



Investigation of the Effects of Weathering and Decay on Soil Stabilized with Rice Straw Fibers

Mohammad amin ghasemi¹, Mohsen Keramati^{1*}, Hossein Moradi Moghaddam²

¹Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

²Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This study investigates the effect of varying levels of rice straw fiber (RSF) decomposition on the unconfined compressive strength (UCS) of soil stabilized with different cement contents. The evaluation was conducted using the unconfined compressive strength test (UCS) and standard compaction tests (SCT). Additionally, the effect of weathering on the weight changes of soil samples containing different percentages of fibers was examined through freeze-thaw cycle tests. The variables in this research include: Fiber content (0%, 0.25%, 0.5%, and 1%), cement content (0%, 4%, 8%, and 12%) and curing time (0, 7, 14, and 28 days). The objective of examining the effects of decomposition and weathering on natural fibers is to achieve sustainability goals in geotechnical engineering. The results indicated that as the fiber content increased from 0% to 1%, the compressive strength of both dry and wet samples decreased, while the strain at failure increased. In decomposed samples, the compressive strength and strain at failure decreased by 39.28% and 80.69%, respectively. It is noteworthy that stabilized samples containing 12% cement exhibited higher compressive strength than those with 4% and 8% cement, although their strain at failure was lower. In the freeze-thaw cycle tests, the weight loss increased with a higher percentage of fibers, especially in the cured samples. The average R² values of approximately 0.88 also demonstrate the effectiveness of the Response Surface Methodology (RSM) models.

Review History:

Received: Dec. 26, 2024

Revised: Sep. 13, 2025

Accepted: Oct. 10, 2025

Available Online: Oct. 31, 2025

Keywords:

Rice Straw Fibers

Weathering

Decay

Cement

RSM

1- Introduction

Improving soil behavior can be achieved through various mechanical and chemical stabilization methods, depending on environmental, economic, and structural considerations [1,2]. In recent years, the sustainable reinforcement of soil using natural fibers has gained attention as an eco-friendly alternative to conventional stabilizers such as lime and cement [3]. Synthetic fibers have been widely used to enhance soil and concrete performance [4,5]; however, several researchers have emphasized the use of natural fibers to promote sustainable geotechnical practices [6].

Among natural fibers, rice straw—an agricultural by-product abundantly available in farmlands—is an environmentally friendly material with significant potential for soil improvement [7]. The open burning of rice straw contributes to air pollution and the loss of soil organic matter, while its reuse as a reinforcing material can enhance soil strength and sustainability. Agricultural and industrial waste utilization has also become an important approach for reducing greenhouse gas emissions and promoting circular economy principles [8,9]. Bio-based materials improve the durability and strength of soils and other construction materials, with

plant fibers—composed mainly of cellulose, hemicellulose, and lignin—showing strong tensile and flexural properties. Recently, numerical methods have been developed to predict laboratory data in civil engineering applications, which can be used to reduce costs and save money [10-12].

Nevertheless, biodegradability and decay remain challenges in natural fiber applications, as environmental exposure affects fiber strength and bonding. To assess these effects, degradation and freeze-thaw cycles were simulated following ASTM D560/D560M-16 standards. In this study, rice straw fibers and cement were jointly used to investigate the mechanical behavior of stabilized soil under different curing and decay conditions. Furthermore, Response Surface Methodology (RSM) was applied to develop diagnostic models and evaluate the relationships among experimental parameters [13,14].

2- Materials and Methods

The cohesive clayey soil used in this study was classified as CL according to the USCS. Rice straw fibers were collected from agricultural fields in Mazandaran Province, Iran. They had a specific gravity of 0.23, an average diameter of 0.2

*Corresponding author's email: keramati@sharoodut.ac.ir



Table 1. Changes in the compressive strength and strain at failure of the samples containing 1% fibers.

Changes in strain at failure relative to the control specimen	Changes in compressive strength relative to the control specimen	Specimen containing 1% fiber	Curing (days)
34.57% increase	50% decrease	Wet	0
69.89% decrease	293.33% increase	Dry	
99.41% decrease	43.33% decrease	Wet	7
64.6% decrease	329.99% increase	Dry	
36.13% increase	0%	Wet	14
52.23% decrease	336.66% increase	Dry	
65.42% decrease	43.35% increase	Wet	28
86.52% decrease	359.99% increase	Dry	

cm, and were cut to 1 cm length to ensure uniform mixing with the soil. Type II Portland cement with a specific gravity of 3.0–3.25 was used at 4%, 8%, and 12% by dry weight to study the effect of cement stabilization and fiber decay. The samples were then constructed to use for various experiments like standard proctor and uniaxial compressive strength tests.

3- Discussion and Results

The compaction results showed that adding rice straw fibers reduced the maximum dry density and increased the optimum moisture content due to the lightweight and absorbent nature of the fibers. The addition of cement improved the density and bonding between soil particles

Unconfined compressive strength (UCS) tests indicated that dry samples had higher strength than wet samples. Increasing fiber content slightly decreased UCS but enhanced ductility by increasing strain at failure. However, decayed fibers led to a clear drop in both strength and strain, mainly because of the deterioration of fiber–soil bonding. Cement stabilization effectively compensated for this reduction, with 12% cement content producing up to four times greater UCS than untreated soil (Table 1). Curing time significantly influenced soil performance. Longer curing periods resulted in higher UCS and lower strain at failure, suggesting stronger yet more brittle behavior. The freeze–thaw cycle tests revealed minor weight loss and small variations in UCS, confirming that fiber inclusion helped preserve soil integrity under repeated freezing and thawing. Figure 1 illustrates the response surface modeling (RSM) results, showing the

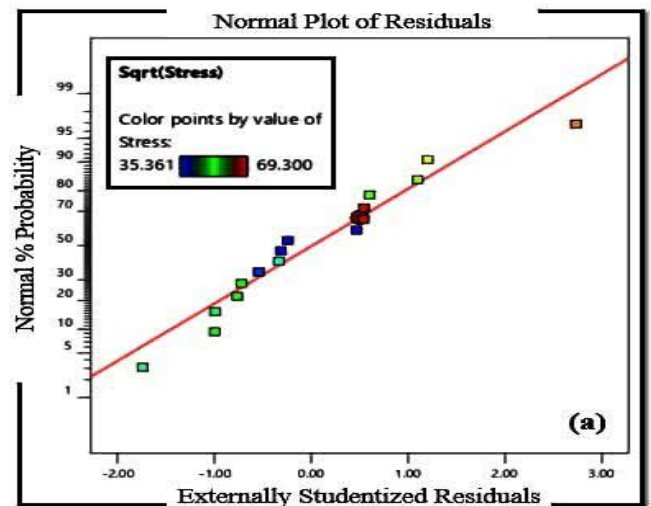


Fig. 1. Normal probability plots of residuals for stress parameter (RSM).

relationship between fiber percentage, cement content, and UCS. The model highlights that UCS increases with cement addition, while excessive fiber content slightly reduces overall strength due to weaker interfacial bonding. Overall, cement addition and curing duration are the key factors enhancing soil strength, while fiber inclusion mainly improves ductility. Fiber decay reduces both strength and strain, but its negative effect can be mitigated by proper cement stabilization and curing.

4- Conclusion

- Decay of rice straw fibers resulted in a reduction in both UCS and strain, attributed to increased porosity and the loss of tensile capacity in the fibers. Although decayed samples had higher UCS than wet ones, they exhibited brittle failure behavior. Cement stabilization, particularly with 12% cement, markedly improved UCS while reducing strain. In decayed fiber samples, cement effectively filled the voids created by fiber degradation, enhancing the overall bonding and integrity of the soil matrix.
- Mathematical models developed using the Response Surface Methodology (RSM) showed strong agreement with the experimental data ($R^2 = 0.84$ for stress and $R^2 = 0.94$ for strain), confirming that the proposed approach can reliably predict the mechanical response of fiber-stabilized soils.

References

[1] M. A. Khodabandeh, S. Nokande, A. Besharatinezhad, B. Sadeghi, S. M. Hosseini, The Effect of Acidic and Alkaline Chemical Solutions on the Behavior of Collapsible Soils, *Period. Polytech. Civ. Eng.* (2020)

- [2] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *International Journal of Civil Engineering*. (2021) 1313-1325.
- [3] G. Liu, C. Zhang, M. Zhao, W. Guo, Q. Luo, Comparison of Nanomaterials with Other Unconventional Materials Used as Additives for Soil Improvement in the Context of Sustainable Development: A Review, *Nanomaterials*. 11(1) (2020) 15.
- [4] M.R. Karami, M. Keramati, M. Ebrahimi, H. Moradi Moghaddam, R. Maadi, Laboratory Evaluation of CBR Values in Geopet-Reinforced Sandy Soils: Modeling with the RSM Method, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(10) (2024) 1321-1350.
- [5] S. Bojnourdi, S. S. Narani, M. Abbaspour, T. Ebadi, S. M. Mir Mohammad Hosseini, Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures, *Eng. Geology*. 279 (2020) 105886.
- [6] M. M. Roshani, S. H. Kargar, V. Farhangi, M. Karakouzian, Predicting the Effect of Fly Ash on Concrete's Mechanical Properties by ANN, *Sustainability*. 13(3) (2021) 1469.
- [7] F. Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, *Geomechanics and Geoengineering*. (2021) 1-16.
- [8] P. Alidoust, P. Kargar, S. Goodarzi, M. Keramati, H. Moradi Moqaddam, Laboratory-based assessment on similarities between dynamic behavior of MSW and clay, *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 23(2) (2021) 622-643
- [9] S. Moin and S. Qasim, Effect on dynamic parameters of waste reinforced soil under vibrations generated through traffic loading: Experimental evaluation, *J. Eng. Res.* (2023)
- [10] H.M. Moghaddam, M. Keramati, A. Fahimifar, T. Ebadi, S. Siddiqua, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, S. Dessouky, Shear modulus prediction of landfill components using novel machine learners hybridized with forensic-based investigation optimization, *Construction and Building Materials*. 411 (2024) 134443.
- [11] M. H. Moradi, M. Keramati, A. Bahrami, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, H.F. Isleem, M. Navazani, S. Dessouky, Application of hybridized ensemble learning and equilibrium optimization in estimating damping ratios of municipal solid waste, *Scientific Reports*. 14(1) (2024) 17584.
- [12] A.T. Amlashi, A.R. Ghanizadeh, S. Firouzranjbar, H.M. Moghaddam, M. Navazani, H.F. Isleem, S. Dessouky, M. Khishe, Predicting workability and mechanical properties of bentonite plastic concrete using hybrid ensemble learning, *Scientific Reports*. 15(1) (2025) 7686.
- [13] M.R. Karami, M. Keramati, R. Maadi, H. Moradi Moghaddam, Effect of layered polyethylene terephthalate (Geopet) for reinforcing stabilized sand with fly ash, *World Journal of Engineering*. 22(3) (2025) 638-651.
- [14] H.M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays using experimental and artificial methods, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 17(1) (2025) 524-538.



بررسی اثر هوازدگی و پوسیدگی بر روی خاک تثبیت شده با الیاف ساقه برنج

محمدامین قاسمی^۱، محسن کرامتی^{۱*}، حسین مرادی مقدم^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

کلمات کلیدی:

الیاف ساقه برنج
هوازدگی
پوسیدگی
سیمان
روش سطح پاسخ

خلاصه: در این پژوهش، تأثیر سطوح مختلف پوسیدگی الیاف ساقه برنج (RSF) بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. این ارزیابی با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و آزمایش های تراکم استاندارد (SCT) انجام شد. همچنین، تأثیر هوازدگی بر تغییرات وزنی نمونه های خاک حاوی درصد های مختلف الیاف از طریق آزمایش های سیکل ذوب - یخ بررسی شد. متغیرهای این پژوهش شامل درصد الیاف (۰٪، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪)، درصد سیمان (۰٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪) و زمان عمل آوری (۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) می باشد. هدف از بررسی اثرات پوسیدگی و هوازدگی بر الیاف طبیعی، دستیابی به اهداف پایداری در مهندسی ژئوتکنیک است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد الیاف از ۰٪ به ۱٪، مقاومت فشاری نمونه های خشک و مرطوب کاهش و کرنش گسیختگی افزایش یافته است. در نمونه های پوسیده، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی به ترتیب ۳۹/۲۸٪ و ۸۰/۶۹٪ کاهش یافت. لازم به ذکر است که نمونه های تثبیت شده حاوی ۱۲٪ سیمان، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه های حاوی ۴٪ و ۸٪ سیمان داشتند، هرچند کرنش گسیختگی در آن ها کمتر بود. در آزمایش های سیکل ذوب - یخ، با افزایش درصد الیاف، به ویژه در نمونه های عمل آوری شده، کاهش وزن افزایش یافت. مقادیر میانگین ۲٪ حدوداً ۰/۸۸ نیز کارایی مدل های روش سطح پاسخ (RSM) را نشان می دهد.

