



بررسی اثر الیاف ساقه برنج بر رفتار مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با سیمان

محسن کرامتی^{*}، فاطمه صباغزاده، امین رامش

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

کلمات کلیدی:

خاک رسی
آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده
سیمان
الیاف ساقه برنج
عمل آوری

خلاصه: تولید روزافزون پسماندهای لیگنوسلولزی و سوزاندن بخشی از آنها توسط کشاورزان سبب نگرانی‌های زیست‌محیطی شده است. استفاده مجدد از این الیاف‌ها جهت بهسازی خاک‌های سست می‌تواند از این قبیل از مشکلات بکاهد. لازم به ذکر است استفاده از الیاف طبیعی به دلیل سازگاری با محیط زیست و نیز تحقق اهداف ژئوتکنیک پایدار بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق به ارزیابی اثر تسلیح الیاف طبیعی ساقه برنج بر رفتار مکانیکی خاک‌های ریزدانه رسی تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. مطالعه اثر درصد‌های مختلف اختلاط این الیاف بر روی مقاومت فشاری خاک رسی تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان با انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و نیز بررسی اثر الیاف فوق و سیمان بر نتایج آزمایش تراکم استاندارد، اساس تحقیقات آزمایشگاهی این پروژه را تشکیل داده‌اند. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از سیمان به عنوان یک افزودنی در کنار الیاف ساقه برنج، چسبندگی مورد نیاز ایجاد شده تا مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یابد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر وزنی مختلف الیاف (۰/۲۵٪ و ۰/۱٪) و سیمان (۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۱/۲٪) نشان داده است که در یک مقدار ثابت سیمان، افزایش مقدار الیاف سبب افزایش مقاومت فشاری تا ۱۴۸٪ و همچنین در مقدار الیاف یکسان، افزایش مقدار سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری تا ۱۸۳٪ شده است.

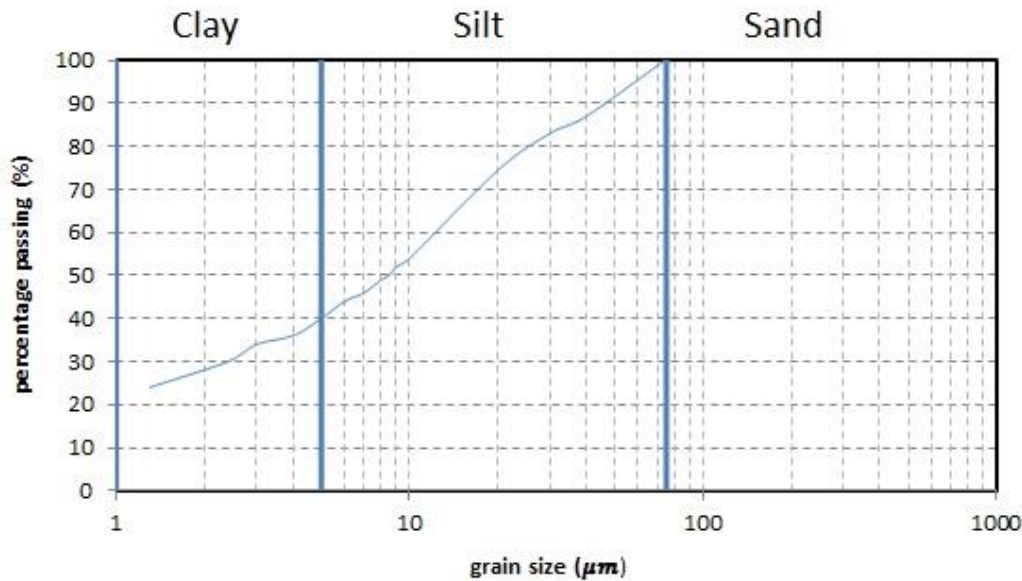
۱- مقدمه

خاک و آب‌های زیرزمینی را آلوده کند [۵-۳]. یک روش رایج جهت افزایش مقاومت فشاری خاک استفاده از سیمان به عنوان تثبیت کننده می‌باشد [۹-۶، ۴ و ۲]. این افزایش مقاومت با ترد شدگی و افزایش مدول الاستیسیته همراه است [۶]. اما استفاده از سیمان در کنار افزایش مقاومت، مضراتی از جمله افزایش تولید کربن دی اکسید به همراه دارد که یک خطر برای محیط زیست در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. به همین علت استفاده از مواد سازگار با محیط زیست که این ضرر و زیان را پوشش دهد ضروری است.

