط، بریده شد.

۲-۴-۲- روش انجام آزمایش‌ها

۲-۴-۱- آزمایش فشاری

به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف الیاف خرما بر رفتار خشت تحت فشار محوری خالص، تعداد ۶ نمونه مکعبی به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب مطابق با استاندارد اروپایی EN 1926 [۲۵] تحت آزمایش فشاری قرار گرفت. پس از کلاهک‌گذاری سطح نمونه‌ها به وسیله یک لایه نازک ملات گچ، بارگذاری به صورت جابجایی - کنترل و با سرعت ثابت ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد [۲۶]. شکل ۴ یک نمونه مکعبی را تحت آزمایش فشاری نشان می‌دهد. با استفاده از منحنی‌های تنش - کرنش به دست آمده، مقاومت فشاری (f_c)، کرنش متناظر با تنش فشاری حداکثر، کرنش نقطه تسلیم (ϵ_y)، کرنش نهایی (ϵ_{II})، شکل‌پذیری و مدول الاستیسیته برای هر نمونه تعیین شد. شکل‌پذیری به صورت نسبت کرنش نهایی (ϵ_{II}) به کرنش نقطه تسلیم (ϵ_y) محاسبه می‌گردد. در این مطالعه به منظور محاسبه کرنش نهایی و تسلیم، از منحنی دو خطی مطابق با پیشنهاد پارسی و همکاران [۲۶] استفاده گردید. بدین منظور کرنش نهایی برابر با کرنش



ب) ایجاد آب‌خوره



الف) مخلوط الیاف با خاک خشک



د) ورز دادن مخلوط



ج) پوشاندن آب‌خوره با پلاستیک



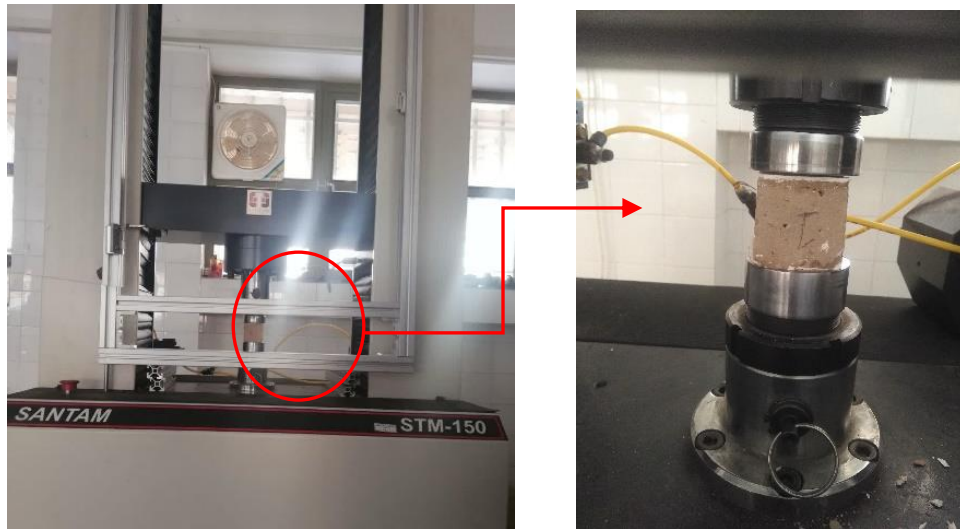
و) خشت‌های آماده شده



ه) قالب‌گیری و خشت زنی

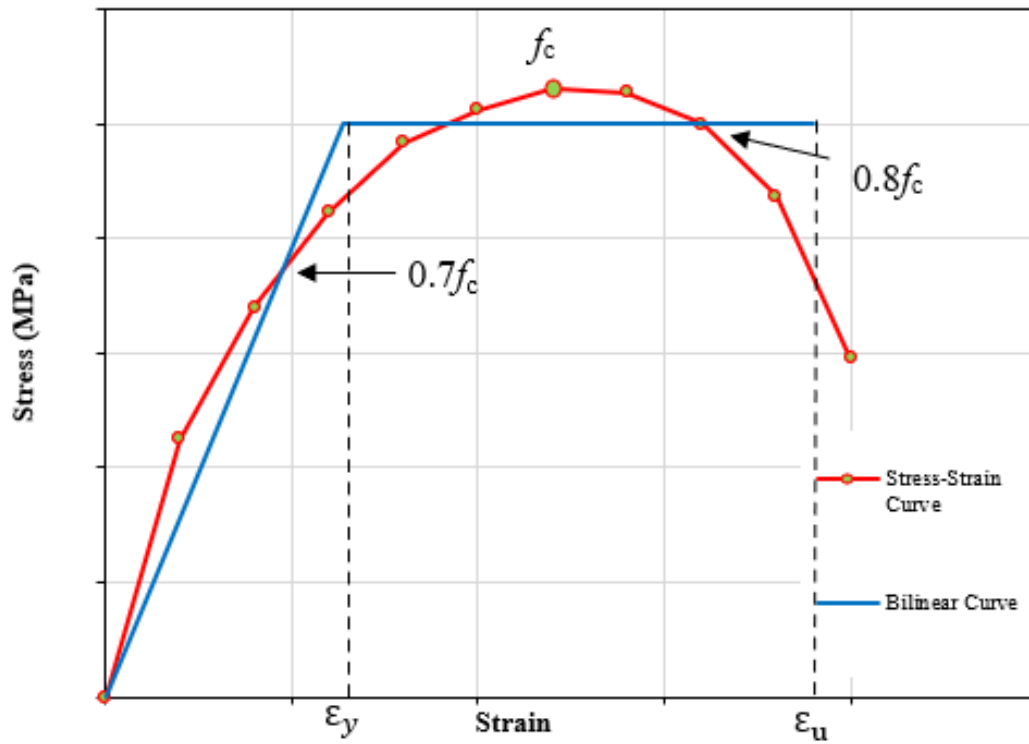
شکل ۳. مراحل تولید بلوک‌های خشت در کارگاه