۱- مقدمه

با توجه به عوامل مختلف مانند جنبه های اقتصادی و ساخت و ساز، ملاحظات زیست محیطی و غیره چالش برانگیزتر است. [۲،۳]

با پذیرش گسترده ایده توسعه پایدار در قرن حاضر، در دهه های اخیر مواد متنوعی برای بهبود خاک به جای مواد سنتی مانند بتن و آهک استفاده شده اند [۴]. الیاف مصنوعی به دلیل عملکرد بالا در بتن سازه ای و تقویت خاک، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته اند [۵،۶]. علاوه بر این، برخی پژوهشگران استفاده از الیاف طبیعی را به جای مواد مصنوعی برای تأکید بر ژئوتکنیک پایدار تأیید کرده اند [۷، ۸]. از جمله مهم ترین الیاف طبیعی که تاکنون استفاده شده اند می توان به الیاف نارگیل، سبزال، نخل، جوت، کتان، کاه، بامبو و زنجبیر اشاره کرد. تأثیر این الیاف بر تثبیت خاک به ویژگی هایی مانند نسبت ابعادی، اصطکاک سطحی، درصد وزنی و مدول الاستیسیته الیاف بستگی دارد [۹]. تولید سالانه انبوه الیاف ساقه برنج و ضایعات آن در اراضی کشاورزی که توسط کشاورزان سوزانده می شود، می تواند باعث آلودگی زیست محیطی شود و در صورت تداوم در سال های آینده، ماده آلی خاک را کاهش دهد. از این رو، کاه برنج به عنوان یک فیبر طبیعی سازگار با

خاک ماده ای است که رفتار متنوعی دارد و در سطح زمین قرار دارد و ممکن است شامل مواد آلی و هوازده، همچنین آب و یا هوا باشد. با این حال، تحت شرایط مختلف تنش، رفتار ناهمگونی از خود نشان می دهد، به ویژه در شرایط بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد. علاوه بر این، حد پلاستیک، رفتار غیرخطی همراه با سختی وابسته به تنش دارد. درک این پیچیدگی ها و شناخت رفتار خاک برای تحلیل های ژئوتکنیکی و طراحی سازه های ژئوتکنیکی اهمیت دارد [۱۰]. خاک های رسی به دلیل زاویه اصطکاک پایین و مقاومت برشی محدود، اغلب مشکلاتی مانند نشست بیش از حد، ظرفیت باربری کم و چالش های مرتبط دیگر را ایجاد می کنند. روش های مختلفی برای بهبود خاک های رسی وجود دارد که شامل تراکم خاک با استفاده از غلتک ها یا سایر تکنیک ها می شود. روش های مکانیکی و مواد شیمیایی متعددی برای بهبود رفتار خاک در دسترس است، اما انتخاب روش مناسب

* نویسنده عهده دار مکاتبات: keramati@sharoodut.ac.ir



مسئله مطرح شده در اینجا زیست تخریب پذیری و پوسیدگی الیاف به دلیل عوامل محیطی است که ممکن است بر خاک تأثیر بگذارد. بنابراین، بررسی اثرات پوسیدگی و هوازدگی و شیب سازی تغییرات اقلیمی در دماهای مختلف برای ارزیابی تأثیر آن‌ها بر خاک ضروری است. الیاف ساقه برنج در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد پوسیده می‌شوند. استفاده از روش های عددی و محاسباتی نظیر روش های مبتنی بر پایتون، متلب و... به منظور پیش بینی داده‌ها می‌تواند یک گام موثر در کاهش هزینه‌ها و صرفه جویی در نظر گرفته شود که پیشتر در کاربردهای مهندسی عمران اعمال شده است [۲۲-۲۰]. در همین راستا روش سطح پاسخ به منظور ایجاد نمودارهای تشخیصی و پیش بینی داده‌ها استفاده گردید [۲۳، ۲۴].

آزمایش‌های مربوط به بررسی اثرات هوازدگی شامل سیکل ذوب - یخ و فرآیند خشک کردن است. با توجه به آب‌وهوای نسبتاً خشک محل نمونه برداری، در این مطالعه تصمیم گرفته شد از روش سیکل ذوب - یخ برای بررسی تأثیر هوازدگی بر خاک تثبیت شده با الیاف ساقه برنج استفاده شود. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D560/D560M-16 انجام شد. پس از بررسی ادبیات فنی توسط نویسندگان، از سیمان و الیاف طبیعی در برنامه آزمایشی استفاده شد و شرایط پوسیدگی و هوازدگی برای بررسی خواص مکانیکی خاک و ارزیابی تأثیر این عوامل اعمال شد. در نهایت

۲- مواد و روش

در این پژوهش خاک چسبنده رسی با الیاف ساقه برنج و سیمان ترکیب شده است که به ویژگی‌های آن‌ها در مباحث پیش رو اشاره شده است.

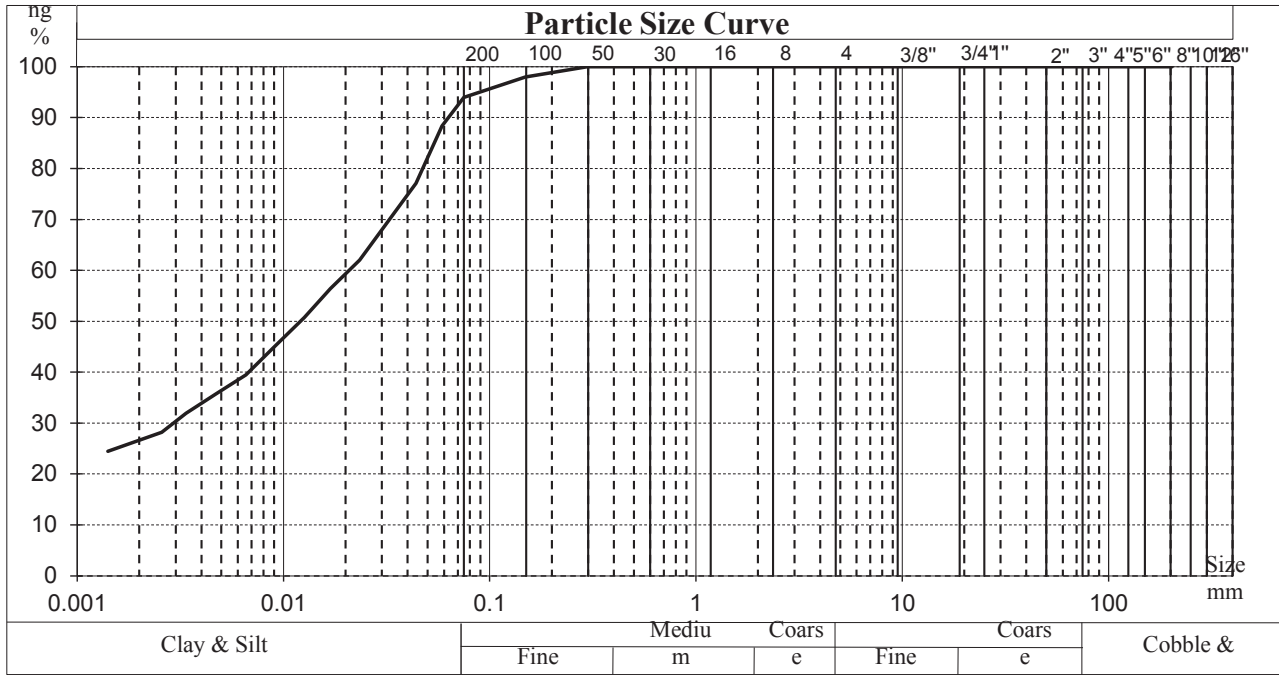
۲-۱- خاک چسبنده رسی

ابتدا مقداری از خاک جهت تعیین درصد ریزدانه از الک نمره ۴، ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۲۰۰ عبور داده شد. در ادامه ۱۰۰٪ خاک مورد آزمایش از الک نمره ۲۰۰ عبور کرده که در بدست آوردن نمودار دانه بندی، طبق استاندارد ASTM D422-63 آزمایش هیدرومتري استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش هیدرومتري و طبق سیستم طبقه بندی متحد، خاک در رده CL قرار دارد. در شکل ۱ منحنی دانه بندی و همچنین در جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک را مشاهده می‌کنید.

محیط زیست در این تحلیل استفاده شد [۱۰]. محل‌های دفن زباله پتانسیل آلودگی‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای مانند آلودگی آب‌های زیرزمینی و یا سفره‌های آب زیرزمینی و آلودگی خاک توسط شیرابه دارند. آلودگی‌های ناشی از شیرابه به اکوسیستم‌ها و گونه‌های مختلف آسیب جدی وارد می‌کند [۱۱].

استفاده سازنده از ضایعات کشاورزی و صنعتی بسیار امیدوارکننده است و در حال حاضر تحقیقات زیادی بر روی ضایعات کشاورزی و تأثیر آن‌ها بر مواد مطلوب برای افزایش دوام آن‌ها انجام می‌شود [۱۲]. اخیراً تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهانی برای بهبود مواد مختلف با استفاده از ضایعات کشاورزی انجام شده است. بیشتر کشورهای توسعه‌یافته ۳۵ درصد از انرژی خود را با استفاده از ضایعات کشاورزی تولید می‌کنند [۱۳]. استفاده از ضایعات کشاورزی در سال‌های اخیر برای کاهش ضایعات و انتشار کربن به یک موضوع داغ تبدیل شده است. بخش ضایعات به‌عنوان یکی از منابع اصلی گرمایش جهانی از نظر گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است [۱۴]. طبق توافق سبز اروپایی در سال (۲۰۱۸)، کاهش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای ضروری است، زیرا این کاهش تأثیر مثبتی بر رفاه اقتصادی جهان خواهد داشت [۱۵]. از سوی دیگر، کارشناسان استفاده از مواد زیست‌پایه را توصیه می‌کنند و با استفاده از ضایعات یا مواد خام، کیفیت را بهبود می‌بخشند. این امر همچنین به جلوگیری از کمبود مواد ساختمانی در سال‌های آینده کمک می‌کند. مطالعات مرتبط با استفاده از ضایعات یا مواد خام نشان داده‌اند که افزودن ضایعات کشاورزی و محصولات جانبی مختلف دوام مواد ساختمانی از جمله خاک و بتن را افزایش می‌دهد [۱۶، ۱۷].

افزودن الیاف طبیعی برای افزایش دوام خاک بسیار رایج است. این الیاف به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) الیاف حیوانی، (۲) الیاف گیاهی و (۳) الیاف معدنی. الیاف گیاهی در کاهش انتشار ترک، نشست، تغییر شکل شعاعی، انقباض و تورم در مقایسه با الیاف حیوانی و معدنی مؤثرتر هستند. سلولز به‌عنوان عنصر حیاتی الیاف گیاهی در نظر گرفته می‌شود و ترکیب شیمیایی این الیاف به سلولز، همی‌سلولز و لیگنین وابسته است. سلولز به صورت ماریچی تنظیم شده و دیواره سلولی را تقویت می‌کند [۱۸، ۱۹]. بر این اساس، الیاف طبیعی در ساخت جاده‌های کم‌حجم، کاهش فرسایش، پایداری شیب‌ها، بلوک‌های ساختمانی کم‌هزینه و غیره عملکرد خوبی داشته‌اند. استفاده از الیاف گندم در کامپوزیت‌های گلی برای دهه‌ها یک روش معمول بوده است. زنجیره مولکول‌های سلولز، الیاف طبیعی را از نظر استحکام مکانیکی (خمشی، کششی) و سختی برجسته می‌کند. با این حال،



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک.

Fig. 1. Soil grain size distribution curve.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک

Table 1. Physical properties of the studied soil

مقدار مشخصه	شماره استاندارد	پارامترهای فیزیکی خاک
CL	ASTMD422-63	دانه بندی
۲/۶۷	ASTMD854-02	G_s
۱۸/۲	ASTMD698-07	ω_{opt} (%)
۲۱/۰۶	ASTMD2216-10	ω (%)
۳۶/۰۶	ASTMD4318-00	LL (%)
۱۰/۷۴	ASTMD4318-00	PI (%)
۱/۷۹	ASTMD698-07	γ_{dmax} (gr/cm^3)



شکل ۲. آماده سازی الیاف جهت نمونه سازی.

Fig. 2. Preparation of fibers for sample fabrication.