روش‌های مکانیکی و شیمیایی مختلفی جهت بهسازی خاک‌های سست وجود دارد که استفاده از هر کدام از این روش‌ها به عوامل مختلفی از جمله شرایط اقتصادی، ملاحظات زیست‌محیطی و شرایط سازه بستگی دارد [۱] به عنوان مثال روش تزریق در شرایطی اثرگذار است که سازه سنگین باشد و یا بهسازی سازه زیرزمینی لازم باشد. همچنین با استفاده از شمع‌ها می‌توان بار سازه را به لایه‌های زیرین خاک منتقل کرد. تقویت خاک‌های سست به کمک عناصری مانند الیاف‌های طبیعی و مصنوعی که مقاومت کششی را تقویت می‌کنند و پایدار نمودن این خاک‌ها با استفاده از افزودنی‌هایی که واکنش شیمیایی با خاک دارند، برای ایجاد خاکی با ویژگی‌های مهندسی دلخواه تسلیح و تثبیت خاک نامیده می‌شود [۲]. با وجود این که تثبیت شیمیایی اثرات مثبت قابل توجهی در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک‌های ریزدانه سست به وجود آورده است اما استفاده بیش از حد این مواد ضرر و زیان قابل توجهی به وجود می‌آورد که می‌تواند pH خاک را تغییر داده و

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: keramati@sharoodut.ac.ir





شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.

Fig. 1. Grain size distribution curve of the studied soil

سیمان را کاهش داد و از تولید بیشتر کربن‌دی‌اکسید و آلودگی محیط زیست جلوگیری کرد [۲۳ و ۱۹]. در این پژوهش هدف از تحقیق بررسی رفتار مکانیکی خاک ریزدانه رسی مسلح شده با الیاف طبیعی ساقه برنج و تثبیت شده با سیمان و نیز بررسی اثر زمان عمل‌آوری می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت بهسازی خاک رسی منطقه چاله‌باغ گرگان از الیاف ساقه برنج و سیمان استفاده شده است که در قسمت‌های بعد ویژگی‌های هر یک به تفصیل توضیح داده شده است.

۲-۱- خاک رسی چاله‌باغ گرگان

خاک مورد مطالعه از منطقه چاله‌باغ شهرستان گرگان تهیه شده و آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری بر اساس استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است. منحنی دانه‌بندی خاک مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. این خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد در رده CL قرار گرفته و طبق استاندارد ASTM D698-07 وزن مخصوص خشک حداکثر 1.79 gr/cm^3 و درصد رطوبت بهینه 18.2% به دست آمده است. سایر مشخصات فیزیکی خاک در جدول ۱ قرار داده شده است. [۲۴ و ۲۵]

پیچیده‌تر نیازمند بررسی‌های بیشتری است [۲۰]. از آنجا که الیاف‌های طبیعی به وفور در طبیعت یافت می‌شوند و جزء منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شوند، به نظر می‌رسد در صورت پایدارسازی، رفتار آن‌ها از نظر اقتصادی گزینه مناسبی به‌شمار رود [۲۲، ۲۱ و ۱۸]. از دیگر محاسن استفاده از الیاف می‌توان به کاهش حجم زباله تولیدی اشاره کرد [۱۸]. گسترش شبکه راهسازی و توسعه مسیرهای ارتباطی از مهم‌ترین عوامل پیشرفت محسوب می‌گردد و استفاده از مصالح موجود در محل جهت بهسازی خاک منطقه سبب کاهش هزینه‌های ساخت می‌گردد. بنابراین در صورتی که خاک موجود در محل نیاز به بهسازی داشته باشد، می‌توان با استفاده از تثبیت‌کننده‌ها و یا تسلیح‌کننده‌های طبیعی به دلیل سازگاری با طبیعت و نیز اهداف منطبق با ژئوتکنیک پایدار استفاده کرد. در مناطقی که گیاه بومی منطقه به عنوان تسلیح‌کننده قابل استفاده باشد، استفاده از خاک مسلح منطقی به نظر می‌رسد.