Fig. 3. Production steps of adobe bricks in workshop



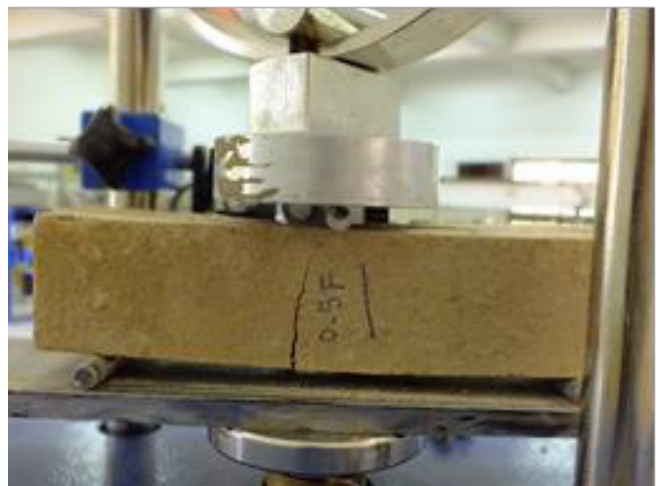
شکل ۴. یک نمونه مکعبی تحت آزمایش فشاری

Fig. 4. A typical cube specimen under compression test



شکل ۵. منحنی دو خطی نظیر منحنی تنش - کرنش

Fig. 5. Bilinear stress-strain curve



شکل ۶. یک نمونه مکعب مستطیلی تحت آزمایش خمش سه نقطه ای

Fig. 6. A typical prism specimen under three-point bending test

۳- تحلیل و نتایج

۳-۱- منحنی‌های تنش - کرنش فشاری

منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از آزمایش فشاری نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است، در حالی که مقادیر عددی مقاومت فشاری و تحلیل‌های آماری مربوط به آن در جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشند. لازم به ذکر است که NF به معنای نمونه‌های شاهد است و نمونه‌های مسلح شده با الیاف با توجه میزان الیاف به کار رفته در آن‌ها نام‌گذاری شده‌اند (به عنوان مثال 0.25F به معنای نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲۵٪ الیاف است).

با مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌ها ملاحظه می‌شود که افت بار در نمونه‌های مسلح شده با الیاف بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر، با سرعت کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد (NF) رخ می‌دهد که بیانگر رفتار شکل‌پذیرتر نمونه‌های مسلح شده با الیاف است. این رفتار در نمونه‌های مسلح شده با مقادیر ۰/۵ و ۰/۷۵٪ الیاف مشهودتر است.

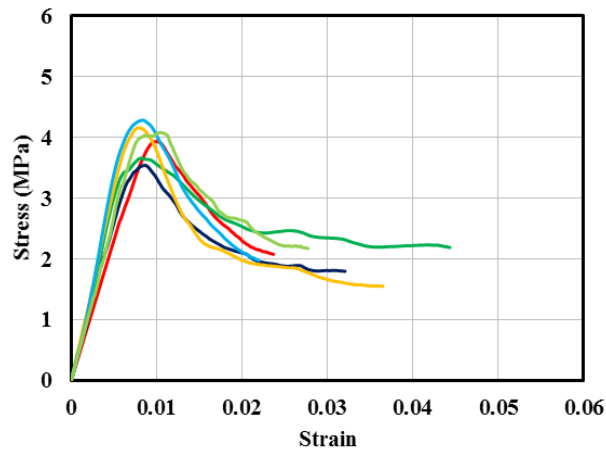
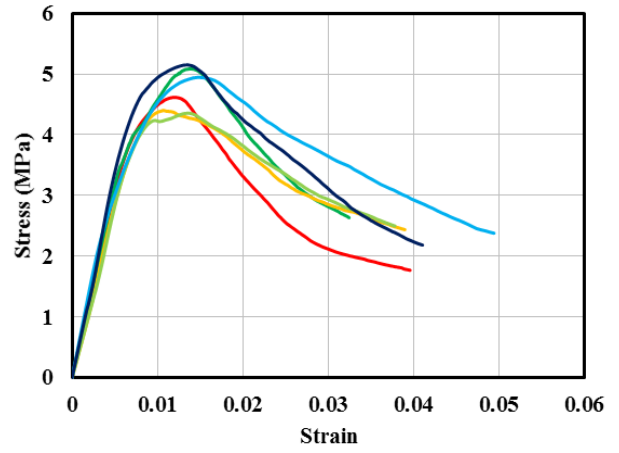
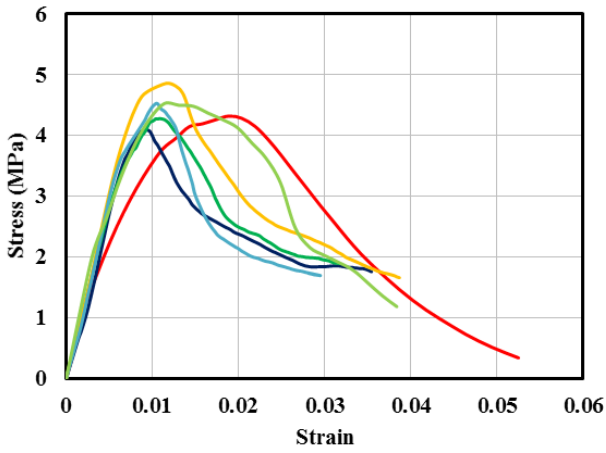
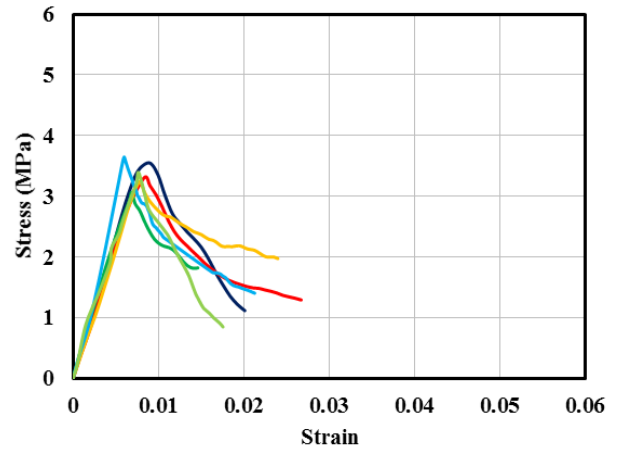
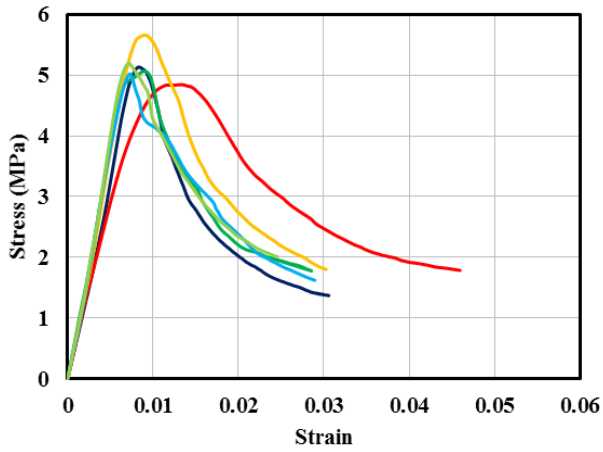
با توجه به نتایج جدول ۶، نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲۵٪ الیاف (۰.۲۵F) با میانگین مقاومت فشاری ۵/۰۳ مگاپاسکال دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند که تقریباً ۵۰٪ بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد با مقدار میانگین ۳/۳۶ مگاپاسکال است. به علاوه مقاومت فشاری همه نمونه‌های مسلح شده با الیاف از نمونه‌های شاهد بیشتر است، به طوری که میانگین مقاومت فشاری در نمونه‌های مسلح شده با ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۱٪