است که نمونه‌ها را در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون مخصوص قرار داده تا به پوسیدگی برسند. نمونه خشک هم در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در آون آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و نمونه مرطوب با همان درصد رطوبت بهینه خود و بدون تغییر ساخته شد. تمامی نمونه‌ها بعد از گذشت دوره عمل‌آوری خود که شامل دوره‌های صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بودند مورد آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار داده شدند. نمونه‌های آزمایش سیکل ذوب - یخ هم در قالب‌های آزمایش تراکم برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه ساخته شدند و بعد از گذراندن دوره‌ی عمل‌آوری صفر، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۱- آزمایش تراکم استاندارد

برای دستیابی به وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه نمونه خاک دست‌نخورده طبق استاندارد ASTM D698، اقدام گردید. مخلوط خاک و الیاف و سیمان با هم ترکیب شده و در ۳ لایه با ۲۵ ضربه چکش $2/5 \text{ kg}$ که از ارتفاع $30/48 \text{ cm}$ سقوط می‌کند، متراکم شده‌اند. در هر مرحله ۳٪ آب به مخلوط اضافه و مراحل تکرار شده است. این روند تا جایی ادامه داشته که وزن کل مخلوط کاهش یافته است. همچنین در هر مرحله از خاک یک نمونه جهت تعیین درصد رطوبت تهیه شده است. از رسم نمودار $\omega - \gamma_d$ ، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه بدست

۲-۲- الیاف ساقه برنج

الیاف ساقه برنج از زمین‌های کشاورزی روستای المشیر واقع در استان مازندران تهیه گردید. وزن مخصوص این الیاف حدود $0/23 \text{ gr/cm}^3$ و با قطر میانگین $0/2$ سانتی‌متر تهیه شده‌اند. با توجه به محدودیت‌های ابعادی قالب نمونه‌سازی تک‌محوری (قطر داخلی $49/9$ میلی‌متر و ارتفاع $99/02$ میلی‌متر) الیاف‌ها به صورت خشک به طول‌های ۱ سانتی‌متر بریده شده‌اند. در شکل ۲ آماده سازی الیاف جهت نمونه سازی ارائه شده است.

۲-۳- سیمان

برای تثبیت خاک رمبنده از سیمان پرتلند تیپ ۲ فقط برای ساخت نمونه‌های ۲۸ روزه جهت بررسی اثر پوسیدگی الیاف در خاک استفاده شده‌است که وزن مخصوص آن حدود $3-3/25 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد.

۳- روش انجام آزمایش

ابتدا برای مشخص شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه خاک، آزمایش تراکم استاندارد انجام شد و پس از مشخص شدن پارامترهای مربوطه از قبیل وزن مخصوص خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه و درصد الیاف و سیمان، فرآیند ساخت نمونه‌ها آغاز شد. نمونه‌ها شامل نمونه‌های مرطوب، خشک و پوسیده هستند. فرآیند پوسیدگی به این صورت



شکل ۳. دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده.

Fig. 3. Unconfined compressive strength (UCS) machine.

داده های خروجی در سیستم، در فضای نرم افزار Vira Data Soft مربوط به دیتالاگر پردازش می شوند. در این نرم افزار برای هریک از سنسورها، کانال مجزا تعریف شده که ابتدا در ابزار و بعد در پیکر بندی شناسایی و در منوی تنظیم کانال کالیبراسیون سنسور بر روی آن تنظیم می شود. در شکل ۳ دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده و متعلقات آن ارائه شده است.

۳-۴- فرآیند نمونه سازی

۳-۴-۱- نمونه های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

ساخت نمونه ها بعد از تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه از طریق آزمایش تراکم استاندارد انجام شد. ابتدا مقداری خاک بر حسب وزن مخصوص خشک حداکثر با درصدهای مختلف الیاف (۰٪، ۲۵٪، ۵٪، ۱٪) و همچنین با درصدهای مختلف سیمان (۴٪، ۸٪ و ۱۲٪) و تحت عمل آوری ۲۸ روزه بر حسب وزن مخصوص حداکثر خشک و رطوبت بهینه در قالب نمونه سازی با ارتفاع ۹۹/۰۲ میلی متر و قطر داخلی ۴۹/۹ میلی متر ساخته شد. بعد از آنکه نمونه ها درون قالب متراکم شد، سطح بالا و پایین نمونه صاف و یکدست شد و از قالب نمونه ساز خارج شد. نمونه ها برای عمل آوری (صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) درون پلاستیک در دمای محیط قرار داده شد تا رطوبت نمونه ها تا اتمام زمان عمل آوری حفظ شود. نمونه های در نظر گرفته شده در این آزمایش دارای عمل آوری صفر، ۷،

آمده است.

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

این آزمایش نوع خاصی از آزمایش UU می باشد که بطور معمول برای نمونه های رسی و چسبنده مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش فشار محدود کننده σ_3 برابر صفر است و بار محوری تا زمان گسیختگی به نمونه اعمال می شود. آزمایش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D ۲۱۶۶ صورت گرفت.

۳-۳- دستگاه و روش انجام آزمایش

در ابتدا دستگاه تک محوری کالیبره شده و نمونه در جای خود قرار داده شد. نمونه بصورتی قرار داده شد که در مرکز صفحه پایینی باشد. سپس سنسور تغییر مکان و لودسل را صفر کرده و بار با سرعت mm/min ۵ به نمونه اعمال شد. این فرآیند تا جایی ادامه می یابد که بار به نقطه اوج خود رسیده و سپس کاهش پیدا کند. تغییر طول (ΔL) به کمک سنسور LVDT با کورس ۵۰ میلی متر و دقت ۰/۰۱ میلی متر محاسبه شده است. همچنین برای اندازه گیری میزان تنش، از یک لودسل با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلوگرم استفاده شد و اطلاعات آن از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر انتقال داده شد.

این تحقیق برای بررسی اثر هوازدگی بر روی خاک تثبیت شده با الیاف ساقه برنج، تصمیم گرفته شد از روش سیکل ذوب-یخ استفاده شود. این آزمایش طبق استاندارد 16 – ASTMD560/D560M انجام شده است.

در ابتدا، ترکیب خاک و الیاف با درصدهای ۰، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۱٪ طبق وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در قالب تراکم قرار داده شده و بعد از آماده سازی نمونه، از قالب خارج می‌شوند. در این تحقیق برای بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر روی نمونه‌ها صرفاً نمونه‌های صفر، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار داده شدند که در مجموع ۱۲ نمونه برای این آزمایش ساخته شد و همچنین برای حفظ رطوبت نمونه‌ها، درون پلاستیک قرار داده شدند. در ابتدا وزن، قطر و ارتفاع نمونه اندازه‌گیری شده و سپس نمونه‌ها را بعد از فرآیند عمل آوری در فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌دهیم. سپس وزن، ارتفاع و قطر نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری می‌شود. در گام بعد نمونه‌ها را در دمای محیط که حدوداً ۲۴ درجه سانتی‌گراد است قرار داده و بعد از ۲۴ ساعت دوباره وزن، ارتفاع و قطر نمونه را اندازه‌گیری می‌کنیم. بعد از آن با برس، اطراف نمونه را ۱۸-۲۰ مرتبه و بالا و پایین نمونه را ۲-۴ مرتبه برس می‌کشیم (سیکل اول). تمامی این مراحل باید طی ۱۲ سیکل تکرار شود و تغییرات ثبت شود. در شکل ۴ فرآیند آماده سازی نمونه‌های سیکل ذوب-یخ را مشاهده می‌کنید.

۱۴ و ۲۸ روزه بودند. از نمونه‌های صفر تا ۱۴ روزه از هر کدام دو عدد ساخته شد که یکی از آن‌ها بعد از عمل آوری ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد که این نمونه‌ها را خشک می‌نامند. نمونه دیگر را در حالت مرطوب خود آزمایش نموده تا اثر آن بر مقاومت فشاری خاک بررسی شود. از نمونه‌های ۲۸ روزه سه سری ساخته شد که دو سری از آن‌ها نمونه‌های خشک و مرطوب و نمونه سوم نمونه پوسیده نامیده می‌شود. نمونه را به مدت ۳۰-۲۰ دقیقه در آون مخصوص تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا اثر پوسیدگی الیاف بر مقاومت فشاری خاک بررسی شود. الیاف ساقه برنج در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد دچار پوسیدگی می‌شوند. برای نزدیک بودن این شبیه‌سازی به واقعیت، به نمونه‌های ۲۸ روزه پوسیدگی اعمال شده تا اثر پوسیدگی بر مقاومت فشاری خاک بررسی شود.

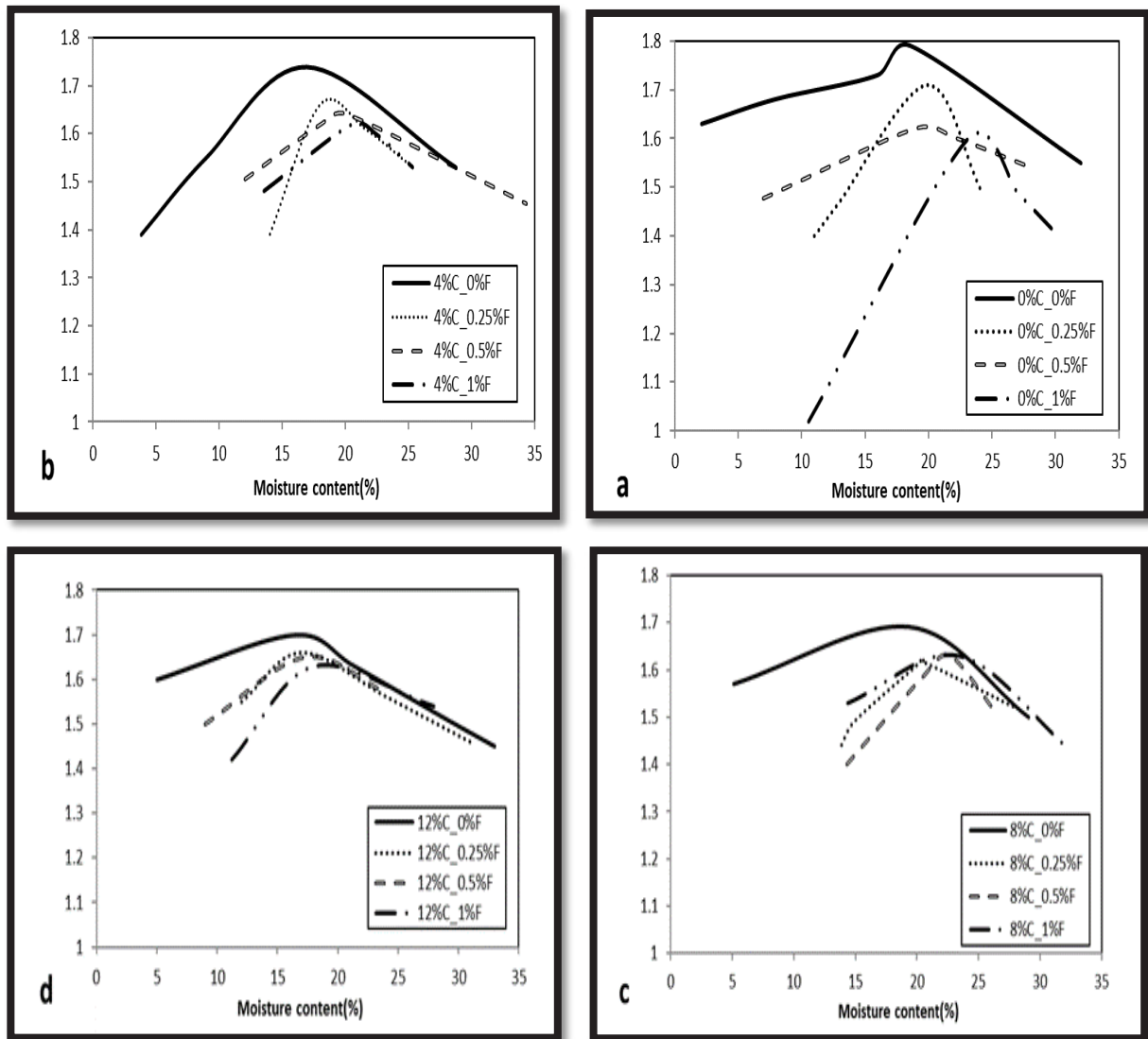
۳-۴-۲- نمونه‌های آزمایش سیکل ذوب-یخ

از آنجاییکه الیاف مورد استفاده در این پژوهش در دسته الیاف طبیعی می‌باشد طبیعی است که تغییرات آب و هوایی ممکن است بر روی خاکی که بوسیله این الیاف تسلیح شده اند تاثیر گذارد. آزمایش‌های مورد نظر برای بررسی اثر هوازدگی، آزمایش‌های سیکل ذوب-یخ و تر-خشک است. در



شکل ۴. فرآیند آماده سازی نمونه‌های سیکل ذوب-یخ

Fig. 4. Process of preparing freeze-thaw cycle samples



شکل ۵. نتایج آزمایش تراکم استاندارد با درصد‌های مختلف الیاف: (a) ۰٪ سیمان، (b) ۴٪ سیمان، (c) ۸٪ سیمان، (d) ۱۲٪ سیمان

Fig. 5. The results of the standard compaction tests with varying percentages of fibers: (a) 0% cement, (b) 4% cement, (c) 8% cement, (d) 12% cement

۳-۵ مدل‌سازی عددی (روش سطح پاسخ)

روش سطح پاسخ یک روش بهینه‌سازی است که برای تعیین متغیرها به منظور دستیابی به یک مقدار حداقلی یا حداکثری برای پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش از رویکردهای عاملی مانند آنوا برای مدل‌سازی پاسخ بهره می‌برد، اما برای نمایش دقیق‌تر تأثیرات، آن‌ها را گسترش می‌دهد. روش سطح پاسخ، کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی دارد. این روش با تلفیق ریاضیات و آمار، تأثیر شاخص‌های آزمایشی مختلف و تعامل بین متغیرها را نشان می‌دهد. اخیراً، کارایی این رویکرد در ارزیابی خواص مهندسی خاک‌ها و سایر کاربردها در مهندسی عمران به اثبات رسیده است. [۲۳-۲۴].