از مهم‌ترین معایب الیاف‌های طبیعی می‌توان به تجزیه‌پذیری آن‌ها در چرخه طبیعت اشاره کرد. بنابراین جهت حصول اطمینان از عملکرد طولانی مدت این الیاف‌ها باید از آن‌ها در مقابل عوامل بیرونی محافظت کرد. محققین اثبات کرده‌اند که با افزودن نمودن الیاف به مواد شیمیایی، این مشکل مرتفع می‌گردد. بنابراین می‌توان با استفاده توأم سیمان و الیاف، علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی خاک و جلوگیری از تجزیه‌پذیری الیاف، مصرف

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Physical characteristics of the studied soil

مقدار مشخصه مورد بررسی	شماره استاندارد	پارامتر فیزیکی مورد بررسی
CL	ASTM D422-63[24]	دانه‌بندی
۲/۶۷	ASTM D854-02[26]	G_s
۱/۷۹	ASTM D698-07[27]	γ_{dmax} ($\frac{gr}{cm^3}$)
۱۸/۲	ASTM D698-07[28]	ω_{opt} (%)
۵/۴۹	ASTM D2216-10[29]	ω (%)
۲۰/۵۸	ASTM D4318-00[30]	PL (%)
۱۰/۲۷	ASTM D4318-00[30]	PI (%)

جدول ۲. نتایج درصد وزنی اکسید عناصر و مقاومت فشاری سیمان پرتلند تیپ ۲.

Table 2. Results of weight percentage of elements oxide and compressive strength of Portland cement type 2

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm ²)
٪۲۱/۷	٪۵/۲۲	٪۳/۷۴	٪۶۴/۴۴	٪۲/۲۲	۳۴۵	۴۶۵

شده است. امروزه مشاهده می‌شود که بخشی از پسماندهای باقی‌مانده در سطح زمین‌های کشاورزی بدون برداشت بوده و توسط کشاورزان سوزانده می‌شوند که باعث آلودگی زیست محیطی شده و در صورت تداوم در طول سالین بعدی باعث کاهش مواد آلی خاک می‌شود. لذا کاربرد این مواد در بهسازی خاک می‌تواند از این قبیل از مشکلات محیط زیستی بکاهد. در این تحقیق از الیاف طبیعی ساقه برنج به عنوان تسلیح کننده در کنار افزودنی سیمان استفاده شده است. ساقه‌های برنج که در شکل ۲ دیده می‌شوند، از منطقه کشاورزی گرگان با وزن مخصوص حدود $0.23 \frac{gr}{cm^3}$ و با قطر میانگین ۰/۲ cm تهیه شده است. با توجه به محدودیت‌های ابعادی قالب نمونه‌ساز تک‌محوری (قطر داخلی ۵۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm) الیاف‌ها به صورت خشک به طول‌های ۱ cm بریده شده‌اند. در جدول ۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف ساقه برنج مشخص گردیده است [۲۸].

۲-۲- افزودنی سیمان

در این تحقیق جهت تثبیت خاک رسی از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده که وزن مخصوص آن حدود $3-3.25 \frac{gr}{cm^3}$ می‌باشد. این نوع از سیمان به دلیل فراوانی و نیز مقاومت در مقابل مواد شیمیایی و نیز استفاده در اغلب پژوهش‌ها به عنوان سیمان مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار اکسید عناصر این تیپ سیمان و مقاومت فشاری آن در جدول ۲ قرار داده شده است.

۲-۳- مسلح کننده طبیعی الیاف ساقه برنج

پسماندهای کشاورزی و صنایع چوبی و دانه‌های تولید انرژی، لیگنوسلولز نامیده می‌شوند. حجم عظیمی از پسماندهای لیگنوسلولزی در سراسر جهان تولید می‌شود که این مسئله سبب نگرانی‌های زیست محیطی شده است. تولید سالانه الیاف ساقه برنج در سطح جهان ۴۶۵۲۰۰ هزار تن تخمین زده



شکل ۲. الیاف کوتاه شده ساقه برنج به طول ۱ cm و قطر میانگین ۰/۲ cm.