الیاف به ترتیب حدود ۴۱، ۳۲ و ۱۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های خشی با افزودن الیاف را می‌توان به زبری سطح الیاف که درگیری مناسبی بین الیاف و ماتریس خاک ایجاد می‌کند (مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل ۸) و همچنین استحکام کششی بالای الیاف خرما که با پیوند مناسب، از گسترش و انتشار ترک‌ها جلوگیری می‌کند، نسبت داد [۳۰ و ۱۲ و ۱۱].

روند نتایج مقاومت فشاری در جدول ۶ نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح شده، با افزایش مقدار الیاف کاهش داشته و به مقاومت نمونه شاهد نزدیک شده است؛ چرا که با افزایش میزان الیاف خرما، الیاف در بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث کاهش اتصال و اصطکاک ذرات خاک و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۳۱].

در شکل ۹ منحنی میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر حسب مقدار الیاف به کار رفته در آن‌ها و همچنین منحنی درجه سه برازش شده بین نقاط این منحنی ترسیم شده است. با استفاده از آنالیز داده‌های به دست آمده از آزمایش فشاری، می‌توان رابطه (۲) که رابطه درجه سه بین دو پارامتر مقاومت فشاری و مقدار الیاف به کار رفته در نمونه‌های مکعبی است را برای تخمین مقاومت فشاری خشت مسلح به الیاف خرما پیشنهاد داد.

$$f_{cp} = 9.51p^3 - 19.24p^2 + 10.31p + 3.39 \quad (2)$$



شکل ۷. منحنی های تنش - کرنش نمونه های مکعبی

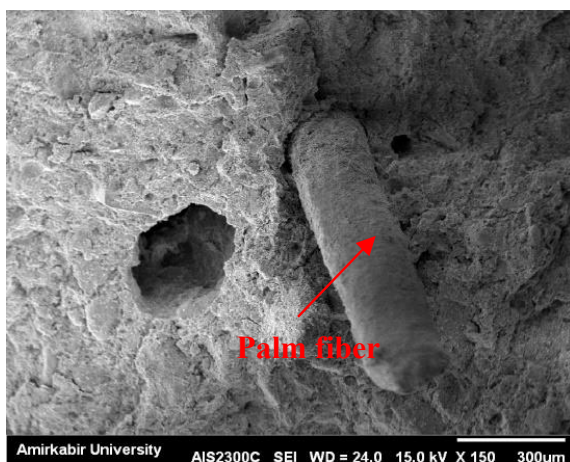
Fig. 7. Stress-strain curves of cube specimens

جدول ۶. نتایج مقاومت فشاری حاصل از منحنی های تنش - کرنش

Table 6. Results of the compressive strength obtained from the stress-strain curves

کرنش متناظر با تنش حداکثر	مقاومت فشاری						نمونه	
	تغییرات* (%)	میانگین	تغییرات* (%)	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار (MPa)	میانگین (MPa)		حداقل (MPa)
-	۰/۰۰۷۶	-	۵/۷	۰/۱۹	۳/۳۶	۳/۰۶	۳/۶۴	NF
۱۸/۴	۰/۰۰۹۰	۴۹/۷	۸/۹	۰/۴۵	۵/۰۳	۴/۱۴	۵/۶۵	0.25F
۷۳/۶	۰/۰۱۳۲	۴۱/۴	۶/۷	۰/۳۲	۴/۷۵	۴/۳۵	۵/۱۵	0.5F
۵۷/۸	۰/۰۱۲۰	۳۱/۸	۵/۵	۰/۲۴	۴/۴۳	۴/۰۸	۴/۸۵	0.75F
۱۷/۱	۰/۰۰۸۹	۱۷/۳	۶/۸	۰/۲۷	۳/۹۴	۳/۵۴	۴/۲۸	1.0F

* تغییرات میانگین مقاومت فشاری و میانگین کرنش متناظر با تنش حداکثر، نسبت به نمونه شاهد اندازه گیری شده است.



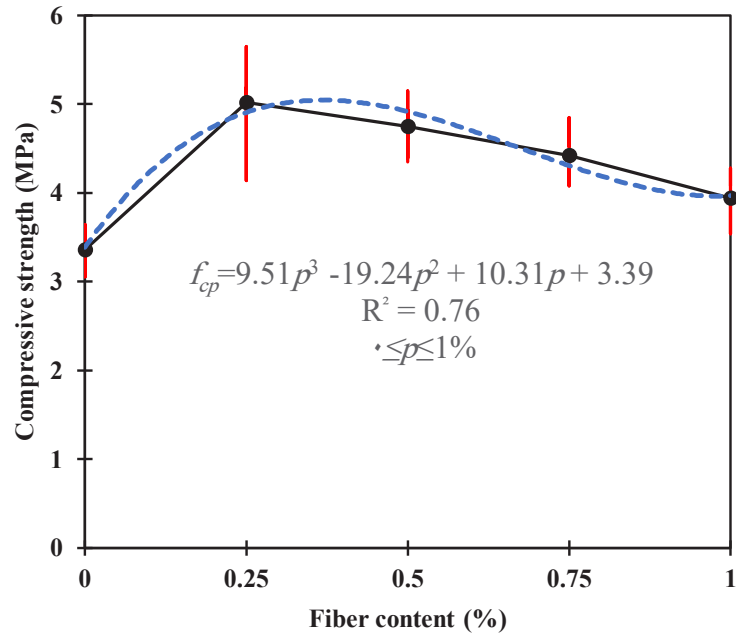
شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی از الیاف درون خشت