۴- بحث و تفسیر نتایج

۴-۱- آزمایش تراکم استاندارد

نمودار نتایج آزمایشات تراکم استاندارد با درصد‌های مختلف الیاف و سیمان در شکل ۵ آمده است. در ادامه و در جدول ۲ نیز نتایج آزمایش تراکم استاندارد ارائه شده است.

با توجه به نتایج آزمایش تراکم استاندارد می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش درصد الیاف در صورتی که مقدار سیمان ثابت باشد، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و درصد رطوبت بهینه در نمودار تراکم افزایش پیدا می‌کند. علت کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر این است

جدول ۲. نتایج آزمایش تراکم استاندارد.

Table 2. Results of standard compaction test.

γ_d ($\frac{gr}{cm^3}$)	ω (%)	درصد وزنی الیاف	درصد وزنی سیمان	علامت اختصاری	ردیف
۱/۷۴	۱۸/۵۳	۰	۰	0%C_0%F	۱
۱/۷۱	۱۹/۹۱	۰/۲۵	۰	0%C_0.25%F	۲
۱/۶۲	۱۹/۰۲	۰/۵	۰	0%C_0.5%F	۳
۱/۶	۲۳/۱۲	۱	۰	0%C_1%F	۴
۱/۷۴	۱۶/۹۵	۰	۴	4%C_0%F	۵
۱/۶۶۱	۱۸/۰۳	۰/۲۵	۴	4%C_0.25%F	۶
۱/۶۴	۲۰/۱	۰/۵	۴	4%C_0.5%F	۷
۱/۶۲	۲۰/۴۸	۱	۴	4%C_1%F	۸
۱/۶۹	۱۹/۳۶	۰	۸	8%C_0%F	۹
۱/۶۲	۲۰/۳۲	۰/۲۵	۸	8%C_0.25%F	۱۰
۱/۶۳	۲۲/۶۵	۰/۵	۸	8%C_0.5%F	۱۱
۱/۶۳	۲۳/۴۴	۱	۸	8%C_1%F	۱۲
۱/۷	۱۶/۴۲	۰	۱۲	12%C_0%F	۱۳
۱/۶۶	۱۶/۹۸	۰/۲۵	۱۲	12%C_0.25%F	۱۴
۱/۶۵	۱۷/۲۶	۰/۵	۱۲	12%C_0.5%F	۱۵
۱/۶۳	۱۸/۰۲	۱	۱۲	12%C_1%F	۱۶

، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۱٪) است. لازم به ذکر است که از سیمان فقط برای نمونه‌های ۲۸ روزه جهت بررسی تاثیر آن در شرایط پوسیدگی استفاده شده و این نمونه‌ها دارای زمان عمل آوری (صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) هستند. همه‌ی این نمونه‌ها برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه ساخته شده‌اند. در ادامه نتایج و تاثیر الیاف بر خاک و همچنین تاثیر پوسیدگی بر نمونه‌های تسلیح شده با الیاف و نمونه‌های ۲۸ روزه‌ای که بوسیله سیمان تثبیت شده‌اند بررسی شده است.

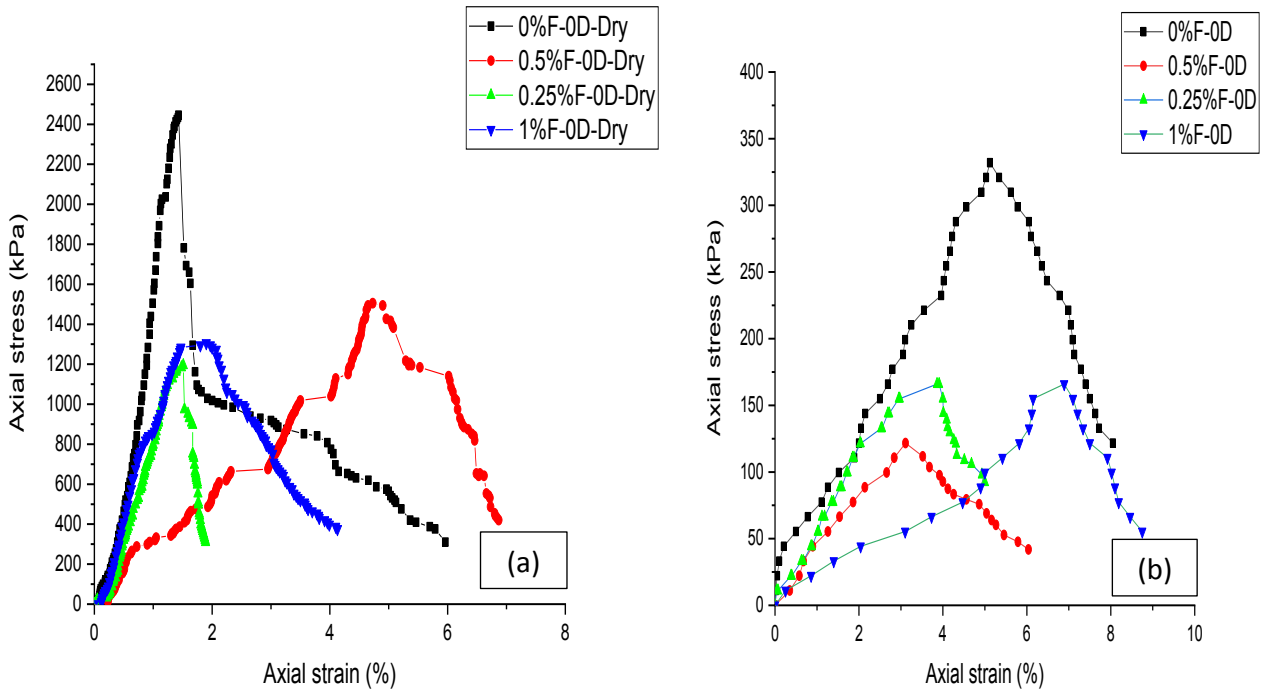
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنید، نمونه‌های خشک شده نسبت به نمونه‌های مرطوب و مرجع مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان می‌دهند و همچنین دارای نقطه اوج گسیختگی هستند. نبود رطوبت و افزایش سختی در این نمونه‌ها می‌تواند علت این تفاوت را توجیه کند. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه مرجع نسبت به نمونه‌های مرطوب مقاومت بیشتری از خود نشان داده و هرچقدر میزان درصد الیاف (از ۰٪ تا ۱٪) بیشتر شود میزان مقاومت نمونه‌ها کمتر می‌شود. لازم به ذکر است که میزان کرنش گسیختگی با افزایش درصد الیاف در حال افزایش می‌باشد. این موضوع

که وزن مخصوص الیاف پایین است و افزایش درصد الیاف باعث کاهش وزن مخصوص خشک می‌شود. علت افزایش درصد رطوبت بهینه نیز رطوبت خود الیاف است. الیاف قبل از اینکه با خاک ترکیب شود، مقداری خیس شده تا رطوبت خاک را جذب نکند و این می‌تواند باعث افزایش درصد رطوبت بهینه خاک شود. از سوی دیگر با افزایش درصد سیمان میزان تغییرات کاهش یافته‌است، بطوریکه در درصد سیمان‌های بالاتر میزان کاهش وزن مخصوص و افزایش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد الیاف کمتر شده‌است. دلیل این موضوع را می‌توان حضور ذرات ریز سیمان با وزن مخصوص بالا و البته فرآیند هیدراتاسیون سیمان عنوان نمود که منجر به آبکشی از نمونه‌ها شده است.

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

۴-۲-۱- اثر الیاف ساقه برنج

تعداد آزمایشات مقاومت فشاری محصور نشده ۶۰ عدد می‌باشد که شامل درصدهای مختلف الیاف (۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۱٪) و سیمان (۰٪



شکل ۶. نمونه‌های (a) خشک و (b) مرطوب و مرجع صفر روزه با درصد‌های مختلف الیاف

Fig. 6. Zero-day samples (a) dry, (b) wet and reference with varying fiber percentages

و خشک نسبت به نمونه مرجع در روزهای عمل آوری مختلف ارائه شده است.

کرنش گسیختگی نمونه خشک ۲۸ روزه کاهش بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها در روزهای عمل آوری کمتر از خود نشان داده است. با گذشت زمان در نمونه‌های خشک درگیری بین خاک و الیاف بسیار کم شده و با خشک شدن نمونه، الیاف رطوبت خود را از دست داده و خاصیت انعطاف پذیری الیاف در این لحظه به کمترین مقدار خود رسیده و سختی نمونه‌ها بیشتر می‌شود.

نمونه ۲۸ روزه خشک بیشترین افزایش در مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع را دارد. همانطور که گفتیم درگیری بین الیاف و خاک در نمونه‌های خشک با گذشت زمان در حال کاهش هست و الیاف در این نمونه کمترین نقش را دارد. پیشتر اشاره شد که با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری نمونه‌ها در حال کاهش است. بنابراین باتوجه به اینکه الیاف در نمونه خشک ۲۸ روزه نقش کمتری پیدا می‌کند، نمونه افزایش مقاومت پیدا می‌کند. این موضوع در نمونه‌های مرطوب و در مورد مقاومت فشاری نیز صدق می‌کند اما در کرنش گسیختگی تغییرات نامنظم است و این نتایج در آن‌ها صادق نیست.

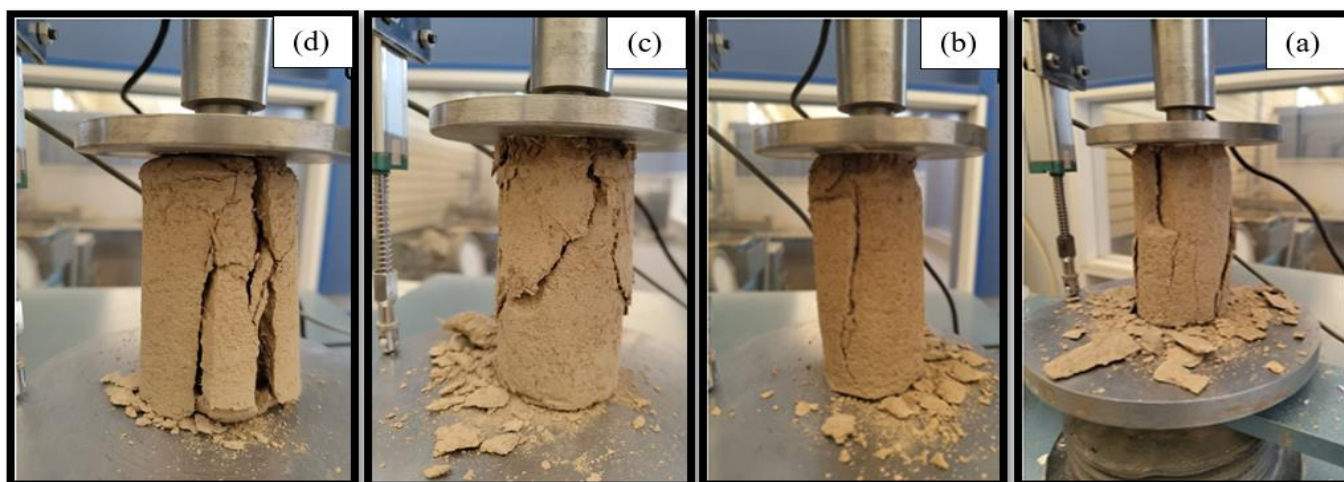
نشان دهنده افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف و باتوجه به ماهیت الیاف است زیرا خاک تحمل کشش را ندارد اما الیاف این توانایی را تا حدودی به خاک می‌دهد. این همان چیزی است که در نمونه‌های خشک شده هم دیده می‌شود. نمونه‌های خشکی که میزان الیاف آن‌ها کمتر است، کرنش گسیختگی کمتری را نسبت به نمونه‌های خشکی که دارای درصد الیاف بیشتری هستند نشان می‌دهند. اگر میزان کرنش گسیختگی نمونه‌های خشک شده و مرطوب و مرجع را باهم مقایسه کنید متوجه می‌شوید که کرنش گسیختگی نمونه‌های خشک شده بطور کلی کمتر از نمونه‌های مرطوب و مرجع است.