Fig.8. Microscopic illustration of palm fibers inside adobe

نمونه های مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده و بالاترین مقدار مربوط به نمونه با مقدار الیاف ۰/۲۵٪ است. تغییرات مدول الاستیسیته فشاری نمونه های مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه شاهد نشان می دهد با افزایش مقدار الیاف به تدریج از شدت روند کاهشی موجود کاسته شده به طوری که نمونه های مسلح شده با ۰/۷۵٪ و ۱٪ الیاف تقریباً مدول الاستیسیته مشابهی داشتند. این مسئله تأثیر مثبت حضور الیاف بر مدول الاستیسیته بلوک های خشتی را نشان می دهد؛ هر چند با افزایش مقدار الیاف این مقدار کاهش یافته است.

که در رابطه (۲)، f_{cp} مقاومت فشاری خشت بر حسب مگاپاسکال و p مقدار الیاف به کار رفته در آن بر حسب درصد است. لازم به ذکر است صحت رابطه (۲) فقط در محدوده درصد وزنی الیاف ۰ تا ۱٪ است. همچنین مقدار R^2 (ضریب تعیین^۱ یا میزان پراکندگی داده ها) رابطه (۲) برابر ۰/۷۶ است. مقادیر عددی مدول الاستیسیته به دست آمده از منحنی های تنش - کرنش فشاری نمونه ها (شکل ۷) و تحلیل های آماری آن در جدول ۷ گزارش شده است. با توجه به نتایج جدول ۷، میانگین مقادیر مدول الاستیسیته

1 Coefficient of determination



شکل ۹. منحنی میانگین مقاومت فشاری نمونه های مکعبی خشت بر حسب مقدار الیاف

Fig. 9. Average compressive strength curve of adobe cubes versus fiber content

جدول ۷. مقادیر مدول الاستیسیته به دست آمده از منحنی های تنش - کرنش فشاری

Table 7. Results of elastic modulus obtained from the compressive stress-strain curves

مدول الاستیسیته						نمونه
تغییرات* (%)	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار (MPa)	میانگین (MPa)	حداقل (MPa)	حداکثر (MPa)	
-	۱۰/۵	۴۸/۷۵	۴۶۵/۲۳	۳۹۸/۵	۵۳۲	NF
۴۴/۵	۷/۷	۵۱/۷۶	۶۷۲/۱۹	۶۰۰	۷۲۴/۱۳	0.25F
۳۰/۰	۱۰/۴	۶۳/۱۷	۶۰۴/۷۵	۵۱۶	۷۰۶/۸۹	0.5F
۱۹/۹	۱۱/۱	۶۱/۸۹	۵۵۷/۶۵	۴۷۲/۲۲	۶۶۹/۶۴	0.75F
۱۸/۳	۹/۴	۵۱/۷۲	۵۵۰/۴۶	۴۶۲/۸۹	۶۱۴	1.0F

*تغییرات میانگین مدول الاستیسیته نسبت به نمونه شاهد اندازه گیری شده است.

در رابطه (۳)، E_{CP} و f_{cp} به ترتیب مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری خشت مسلح شده با الیاف خرما بر حسب مگاپاسکال است. لازم به ذکر است مقدار ضریب R^2 (ضریب تعیین) رابطه (۳) برابر ۰/۹ است.

با استفاده از آنالیز داده های مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نمونه های مکعبی می توان رابطه خطی (۳) را برای تخمین مدول الاستیسیته خشت مسلح شده با الیاف خرما بر حسب مقاومت فشاری آن تخمین زد.

$$E_{cp} = 132f_{cp} \quad (۳)$$

۳-۲- شکل پذیری

منحنی‌های دوخطی نظیر هر یک از منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌ها در شکل ۱۰ و مقادیر عددی داده‌های به دست آمده از منحنی‌های دوخطی در جدول ۸ آمده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر درصد الیاف بر مقدار شکل‌پذیری، منحنی میانگین شکل‌پذیری نمونه‌ها بر حسب درصد الیاف در شکل ۱۱ ترسیم شده است.

با توجه به نتایج جدول ۸، نمونه‌های مسلح شده با ۰/۵٪ الیاف با میانگین ۲/۹۰ دارای بیشترین شکل‌پذیری و کمترین شکل‌پذیری مربوط به نمونه شاهد (بدون الیاف) با میانگین ۱/۶۲ است. این مسئله نشان می‌دهد نمونه‌های مسلح شده با الیاف شکل‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. این افزایش در نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ الیاف به ترتیب برابر ۱۹، ۷۹، ۳۵ و ۲۶٪ نسبت به نمونه شاهد است. بهبود خاصیت شکل‌پذیری خشت با افزودن الیاف را می‌توان به نقش الیاف در جلوگیری از باز شدن ترک‌ها (فشاری و خمشی) نسبت داد که از افت ناگهانی بار (نیرو) در نمونه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل ۱۱، با افزایش مقدار الیاف به بیش از ۰/۵٪ روند بهبود خاصیت شکل‌پذیری کندتر شده و باعث شده تا مقادیر شکل‌پذیری به شکل‌پذیری نمونه شاهد نزدیک شود. از موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت افزودن الیاف خرما به مقدار ۰/۷۵ و ۱٪ در خشت تأثیر مثبت کمتری در بهبود خاصیت شکل‌پذیری آن دارد؛ چرا که مقادیر زیاد الیاف باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک و الیاف شده و در نتیجه نقش الیاف در جلوگیری از باز شدن ترک‌ها کمتر و منجر به افت سریع‌تر بار و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری می‌شود.

۳-۳- مقاومت کششی

خلاصه نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای هر گروه از نمونه‌ها در جدول ۹ آمده است.

نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش مقدار الیاف افزایش یافته به طوری که حداکثر مقاومت کششی مربوط به نمونه مسلح شده با ۱٪ الیاف با میانگین ۱/۱۲ مگاپاسکال و حداقل مقاومت کششی مربوط به نمونه شاهد (بدون الیاف) با میانگین ۰/۵۵ مگاپاسکال است. همچنین مقاومت کششی همه نمونه‌های مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته و این افزایش در نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ الیاف به ترتیب برابر ۵۳، ۸۰، ۹۶ و ۱۰۳٪ است. با توجه به مطالب ذکر شده افزودن الیاف خرما از مقدار ۰/۲۵ تا ۱٪ وزنی خاک به طور مستقیم باعث افزایش مقاومت کششی شده، هر چند روند

نتایج نشان می‌دهد سرعت افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد با افزایش مقدار الیاف کاهش یافته است. بهبود مقاومت کششی با افزودن الیاف را می‌توان به مقاومت کششی بالای الیاف و توانایی آن‌ها در جلوگیری از باز شدن ترک‌ها نسبت داد [۳۲].

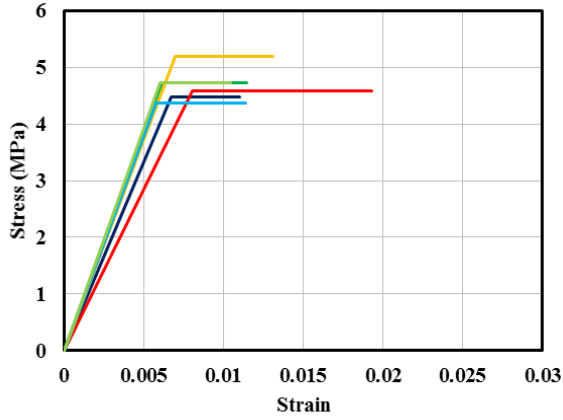
در شکل ۱۲ منحنی میانگین مقاومت کششی نمونه‌های مکعب مستطیلی خشت بر حسب مقدار الیاف به کار رفته در آن‌ها و همچنین منحنی درجه دو برازش شده بین نقاط این منحنی ترسیم شده است. با استفاده از آنالیز داده‌های به دست آمده، رابطه درجه دو (۴) برای تخمین مقاومت کششی خشت بر حسب مقدار الیاف به کار رفته در آن پیشنهاد می‌شود.

$$f_{ip} = -0.64p^2 + 1.91p + 0.56 \quad (4)$$

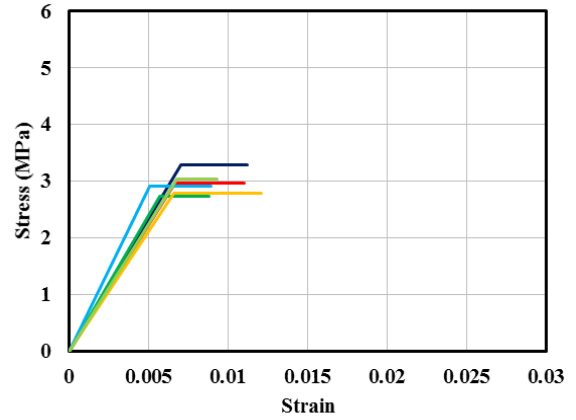
که در رابطه (۴)، f_{ip} مقاومت کششی خشت بر حسب مگاپاسکال و p مقدار الیاف مورد استفاده در آن بر حسب درصد است. مقدار R^2 (ضریب تعیین) رابطه (۴) برابر ۰/۹۱ است. لازم به ذکر است صحت رابطه (۴) فقط در محدوده درصد وزنی الیاف ۰ تا ۱٪ است.

منحنی نیرو - تغییر مکان آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای یک نمونه بدون الیاف و یک نمونه مسلح شده با ۰/۵٪ الیاف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

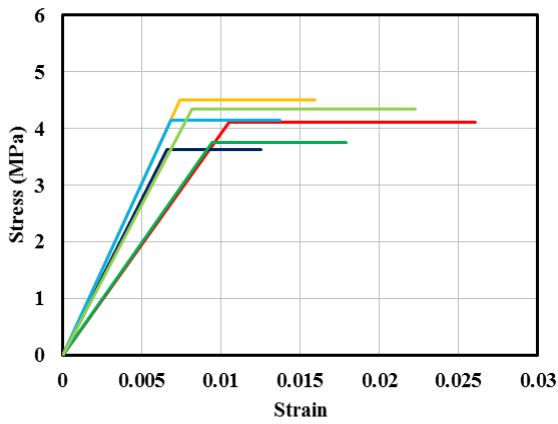
با توجه به منحنی شکل ۱۳، هر دو نمونه تا رسیدن به نقطه حداکثر نیروی کششی از یک رفتار خطی الاستیک پیروی کرده و در نهایت، ترک‌ها گسترش یافته و منجر به شکافت نمونه شده است. در نمونه بدون الیاف این شکافت منجر به گسیختگی ناگهانی و دو نیم شدن نمونه شد، در حالی که در نمونه مسلح شده با الیاف، شکافت ایجاد شده به دلیل وجود الیاف منجر به گسیختگی کامل نمونه نشده است (شکل ۱۴). همچنین در نمونه مسلح شده با الیاف، پس از رسیدن به نیروی حداکثر و افت بار، تحمل نیرو ادامه داشته و ترک‌ها به صورت کنترل شده ادامه پیدا کرده است. همچنین در نمونه‌های با مقدار الیاف کمتر عرض ترک گسیختگی بعد از شکست کامل نمونه، بیشتر است. با توجه به نتایج جدول ۹ و منحنی‌های شکل ۱۳، علاوه بر تأثیر الیاف در افزایش مقدار حداکثر نیروی گسیختگی، مشاهده می‌شود نمونه‌های مسلح شده با الیاف، در نقطه متناظر با نیروی حداکثر، تغییر مکان بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته و این مقدار با افزایش مقدار الیاف افزایش یافته است به طوری که در نمونه با ۱٪ الیاف جابجایی متناظر با نیروی حداکثر بیش از ۱۰۰٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داشته است.