مقاومت فشاری نمونه مرجع $331/970$ کیلو پاسکال و کرنش گسیختگی آن $5/12\%$ می‌باشد. در نمونه‌های صفر روزه طبق شکل ۱۱ با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری نمونه حاوی 1% الیاف، 50% نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته و کرنش گسیختگی آن $37/57\%$ نسبت به نمونه مرجع افزایش پیدا کرده است. همچنین مقاومت فشاری نمونه خشک شده حاوی 1% الیاف $293/33\%$ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته و کرنش گسیختگی آن $69/89\%$ نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته است. در جدول ۳ تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی 1% الیاف مرطوب

جدول ۳. تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف مرطوب و خشک نسبت به نمونه مرجع در روزهای عمل آوری مختلف.

Table 3. Changes in the compressive strength and strain at failure of the samples containing 1% fibers, both wet and dry, compared to the reference sample over different curing days are as follows

عمل آوری	نمونه حاوی ۱٪ الیاف	تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع	تغییرات کرنش گسیختگی نسبت به نمونه مرجع
صفر روزه	مرطوب	۵۰٪ کاهش	۳۴٪/۵۷ افزایش
	خشک	۲۹۳٪/۳۳ افزایش	۶۹٪/۸۹ کاهش
۷ روزه	مرطوب	۴۳٪/۳۳ کاهش	۹۹٪/۴۱ کاهش
	خشک	۳۲۹٪/۹۹ افزایش	۶۴٪/۰۶ کاهش
۱۴ روزه	مرطوب	٪۰	۳۶٪/۱۳ افزایش
	خشک	۳۳۶٪/۶۶ افزایش	۵۲٪/۵۳ کاهش
۲۸ روزه	مرطوب	۴۳٪/۳۵ افزایش	۶۵٪/۴۲ کاهش
	خشک	۳۵۹٪/۹۹ افزایش	۸۶٪/۵۲ کاهش

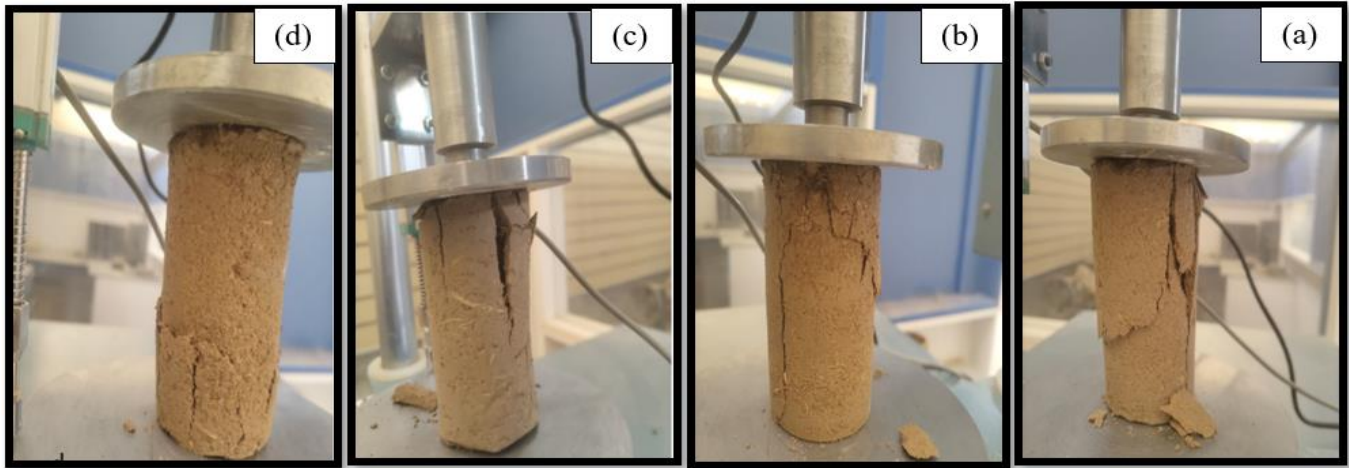


شکل ۷. گسیختگی نمونه‌های خشک عمل‌آوری نشده: (a) نمونه ۰٪ الیاف (b) نمونه ۰.۲۵٪ الیاف (c) نمونه ۰.۵٪ الیاف (d) نمونه ۱٪ الیاف.

Fig. 7. Failure modes of untreated dry samples: (a) 0% fiber sample, (b) 0.25% fiber sample, (c) 0.5% fiber sample, (d) 1% fiber sample.

اغلب گسیختگی نمونه‌ها به این شکل است که در حین بارگذاری، بیشترین تغییر شکل و افزایش قطر در وسط نمونه رخ می‌دهد. بنابراین در مرکز به دلیل تمایل نمونه به کرنش عرضی بیشتر، تنش کششی وارد شده به الیاف موجود در لایه‌های مرکزی نمونه افزایش یافته‌است. یکی از دلایل تاثیرگذار در مقاومت فشاری، وجود درصد الیاف مختلف در لایه‌های مختلف نمونه است.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف پدیده شکم دادگی رخ نداده و این تغییر شکل موضعی با افزایش درصد الیاف در ارتفاع نمونه مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸، گسیختگی نمونه‌های خشک هم تا حدودی به همین صورت است. تنها با این تفاوت که گسیختگی نمونه بسیار ترد بوده و نمونه در مدت کوتاه‌تری به گسیختگی رسیده و دچار شکست می‌شود. این تغییر شکل موضعی در ارتفاع نمونه‌های مرطوب نسبت به نمونه‌های خشک بیشتر مشهود است.



شکل ۸. گسیختگی نمونه‌های مرطوب عمل‌آوری نشده: (a) نمونه مرجع (b) نمونه ۰/۲۵٪ الیاف (c) نمونه ۰/۵٪ الیاف (d) نمونه ۱٪ الیاف

Fig. 8. Failure modes of untreated dry samples: (a) 0% fiber sample, (b) 0.25% fiber sample, (c) 0.5% fiber sample, (d) 1% fiber sample.

همچنین کرنش گسیختگی کمتری نسبت به نمونه‌های مرطوب دارد و زودتر دچار گسیختگی می‌شود که می‌توان دلیل آنرا پوسیدگی و از بین رفتن الیاف دانست که در نتیجه باعث می‌شود الیاف نقش خود را به درستی ایفا نکند. شکست ترد در نمونه‌های پوسیده دیده می‌شود و عملکردی مانند نمونه‌های خشک در نحوه گسیختگی از خود نشان داده که دلیل آن پوسیدگی الیاف است. انعطاف نمونه با پوسیدگی الیاف از دست رفته و خاک هیچ کششی دیگر تحمل نمی‌کند و همچنین رفتار ترد تری در زمان گسیختگی از خود نشان می‌دهد و دلیل دیگر آن هم افزایش سختی نمونه‌ها است.

نمونه حاوی ۰٪ الیاف پوسیده مقاومت کمتری نسبت به نمونه حاوی ۰٪ الیاف خشک نشان می‌دهد. این نمونه همچنین کرنش گسیختگی کمتری نسبت به نمونه خشک نشان داده که می‌توان گفت این نتیجه بدلیل دمای بالایی است که نمونه‌های پوسیده در آن قرار گرفتند که ممکن است باعث تغییر بافت خاک شود. میزان کاهش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۰٪ الیاف پوسیدگی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰٪ الیاف خشک به ترتیب ۱۲/۸۴٪ و ۳۸/۷۸٪ بوده است.

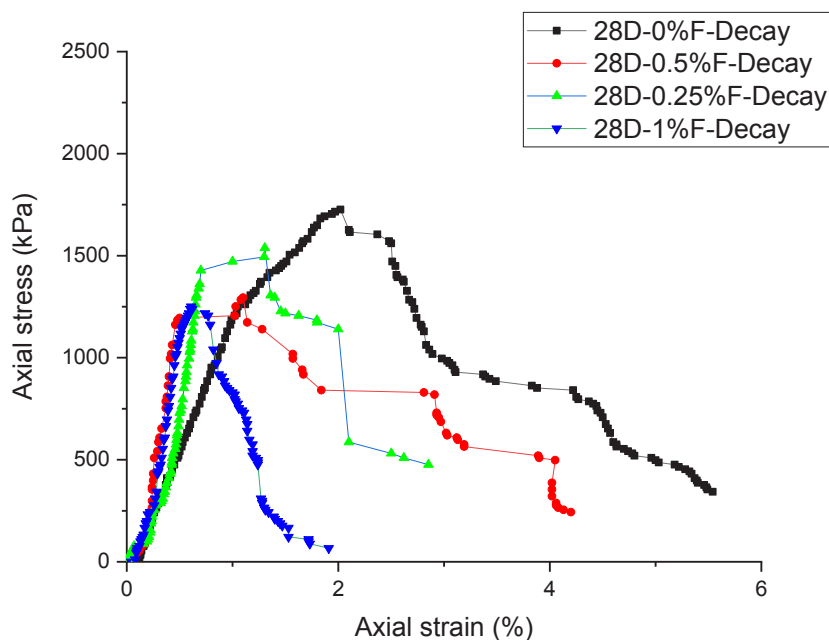
بطور کلی با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری نمونه‌های خشک نسبت به نمونه‌های پوسیده در حال افزایش است که دلیل آنرا می‌توان پوسیدگی الیاف موجود در خاک دانست. پوسیدگی الیاف فضای خالی در خاک ایجاد می‌کند که باعث تخلخل خاک می‌شود و همین باعث می‌شود شاهد کاهش بیشتری در مقاومت فشاری نمونه‌های پوسیدگی نسبت به نمونه‌های

۴-۲-۲ اثر پوسیدگی

همانطور که گفته شد نمونه‌های پوسیده شامل نمونه‌هایی هستند که در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد درون آن مخصوص قرار داده شدند. تعداد ۱۶ نمونه برای بررسی اثر پوسیدگی بر خاک ریزدانه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. این نمونه‌ها شامل نمونه‌های خشک، مرطوب و پوسیده بوده و همچنین شامل نمونه‌های تثبیت شده با سیمان هم می‌باشد تا اثر پوسیدگی بر نمونه‌های تثبیت شده با سیمان هم بررسی شود. برای نزدیک بودن نمونه‌ها به واقعیت، تنها نمونه‌های ۲۸ روزه تحت پوسیدگی قرار داده شد زیرا در طبیعت پوسیدگی یک عمل زمانبر و وابسته به زمان است.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید، در نمونه‌های ۲۸ روزه پوسیده شده، با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها به ترتیب ۲۸/۳۹٪ و ۶۹/۸۰٪ کاهش یافته است. با پوسیدگی الیاف، فضای خالی در خاک و تخلخل آن بیشتر می‌شود و دیگر چیزی نیست که این فضا را جبران کند. از طرفی، دیگر الیافی وجود ندارد که بخواهد انعطاف نمونه و تحمل خاک در برابر کشش را بیشتر کند. در نتیجه هم باعث کاهش مقاومت فشاری و هم کرنش گسیختگی می‌شود. در شکل ۱۰ نمونه‌های پوسیدگی ارائه شده است.

نمونه‌های پوسیده دارای نقطه اوج گسیختگی بوده و مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های مرطوب نشان داده که می‌توان دلیل آنرا مانند نمونه‌های خشک، از دست دادن رطوبت و افزایش سختی دانست. نمونه‌های پوسیده



شکل ۹. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های پوسیده شده ۲۸ روزه با درصد الیاف مختلف

Fig. 9. The stress-strain curve for the decayed 28-day samples with different fiber percentages is shown in the Fig. below



شکل ۱۰. نمونه پوسیده شده بعد از آزمایش

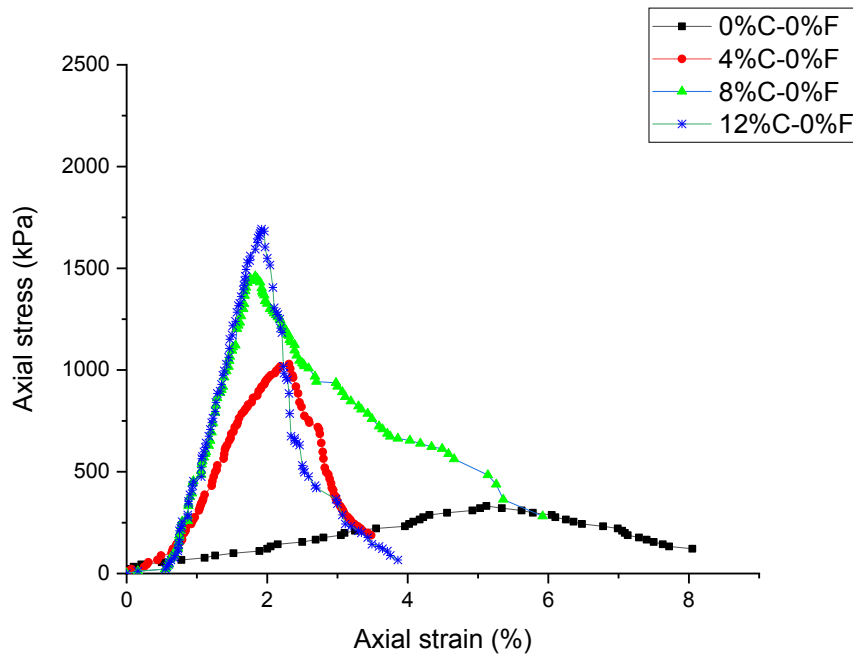
Fig. 10. Decayed sample after test

شده است. نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف (۰٪، ۰.۲۵٪، ۰.۵٪ و ۱٪) و سیمان (۰٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪) ساخته شدند و باهم ترکیب شدند که تعداد ۱۲ نمونه مرطوب و تعداد ۱۲ نمونه پوسیده (در مجموع ۲۴ نمونه) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید، با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰٪ الیاف در حال افزایش هستند،

خشک باشیم. البته این کاهش هم در کرنش گسیختگی نمونه‌های پوسیده بیشتر از نمونه‌های خشک است اما این تفاوت بسیار ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۱-۲-۳-۴ اثر پوسیدگی بر نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در این بخش به بررسی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرداخته



شکل ۱۱. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سیمان و بدون الیاف و نمونه مرجع.