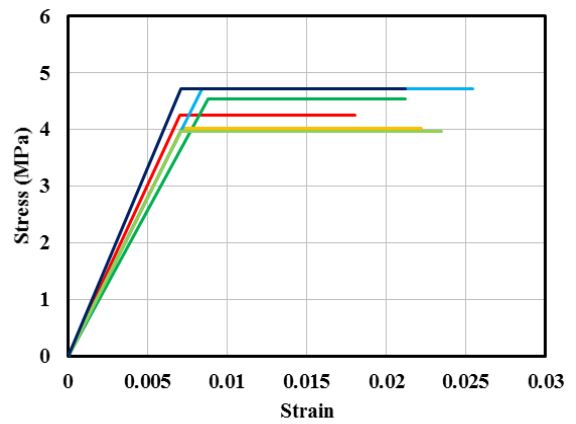
ب) 0.25F



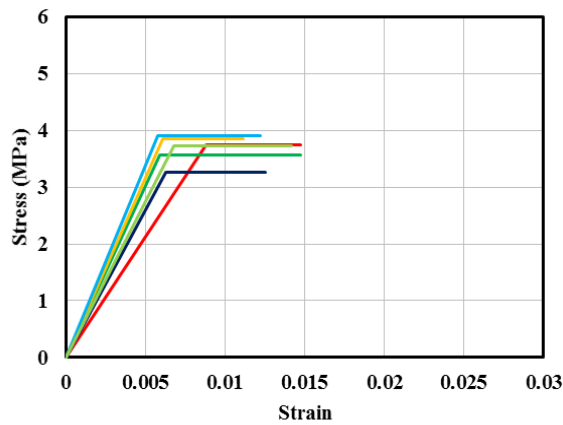
الف) NF



د) 0.75F



ج) 0.5F



ه) 1.0F

شکل ۱۰. منحنی های دوخطی متناظر با منحنی های تنش - کرنش نمونه ها

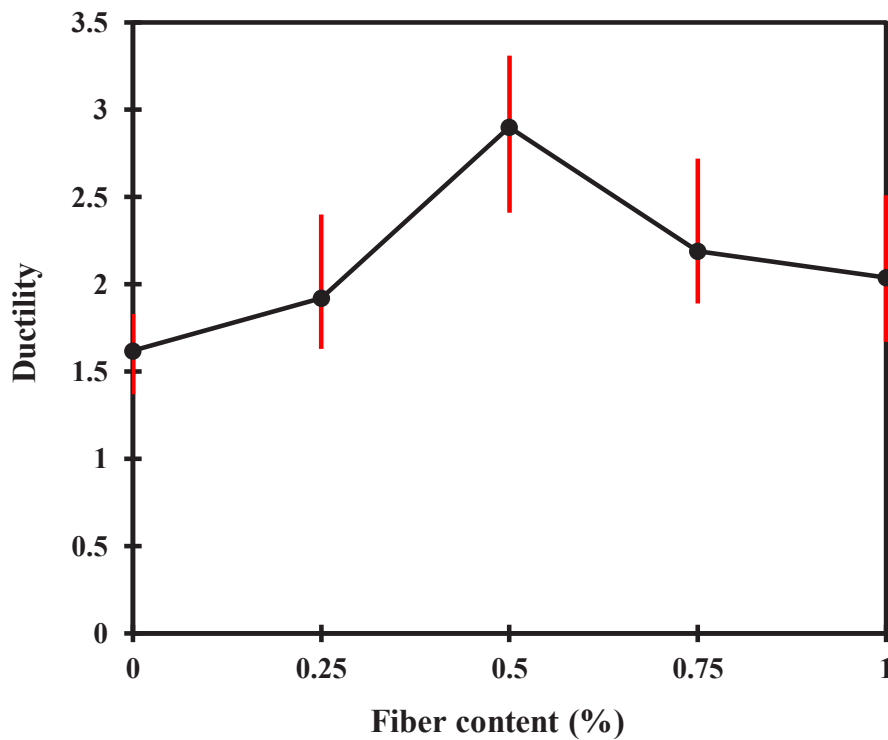
Fig. 10. Bilinear curves of actual stress-strain curves of specimens

جدول ۸. نتایج حاصل از منحنی های دوخطی

Table 8. Results of bilinear curves

نمونه	کرنش تسلیم		کرنش نهایی			شکل پذیری		تغییرات* (%)
	میانگین	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	
NF	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۰۲	۱/۸۳	۱/۳۷	۱/۶۲	۰/۱۵	۹/۳	-
0.25F	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۲۷	۲/۴۰	۱/۶۳	۱/۹۲	۰/۲۴	۱۲/۸	۱۸/۵
0.5F	۰/۰۰۷۵	۰/۰۲۱۹	۳/۳۱	۲/۴۱	۲/۹۰	۰/۳۱	۱۰/۸	۷۹/۰
0.75F	۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۸۰	۲/۷۲	۱/۸۹	۲/۱۹	۰/۳۱	۱۴/۱	۳۵/۲
1.0F	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۳۲	۲/۵۱	۱/۶۷	۲/۰۴	۰/۲۶	۱۲/۹	۲۵/۹

*تغییرات میانگین شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد اندازه گیری شده است.



شکل ۱۱. منحنی میانگین شکل پذیری نمونه ها بر حسب درصد الیاف

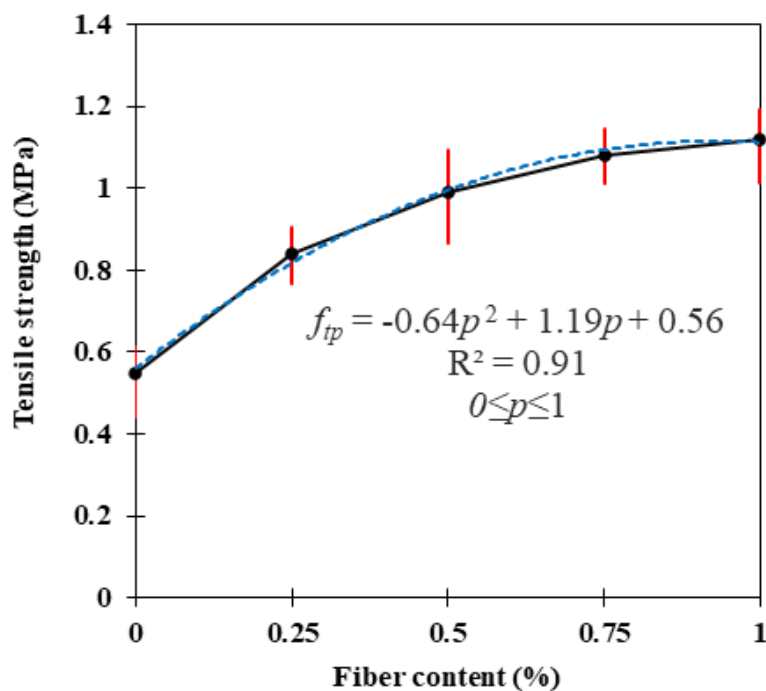
Fig. 11. Average ductility curve of specimens versus fiber content