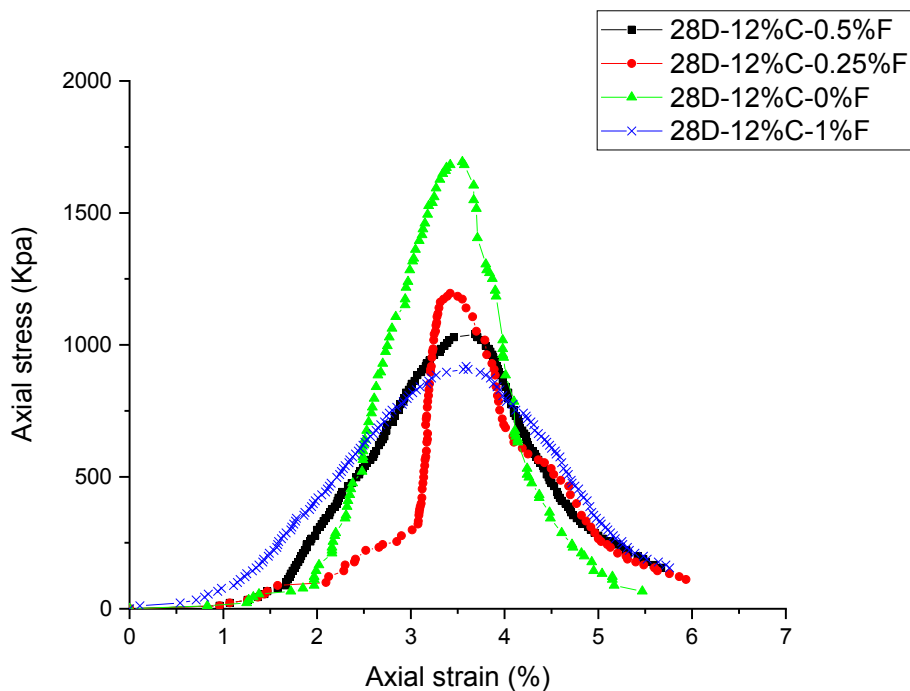
Fig. 11. Stress-strain curves for samples containing various percentages of cement without fibers and the reference sample.

الیاف کمتر داشت. در واقع سیمان فقدان الیاف در خاک را جبران می‌کند و این فضای خالی که با از بین رفتن الیاف بوسیله پوسیدگی ایجاد شده را پر می‌کند. کرنش گسیختگی هم مانند نمونه‌های تثبیت شده با ۸٪ سیمان تغییر آن‌چنانی نداشته و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۴-۲-۳- تاثیر عمل آوری

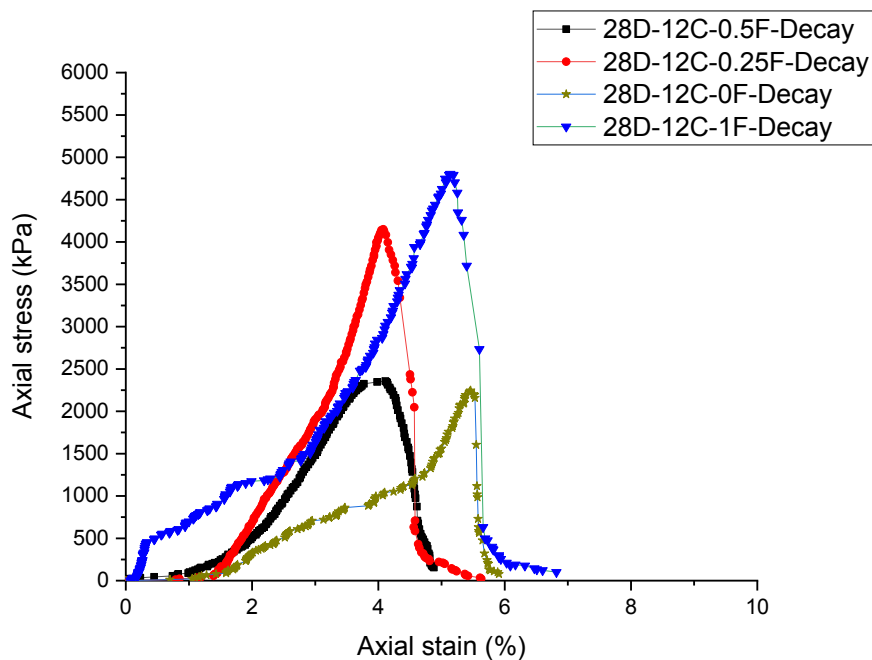
همانطور که گفته شد نمونه‌ها در روزهای عمل آوری ۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ساخته شدند. در این بخش اثر عمل آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شده است. با توجه به شکل ۱۴(a)، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش عمل آوری در درصد‌های مختلف الیاف در حال افزایش است. با افزایش عمل آوری گیرش بین الیاف و خاک در حال کاهش است و با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. با وجود کمتر شدن درگیری بین الیاف و خاک، اثر الیاف کاهش یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری در طول زمان می‌شود. در شکل ۱۴(b)، در نمونه‌های خشک تغییرات قابل توجهی دیده نمی‌شود. نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف تنها تغییرات جزئی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف نشان می‌دهند که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. این نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های

یعنی اینکه نمونه‌ی حاوی ۱۲٪ سیمان مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۴٪ و ۸٪ سیمان نشان داده که این بدلیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان است. نمونه‌های حاوی سیمان دارای نقطه اوج گسیختگی می‌باشند و مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه مرجع دارند اما کرنش گسیختگی آن از نمونه مرجع کمتر است که آن هم بدلیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان و جذب رطوبت خاک بوسیله سیمان است. مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه تثبیت شده با ۱۲٪ سیمان و ۰٪ الیاف نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴۱۰٪ افزایش و ۳۰/۶۶٪ کاهش یافته است. همانطور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌کنید، مانند نمونه‌های مرطوب تثبیت شده با ۴٪ و ۸٪ سیمان، نمونه مرطوب حاوی ۰٪ الیاف بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به نمونه‌های حاوی درصد بیشتری از الیاف از خود نشان داده است. قبلا به این موضوع اشاره شد که با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری مانند نمونه‌های بدون سیمان مرطوب و خشک در حال کاهش است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید، در نمونه‌های پوسیده تثبیت شده با ۱۲٪ سیمان مانند نمونه‌های پوسیده تثبیت شده با ۴٪ و ۸٪ سیمان هم تقریباً نتایج یکسانی را شاهد هستیم. همچنین نمونه حاوی ۱٪ الیاف، بیشترین مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های دیگر با درصد



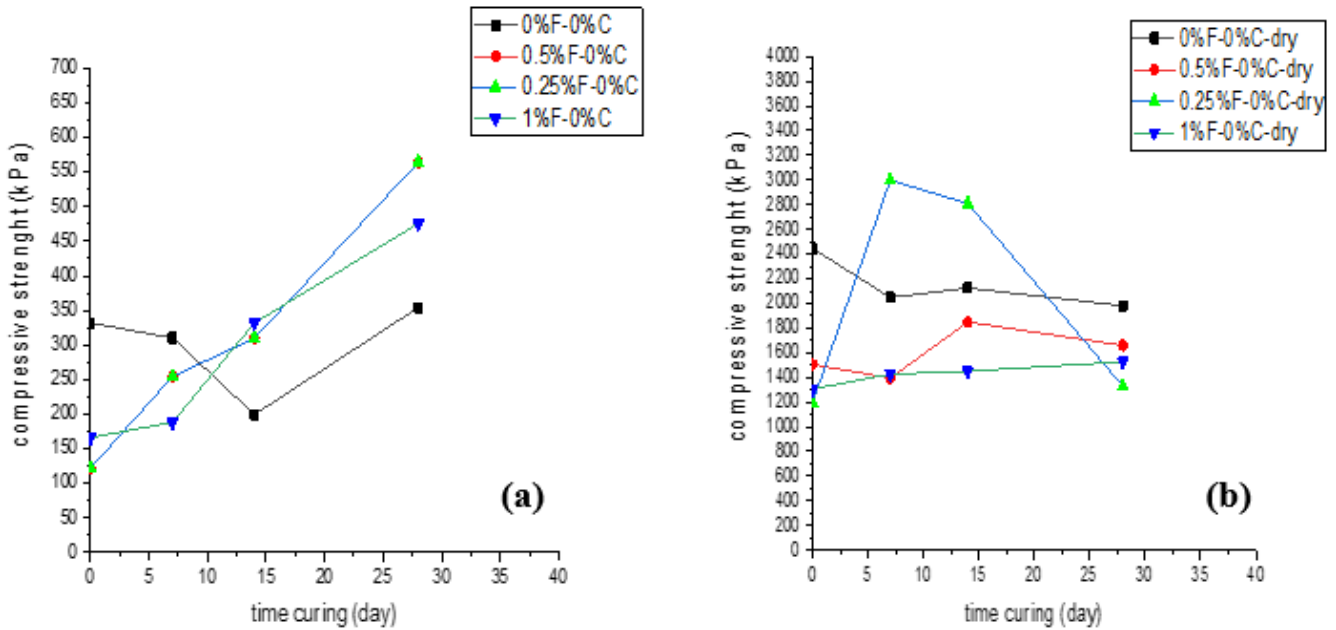
شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مرطوب حاوی درصد‌های مختلف الیاف و ۱۲٪ سیمان.

Fig. 12. Stress-strain curve of wet samples containing different percentages of fibers and 12% cement.



شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های پوسیدگی حاوی درصد‌های مختلف الیاف و ۱۲٪ سیمان.

Fig. 13. Stress-strain curve of decayed samples containing different percentages of fibers and 12% cement.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات مقاومت فشاری در روز های عمل آوری مختلف نمونه های مرطوب با درصد های مختلف الیاف : (a) نمونه مرطوب (b) نمونه خشک.

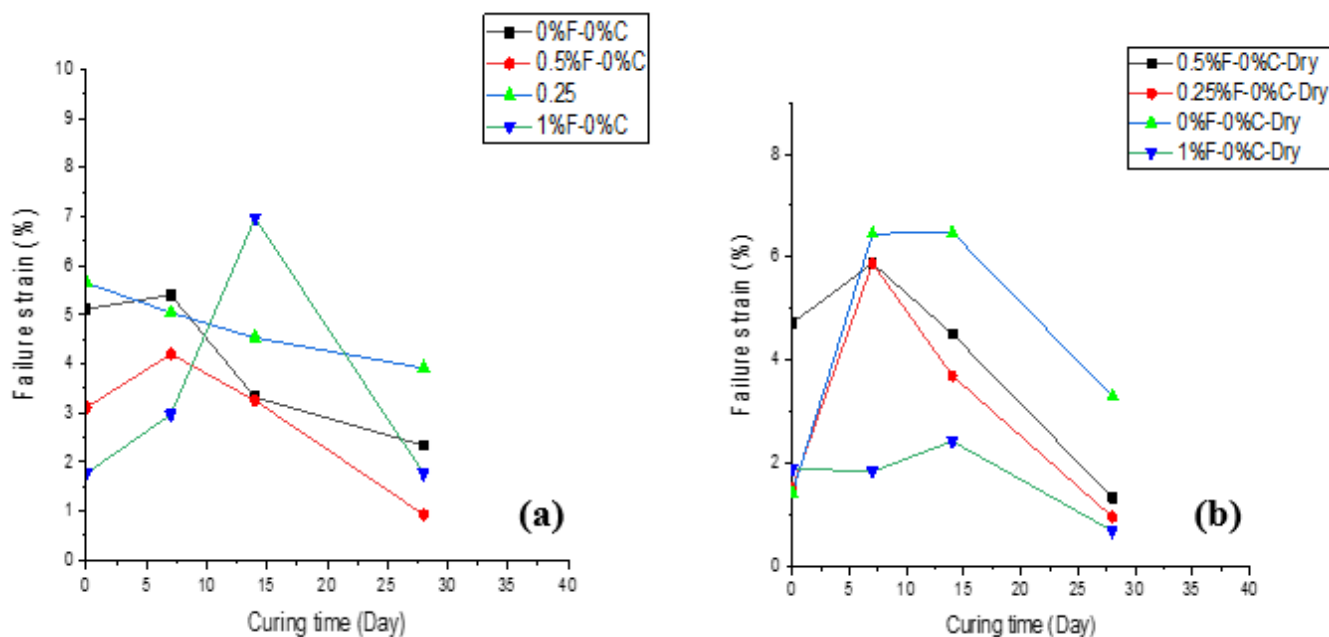
Fig. 14. Diagram of changes in compressive strength on different curing days with various fiber percentages: (a) wet Sample, (b) dry sample.