جدول ۹. نتایج آزمایش خمش سه نقطه ای

Table 9. Results of three-point bending test

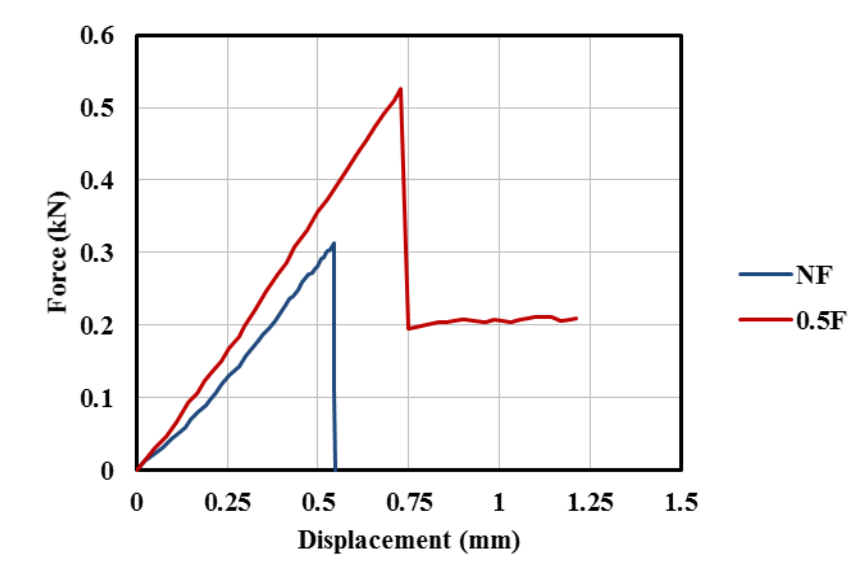
نمونه	نیروی حداکثر		تغییر مکان متناظر با نیروی حداکثر					مقاومت کششی	
	میانگین (kN)	تغییرات* (%)	میانگین (mm)	تغییرات* (%)	حداکثر (MPa)	حداقل (MPa)	میانگین (MPa)	انحراف معیار (MPa)	ضریب تغییرات (%)
NF	۰/۲۹	-	۰/۴۹۲	-	۰/۶۱	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۰۶	۱۰/۲
0.25F	۰/۴۴	۱۸/۵	۰/۵۸۳	۱۸/۵	۰/۹	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۰۴	۵۲/۷
0.5F	۰/۵۱	۵۳/۳	۰/۷۵۴	۵۳/۳	۱/۰۹	۰/۸۶	۰/۹۹	۰/۰۸	۷/۷
0.75F	۰/۵۶	۱۰۳/۷	۱/۰۰۲	۱۰۳/۷	۱/۰۹	۱/۰۲	۱/۰۸	۰/۰۴	۴/۰
1.0F	۰/۵۸	۱۰۵/۵	۱/۰۱۱	۱۰۵/۵	۱/۱۹	۱/۰۲	۱/۱۲	۰/۰۷	۶/۱

*تغییرات میانگین تغییر مکان متناظر با نیروی حداکثر و میانگین مقاومت کششی، نسبت به نمونه شاهد اندازه گیری شده است.



شکل ۱۲. منحنی میانگین مقاومت کششی نمونه های خشت بر حسب مقدار الیاف

Fig.12. Average tensile strength of adobe specimens versus fiber content



شکل ۱۳. منحنی‌های نیرو - تغییر مکان یک نمونه بدون الیاف و یک نمونه مسلح شده با ۰/۵٪ الیاف

Fig. 13. Load-displacement curves of a specimen without fiber and a specimen with 0.5% fiber content



شکل ۱۴. نمونه‌ها بعد از آزمایش خمش سه نقطه‌ای

Fig. 14. Status of specimens after three-point bending test

۶- فهرست علائم

b	عرض مقطع، mm
d	عمق مقطع، mm
E_{cp}	مدول الاستیسیته خشت مسلح شده با الیاف خرما، MPa
F	حداکثر نیروی وارد بر نمونه، kN
f_c	مقاومت فشاری، MPa
f_{cp}	مقاومت فشاری خشت مسلح شده با الیاف خرما، MPa
f_t	مقاومت کششی، MPa
f_{tp}	مقاومت کششی خشت مسلح شده با الیاف خرما، MPa
p	مقدر الیاف خرما، %
l	فاصله خالص بین تکیه‌گاه‌ها، mm

علائم یونانی

ϵ_u	کرنش نهایی
ϵ_y	کرنش تسلیم

زیر نویس

* پاورقی جدول

منابع

- [1] A. Olotuah, Recourse to earth for low-cost housing in Nigeria, Building and environment, 37(1) (2002) 123-129.
- [2] F. Tootoonchy, B. Asgarian, F. Danesh, Experimental in-plane behavior and retrofitting method of mud-brick walls, International Journal of Civil Engineering, 13(2) (2015) 191-201.
- [3] A.U. Pope, Arthur Upham Pope Introducing Persian Architecture, Published under the auspices of the Farah Pahlavi Cultural Foundation & the ..., 1976.
- [4] A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour, A. Bakhshi, Reinforcement Approach in Experimental Investigations of Mud Brick Wall under Diagonal Tension, Journal of Housing and Rural Environment, 35(154) (2016) 107-124 (in persian).
- [5] UNESCO. World heritage list. Paris: United Nations

این مسئله نشان می‌دهد حضور الیاف در خشت گسترش ترک‌ها را به تعویق انداخته و گسیختگی نمونه‌ها در مقادیر بزرگ‌تر جابجایی اتفاق افتاده است.