۴-۳- اثر هوازدگی و سیکل ذوب - یخ

الیاف مورد استفاده در این پژوهش در دسته الیاف طبیعی هستند. این امر طبیعی است که تغییرات آب و هوایی ممکن است بر روی خاکی که بوسیله این الیاف تسلیح شده اند تاثیر بگذارد. از این رو در این تحقیق برای بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر روی خاک ریزدانه تثبیت شده با الیاف ساقه برنج از روش سیکل ذوب - یخ استفاده شد. تمامی نمونه های این آزمایش بر اساس درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک ساخته شده اند. بعد از تحلیل داده های گرفته شده از آزمایش سیکل ذوب-یخ، مشاهده شد که در نمونه های بدون عمل آوری (صفر روزه)، فرآیند درصد کاهش وزن در نمونه حاوی درصد کمتر الیاف بیشتر از نمونه حاوی درصد بیشتر الیاف است. در واقع نمونه های با الیاف کمتر شامل کاهش وزن بیشتری نسبت به نمونه های با الیاف بیشتر بوده اما این تغییر ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است. در نمونه های شامل عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه، نمونه های حاوی الیاف بیشتر درصد کاهش وزن بیشتری نسبت به نمونه های حاوی الیاف کمتر داشت و این تغییر هم ناچیز و قابل چشم پوشی است ولی در مجموع روند کاهش الیاف است.

خشک با درصدهای مختلف الیاف را در طول زمان های عمل آوری مختلف نشان می دهد.

در شکل ۱۵ (a) و با افزایش عمل آوری، کرنش گسیختگی در حال کاهش است. با افزایش عمل آوری و در مرور زمان گیرش و درگیری بین خاک و الیاف در حال کاهش است. با افزایش درصد الیاف، کرنش گسیختگی در حال افزایش است اما با گذشت زمان و افزایش عمل آوری، به دلیل کاهش درگیری میان الیاف و خاک، اثر الیاف کم می شود که باعث کاهش کرنش گسیختگی به مرور زمان می شود. در شکل ۱۵ (b)، کرنش گسیختگی نمونه های خشک کاهش یافته است اما این کاهش در نمونه های حاوی ۰٪ و ۰.۲۵٪ الیاف ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است ولی این کاهش در نمونه های حاوی ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف بیشتر مشاهده می شود. دلیل این رفتار سختی نمونه ها و همچنین افزایش این سختی با خشک شدن نمونه ها و از دست دادن رطوبت می باشد. در ابتدا الیاف دارای رطوبت بوده و انعطاف پذیر بودند اما با خشک شدن نمونه ها، الیاف موجود در آن هم خشک شده که باعث سختی بیشتر در نمونه می شود و در نتیجه با کاهش تر شدن کرنش گسیختگی در نمونه های حاوی الیاف بیشتر می شود.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات کرنش گسیختگی در روزهای عمل آوری مختلف: (a) نمونه مرطوب (b) نمونه خشک

Fig. 15. Figure of the failure strain variations over different curing days with various fiber percentages:(a) wet sample, (b) dry sample

۴-۴-۴ مدل سازی به روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ برای محاسبه مقادیر تنش و کرنش به کار گرفته شده است. رویی مدل ریاضی از طریق ارزیابی آماری با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه DX12 مورد بررسی قرار گرفت. در میان طرح های پیشنهادی، طرح کیوبیک و کوادراتیک برای پیش بینی تنش و کرنش استفاده شد. مدل با استفاده از سلسله مراتب مدل توسعه یافت و حذف خودکار به روش حذف به عقب، عبارت های غیرمعنی دار را نادیده گرفت. مقادیر احتمال P و مقدار F سر رونالد فیشر، اهمیت آماری متغیرها و روابط آن ها را تأیید می کنند. در این پژوهش، مقدار احتمال P برای تمام مدل ها کمتر از ۰/۰۰۱ بود که نشان دهنده کارایی قابل توجه (کمتر از ۰/۰۵) است.

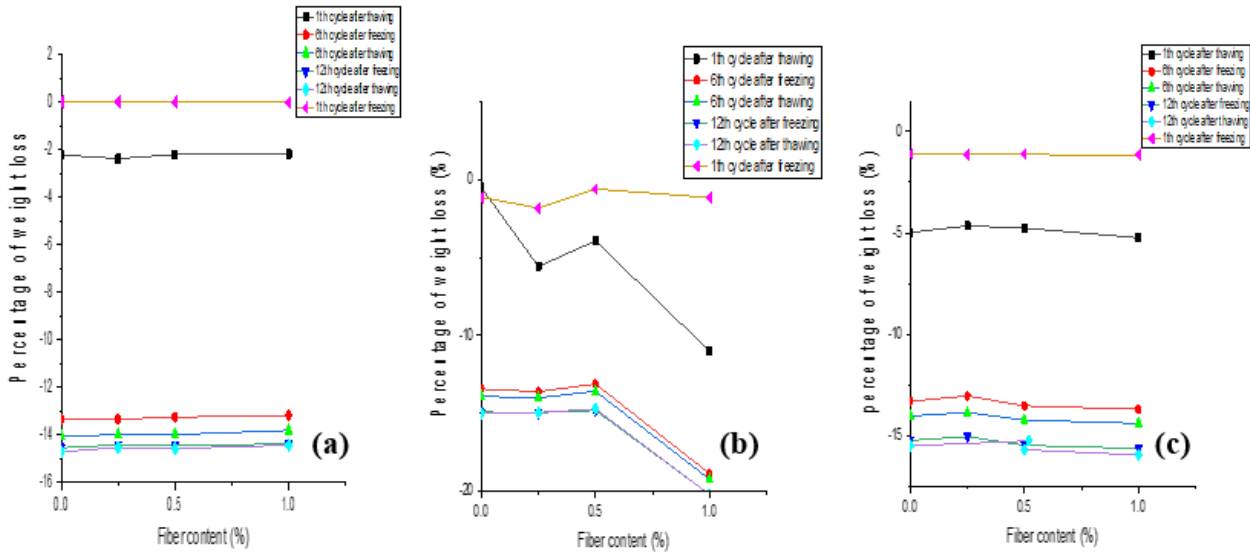
۴-۴-۱ تحلیل های تشخیصی

تحلیل های تشخیصی عمدتاً از باقیمانده های مدل برای شناسایی داده های پرت در نتایج پاسخ استفاده می کنند. برای هر پاسخ در نمونه تحت پوسیدگی، سه نمودار تشخیصی ایجاد شد: نمودار احتمال نرمال، نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی، نمودار باقیمانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده رو به افزایش.

نمودار احتمال نرمال باقیمانده های را نشان می دهد که توزیع نرمال

کاهش در فرآیند ذوب نسبت به فرآیند یخ بیشتر است، در واقع این تغییرات ناشی از بوجود آمدن حفرات بوسیله الیاف است که در فرآیند یخ، این حفرات یخ می زنند و در فرآیند ذوب آب می شوند که باعث کاهش وزن در نمونه و ریزش خاک در این خاک رمبنده می شوند. فرآیند برس کشیدن بر روی نمونه ها در کاهش وزن این نمونه ها بی تاثیر نیست. بعد از تکمیل شدن فرآیند ذوب، خرده خاک هایی که بر روی سطح و دیواره نمونه ها می ماند با برس برداشته شده تا خطایی در وزن خاک ایجاد نکنند.

در مجموع نگرانی اصلی که باعث شد این آزمایش جهت بررسی تاثیر تغییرات مداوم آب و هوایی بر روی نمونه ها انجام شود این بود که حفراتی که الیاف در خاک ایجاد می کنند با یخ زدن و ذوب شدن باعث کاهش زیاد در وزن نمونه ها و نشست خاک نشود. نتایج نشان می دهد این تغییرات بسیار کم و ناچیز بوده و می توان از آن چشم پوشی کرد اما در کل روند تغییرات وزن در همه ی نمونه ها کاهش یافته است. در ادامه چند نمونه از این تغییرات در سیکل ها و زمان های عمل آوری مختلف با درصد الیاف موجود ارائه شده است. این نمودارها درصد کاهش وزن در درصد الیاف مختلف است که بدلیل زیاد بودن تعداد سیکل ها، سیکل اول، ششم و دوازدهم (شکل ۱۶) از هر عمل آوری (۰ ، ۱۴ و ۲۸ روزه) به عنوان نماینده ارائه شده است.



شکل ۱۶. تغییرات وزن نمونه‌های (a) بدون عمل آوری، (b) ۱۴ روزه و (c) ۲۸ روزه در سیکل اول، ششم و دوازدهم بعد از یخ و ذوب

Fig. 16. Weight variations of the samples: (a) un-cured, (b) cured for 14 days, and (c) cured for 28 days, after the 1st, 6th, and 12th freeze-thaw cycles.

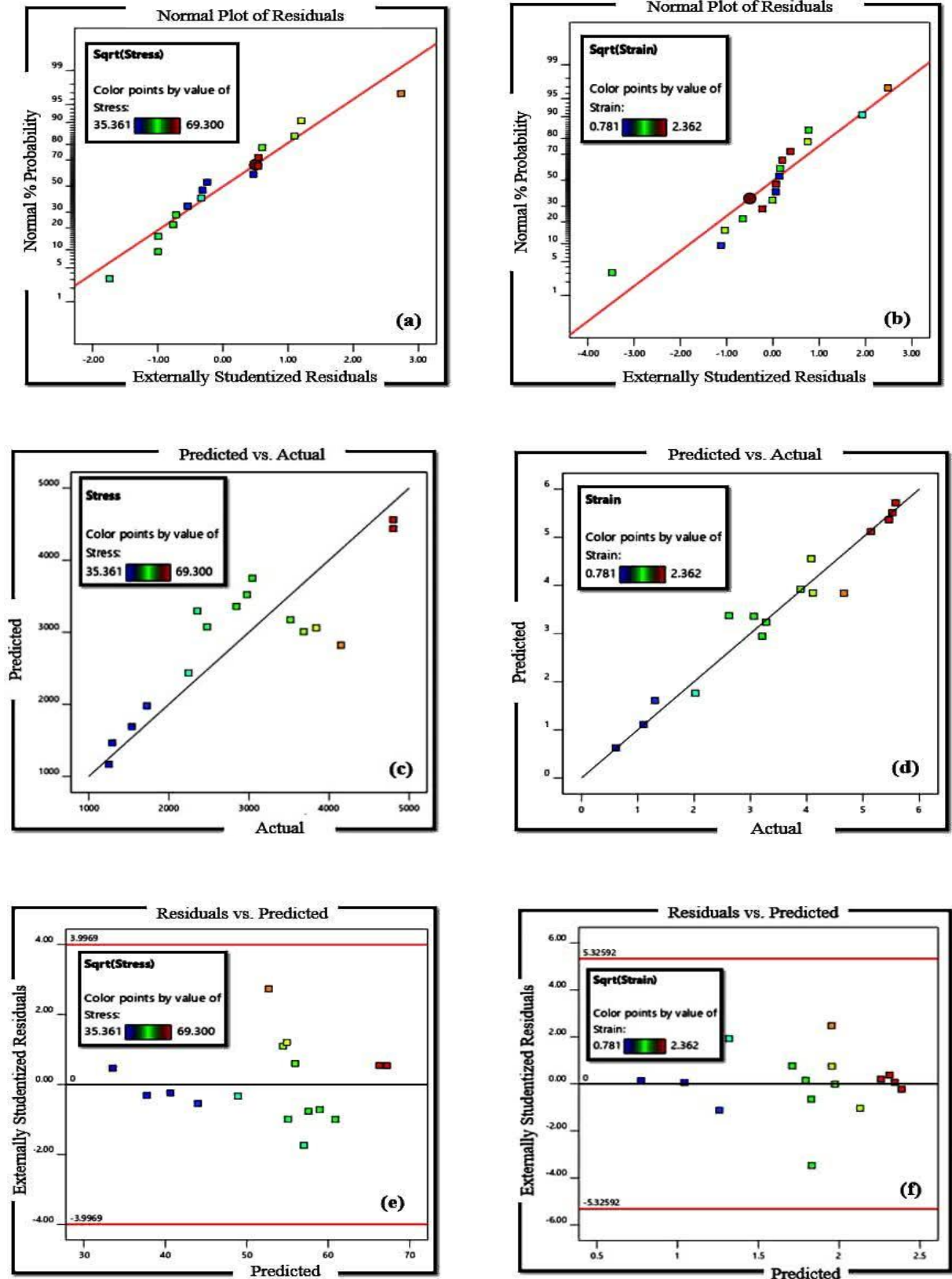
می‌توانند تعامل بین پاسخ‌ها و متغیرها را توضیح دهند و پیش‌بینی‌های جامع و قابل‌اعتمادی را ارائه می‌دهند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات الیاف طبیعی ساقه برنج، پوسیدگی الیاف، تثبیت با سیمان، زمان عمل‌آوری و تغییرات رطوبتی بر خواص مکانیکی خاک از طریق آزمایش‌های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و سیکل ذوب-یخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر است:

۱. نمونه‌های خشک مقاومت فشاری بالاتر و نقطه پیک گسیختگی بیشتری نسبت به نمونه‌های مرطوب و مرجع از خود نشان دادند. نمونه مرجع دارای مقاومت فشاری ۳۳۱/۹۷ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی ۵/۱۲٪ بود. افزایش درصد الیاف از ۰٪ تا ۱٪ در نمونه‌های مرطوب باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش کرنش گسیختگی شد؛ به‌عنوان مثال، نمونه مرطوب صفر روزه حاوی ۱٪ الیاف مقاومت فشاری خود را ۵۰٪ کاهش و کرنش گسیختگی را ۵۷/۳۷٪ افزایش داد. نمونه خشک حاوی ۱٪ الیاف مقاومت فشاری خود را ۲۹۳/۳۳٪ افزایش و کرنش گسیختگی را ۶۹/۸۹٪ کاهش داد. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌های مرطوب به دلیل اثر کششی الیاف و افزایش سختی نمونه‌های

دارند. اشکال خاص مانند خط "S-شکل" می‌توانند ارزیابی مناسبی از تغییر شکل پاسخ را نشان دهند. شکل ۱۷ (a) و (b) نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها را برای پاسخ‌های پارامتر تنش و کرنش تحت اثر پوسیدگی نشان می‌دهد. همه داده‌ها از یک فرمت ثابت پیروی کرده و توسط یک خط مستقیم نمایش داده شده‌اند. نمودارهای واقعی در مقابل پیش‌بینی شده، کمیته یا مجموعه‌ای از کمیته‌ها را نشان می‌دهند که مدل نمی‌تواند به سادگی پیش‌بینی کند. نمودار مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای تنش و کرنش در شکل ۱۷ (c) و (d) نشان می‌دهد که نمودار تقریباً یک خط مستقیم ۴۵ درجه است که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین نتایج واقعی و پیش‌بینی شده است. نمودار باقیمانده‌ها در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده از یک نمودار پراکنده با باقیمانده‌های خارجی روی محور Y و مقادیر پیش‌بینی‌کننده روی محور X تشکیل شده است. یک نمودار شکل‌گرفته به‌درستی با یک پرش کاملاً تصادفی اغلب یک نوار تقریباً افقی در امتداد محور باقیمانده‌های خارجی = ۰ ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هیچ تفاوتی بین نقطه داده و الگوی تصادفی کلی سایر باقیمانده‌ها وجود ندارد. شکل ۱۷ (e) و (f) توزیع ناهمگون داده‌ها و نمودار باقیمانده‌ها و مقادیر مورد انتظار (پیش‌بینی شده در مقابل باقیمانده) پارامترهای تنش و کرنش را نشان می‌دهد. اشکال ۱۷ (a تا f) نشان می‌دهند که هر دو مدل دقیق هستن و



شکل ۱۷. نمودارهای روش سطح پاسخ برای مدل‌های توسعه‌یافته. (a، b) نمودارهای نرمال باقیمانده‌ها (c، d) داده‌های پیش‌بینی شده در مقابل داده‌های واقعی و (e، f) باقیمانده‌ها در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده

Fig. 17. Response surface methodology (RSM) plots for the developed models: (a, b) normal probability plots of residuals; (c, d) predicted versus actual values; and (e, f) residuals versus predicted values.

تخمین پارامترهای تنش (ضریب همبستگی $R^2 = 0/84$) و کرنش (ضریب همبستگی $R^2 = 0/94$) در خاک با الیاف پوسیده، کارآمد است.

منابع

- [1] K.C. Onyelowe, A.M. Ebid, E.R. Sujatha, F. Fazel-Mojtahedi, A. Golaghaei-Darzi, D.P.N. Kontoni, N. Nooralddin-Othman, Extensive overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems, *Heliyon* 9(3) (2023)
- [2] M. A. Khodabandeh, S. Nokande, A. Besharatinezhad, B. Sadeghi, S. M. Hosseini, The Effect of Acidic and Alkaline Chemical Solutions on the Behavior of Collapsible Soils, *Period. Polytech. Civ. Eng.* (2020)
- [3] H. Moradi Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *International Journal of Civil Engineering*. (2021) 1313-1325.
- [4] G. Liu, C. Zhang, M. Zhao, W. Guo, Q. Luo, Comparison of Nanomaterials with Other Unconventional Materials Used as Additives for Soil Improvement in the Context of Sustainable Development: A Review, *Nanomaterials*. 11(1) (2020) 15.
- [5] M.R. Karami, M. Keramati, M. Ebrahimi, H. Moradi Moghaddam, R. Maadi, Laboratory Evaluation of CBR Values in Geopet-Reinforced Sandy Soils: Modeling with the RSM Method, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(10) (2024) 1321-1350.
- [6] S. Bojnourdi, S. S. Narani, M. Abbaspour, T. Ebadi, S. M. Mir Mohammad Hosseini, Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures, *Eng. Geology*. 279 (2020) 105886.
- [7] 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.
- [8] M. M. Roshani, S. H. Kargar, V. Farhangi, M. Karakouzian, Predicting the Effect of Fly Ash on Concrete's Mechanical

خشک به دلیل کاهش رطوبت است.

۲. با افزایش زمان عمل‌آوری (۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه)، مقاومت فشاری نمونه‌ها در درصد‌های مختلف الیاف افزایش یافت. در نمونه‌های خشک، تغییرات مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل‌آوری ناچیز بود، اما کاهش کرنش گسیختگی در نمونه‌های حاوی ۰،۵٪ و ۱٪ الیاف قابل توجه بود که دلیل آن از دست رفتن رطوبت الیاف و افزایش سختی نمونه‌ها است. نمونه‌های خشک عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز بالاترین مقاومت فشاری و کمترین کرنش گسیختگی را نشان دادند.

۳. نمونه‌های پوسیده حاوی الیاف کاهش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی را تجربه کردند. برای نمونه‌های ۲۸ روزه پوسیده، افزایش درصد الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی به ترتیب ۲۸/۳۹٪ و ۶۹/۸۰٪ شد. این امر ناشی از افزایش تخلخل خاک و از بین رفتن اثر کششی و انعطاف‌پذیری الیاف بود. اگرچه نمونه‌های پوسیده به دلیل خشک شدن مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های مرطوب داشتند، اما گسیختگی ترد و کرنش پایین نشان دادند. نمونه‌های ۰٪ الیاف پوسیده نسبت به نمونه‌های خشک، کاهش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی به ترتیب ۱۲/۸۴٪ و ۳۸/۷۸٪ داشتند.

۴. نمونه‌های حاوی ۱۲٪ سیمان مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های با سیمان کمتر داشتند. هیدراتاسیون سیمان باعث جذب رطوبت و افزایش سختی شد، در حالی که کرنش گسیختگی کاهش یافت. به‌طور مثال، نمونه تثبیت‌شده با ۱۲٪ سیمان و ۰٪ الیاف نسبت به نمونه مرجع ۴۱۰٪ افزایش مقاومت فشاری و ۳۰/۶۶٪ کاهش کرنش گسیختگی داشت. در نمونه‌های پوسیده تثبیت‌شده با ۱۲٪ سیمان، نمونه حاوی ۱٪ الیاف بیشترین مقاومت فشاری را داشت، زیرا سیمان جایگزین فضای خالی ناشی از پوسیدگی الیاف شد.

۵. کاهش وزن در طول سیکل‌ها بسیار ناچیز بود و بیشترین کاهش در مرحله ذوب مشاهده شد. نمونه‌های با درصد بالاتر الیاف کاهش وزن کمی بیشتر داشتند، اما این تغییرات تأثیر قابل توجهی بر پایداری خاک نداشت.

Top of Form

Bottom of Form

Top of Form

Bottom of Form

۶. مدل‌های محاسباتی مبتنی بر روش سطح پاسخ همبستگی خوبی با یافته‌های تجربی داشتند. این نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای

- engineering properties. *International Journal of Civil Engineering*, 15(3), (2017) 401-409.
- [18] S. Thomas, S. A. Paul, L. A. Pothan, B. Deepa, Natural Fibres: Structure, Properties and Applications, in *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (2011) 3–42.
- [19] Z. Li, X. Zhang, C. Fa, Y. Zhang, J. Xiong, H. Chen, Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers, *Construction and Building Materials*. 248 (2020) 118648.
- [20] H.M. Moghaddam, M. Keramati, A. Fahimifar, T. Ebadi, S. Siddiqua, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, S. Dessouky, Shear modulus prediction of landfill components using novel machine learners hybridized with forensic-based investigation optimization, *Construction and Building Materials*. 411 (2024) 134443.
- [21] M. H. Moradi, M. Keramati, A. Bahrami, A.R. Ghanizadeh, A.T. Amlashi, H.F. Isleem, M. Navazani, S. Dessouky, Application of hybridized ensemble learning and equilibrium optimization in estimating damping ratios of municipal solid waste, *Scientific Reports*. 14(1) (2024)17584.
- [22] A.T. Amlashi, A.R. Ghanizadeh, S. Firouzranjbar, H.M. Moghaddam, M. Navazani, H.F. Isleem, S. Dessouky, M. Khishe, Predicting workability and mechanical properties of bentonite plastic concrete using hybrid ensemble learning, *Scientific Reports*. 15(1) (2025) 7686.
- [23] H.M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays using experimental and artificial methods, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 17(1) (2025) 524-538.
- [24] M.R. Karami, M. Keramati, R. Maadi, H. Moradi Moghaddam, Effect of layered polyethylene terephthalate (Geopet) for reinforcing stabilized sand with fly ash, *World Journal of Engineering*. 22(3) (2025) 638-651.
- Properties by ANN, *Sustainability*. 13(3) (2021) 1469.
- [9] S. M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S. M. Abtahi, A. Zadhoush, A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Construction and Building Materials*. 30 (2012) 100-116.
- [10] F. Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, *Geomechanics and Geoengineering*. (2021) 1-16.
- [11] P. Alidoust, P. Kargar, S. Goodarzi, M. Keramati, H. Moradi Moqaddam, Laboratory-based assessment on similarities between dynamic behavior of MSW and clay, *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 23(2) (2021) 622-643
- [12] S. Moin and S. Qasim, Effect on dynamic parameters of waste reinforced soil under vibrations generated through traffic loading: Experimental evaluation, *J. Eng. Res.* (2023)
- [13] N. Heath-Brown. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). In the *Statesman's Yearbook 2016: The Politics, Cultures and Economies of the World*. London: Palgrave Macmillan UK. (2015) 56-57.
- [14] H. Pamukçu, P. Soyertaş Yapıcıoğlu, M. İrfan Yeşilnacar, Investigating the mitigation of greenhouse gas emissions from municipal solid waste management using ant colony algorithm, Monte Carlo simulation and LCA approach in terms of EU Green Deal, *Waste Manag. Bull.* 1(2) (2023) 6-14.
- [15] P. Dusser, The European Energy Policy for 2020–2030 RED II: what future for vegetable oil as a source of bioenergy. (2019) 51.
- [16] I. I. Akinwumi, C. A. Booth, D. Diwa, P. Mills, Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng.* 169 (4) (2016) 336-345.
- [17] G.P. Ganapathy, R. Gobinath, I.I. Akinwumi, S. Kovendiran, M. Thangaraj, N. Lokesh, S. Muhamed Anas, R. Arul Murugan, P. Yogeswaran, S. Hema, Bio-enzymatic stabilization of a soil having poor

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. A. ghasemi, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, Investigation of the Effects of Weathering and Decay on Soil Stabilized with Rice Straw Fibers, Amirkabir J. Civil Eng., 57(8) (2025) 1319-1342.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23771.8214](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23771.8214)