۴- جمع بندی

در این مطالعه تأثیر استفاده از مقادیر مختلف وزنی الیاف درخت خرما (۰ تا ۱٪ وزنی خاک) به عنوان یک مسلح کننده طبیعی در بلوک‌های خشتی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای هر گروه از خشت‌های شاهد و مسلح شده با الیاف، ۶ نمونه مکعبی و ۶ نمونه مکعب مستطیلی بریده شد و مورد آزمایش فشاری و خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت. در نهایت نتایج به دست آمده از آزمون فشاری و خمشی نمونه‌های مسلح شده با الیاف با نمونه‌های شاهد مقایسه شدند. نتایج به دست آمده در این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. استفاده از الیاف خرما به میزان ۰/۲۵٪ وزنی خاک می‌تواند مقاومت فشاری خشت را تا ۵۰٪ و مدول الاستیسیته فشاری را تا ۴۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد.
۲. اگرچه افزودن مقدار ۰ تا ۱٪ الیاف به خشت مقاومت فشاری را بهبود می‌بخشد ولی با افزایش میزان الیاف از ۰/۵ تا ۱٪ مقاومت فشاری خشت به تدریج کاهش می‌یابد.
۳. استفاده از الیاف خرما به مقدار ۰/۵٪ وزنی خاک در بلوک‌های خشتی، باعث افزایش شکل‌پذیری تا حدود ۸۰٪ نسبت به نمونه شاهد شد. هر چند نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از الیاف به میزان بیش از ۰/۵٪ (تا ۱٪) وزنی خاک می‌تواند تأثیر کمتری بر بهبود خاصیت شکل‌پذیری خشت داشته باشد.
۴. با افزایش مقدار الیاف خرما از ۰ تا ۱٪ وزنی خاک، به تدریج مقاومت کششی مصالح خشتی هم افزایش می‌یابد. (تا بیش از ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شاهد)
۵. در مجموع بر اساس نتایج به دست آمده مسلح کردن بلوک‌های خشتی با ۰/۵٪ الیاف به عنوان مقدار بهینه برای بهبود خواص مکانیکی آن‌ها پیشنهاد می‌شود.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از راهنمایی‌ها و زحمات آقای مهندس حسین میرابی مسئول محترم آزمایشگاه سازه دانشکده عمران دانشگاه یزد جهت انجام این مطالعه کمال قدردانی و تشکر را دارند. همچنین از حمایت‌های مالی پژوهشکده معماری بومی دانشگاه یزد جهت انجام این پژوهش سپاس‌گزاری می‌شود.

- with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction, *Construction and Building Materials*, 273 (2021) 121686.
- [15] E. Olacia, A.L. Pisello, V. Chiodo, S. Maisano, A. Frazzica, L.F. Cabeza, Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization, *Construction and Building Materials*, 239 (2020) 117669.
- [16] R. Illampas, V.G. Loizou, I. Ioannou, Effect of straw fiber reinforcement on the mechanical properties of adobe bricks, in: *Poromechanics VI*, 2017, pp. 1331-1338.
- [17] Y. Millogo, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, K. Ghavami, Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers, *Construction and Building Materials*, 52 (2014) 71-78.
- [18] G. Araya-Letelier, F. Antico, C. Burbano-Garcia, J. Concha-Riedel, J. Norambuena-Contreras, J. Concha, E.S. Flores, Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers, *Construction and Building Materials*, 276 (2021) 122127.
- [19] E. Quagliarini, S. Lenci, The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks, *Journal of Cultural Heritage*, 11(3) (2010) 309-314.
- [20] J. Vargas-Neumann, C. Oliveira, D. Silveira, H. Varum, Seismic Retrofit of Adobe Constructions, in: *Strengthening and Retrofitting of Existing Structures*, Springer, 2018, pp. 85-111.
- [21] ASTM International, ASTM D7928 - 17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, USA, 2017.
- [22] ASTM International, ASTM D6913/D6913M - 17 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, USA, 2017.
- [23] ASTM International, ASTM D4318 - 17 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO); 2016. <http://whc.unesco.org/en/list/>.
- [6] M. Bouhicha, F. Aouissi, S. Kenai, Performance of composite soil reinforced with barley straw, *Cement and concrete composites*, 27(5) (2005) 617-621.
- [7] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, J. Petric, Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre, *Construction and Building Materials*, 24(8) (2010) 1462-1468.
- [8] A.V. Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour, Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests, *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 137-147.
- [9] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 719-728.
- [10] Ş. Yetgin, Ö. Çavdar, A. Cavdar, The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes, *Construction and Building Materials*, 22(3) (2008) 222-227.
- [11] M. Ouedraogo, K. Dao, Y. Millogo, J.-E. Aubert, A. Messan, M. Seynou, L. Zerbo, M. Gomina, Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw, *Journal of Building Engineering*, 23 (2019) 250-258.
- [12] H. Danso, D.B. Martinson, M. Ali, J.B. Williams, Mechanisms by which the inclusion of natural fibres enhance the properties of soil blocks for construction, *Journal of Composite Materials*, 51(27) (2017) 3835-3845.
- [13] J. Concha-Riedel, G. Araya-Letelier, F.C. Antico, U. Reidel, A. Glade, Influence of jute fibers to improve flexural toughness, impact resistance and drying shrinkage cracking in adobe mixes, in: *Earthen Dwellings and Structures*, Springer, 2019, pp. 269-278.
- [14] O. Ige, H. Danso, Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced

- [29] EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry – part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 2019.
- [30] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers, *Construction and Building Materials*, 178 (2018) 204-210.
- [31] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida, Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions, *Construction and Building Materials*, 28(1) (2012) 36-44.
- [32] H. Danso, D.B. Martinson, M. Ali, J. Williams, Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks, *Construction and Building Materials*, 83 (2015) 314-319.
- Index of Soils, USA, 2017.
- [24] ASTM D 3822-07. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers, 2007.
- [25] EN 1926. Natural stone test methods – determination of compressive strength. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 2006.
- [26] F. Parisi, D. Asprone, L. Fenu, A. Prota, Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers, *Composite Structures*, 122 (2015) 300-307.
- [27] NP EN 1052-1: 2002 Methods of test for masonry – Part 1: Determination of compressive strength. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ); 2002 [Portuguese].
- [28] ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2014.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Experimental evaluation into improving the mechanical properties of adobe using palm fibers, *Experimental evaluation into improving the mechanical properties of adobe using palm fibers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 2321-2342.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19652.7222](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19652.7222)