Fig. 2. Shortened rice straw fibers with a length of 1 cm and an average diameter of 0.2 cm

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف ساقه برنج

Table 3. Physical and mechanical properties of rice straw fibers

مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص ($\frac{gr}{cm^3}$)
۱/۱-۲۱/۲۵	۴۴۹	۰/۲۳

چکش ۲/۵ kg که از ارتفاع ۳۰/۴۸ 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 $\gamma_d - \omega$ ، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به دست آمده است [۲۴].

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

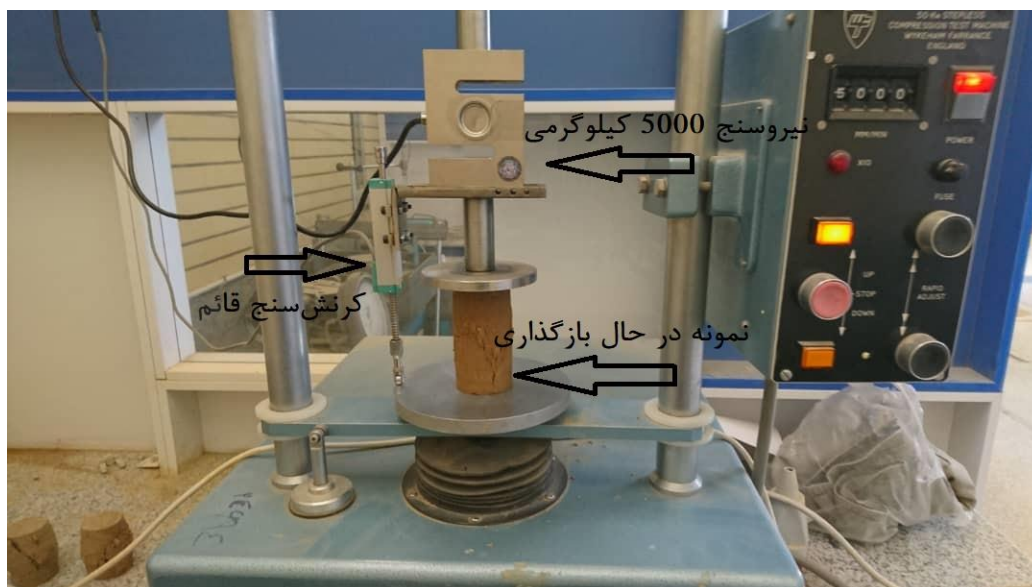
آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نوع خاصی از آزمایش UU می‌باشد که معمولاً برای نمونه‌های رسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش فشار محدود کننده σ_3 برابر صفر است و بار محوری تا زمان گسیختگی به نمونه اعمال می‌شود.

۳- روش انجام آزمایش

جهت مشخص شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها، آزمایش تراکم استاندارد انجام شده است. پس از مشخص شدن پارامترهای لازم (وزن مخصوص خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه، مقدار الیاف و سیمان)، نمونه‌ها در نمونه‌ساز مخصوص آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ساخته شده و جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته‌اند.

۳-۱- آزمایش تراکم استاندارد

قبل از ساخت نمونه‌های تک‌محوری لازم است ۱۲ آزمایش تراکم استاندارد برای هر نمونه با مقادیر مختلف الیاف و سیمان انجام شود. این آزمایش مطابق ASTM D698-07 انجام شده است. به این صورت که مخلوط خاک و الیاف و سیمان با هم ترکیب شده و در ۳ لایه با ۲۵ ضربه



شکل ۳. دستگاه مقاومت فشاری محدود نشده

Fig. 3. Unconfined compressive strength test

۳-۲-۱- دستگاه و روش انجام آزمایش

جهت بررسی اثر ساقه برنج، سیمان و زمان عمل‌آوری بر میزان مقاومت فشاری خاک‌های رسی، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده مطابق با ASTM D2166-00 انجام شده است. در این آزمایش، کرنش قائم به کمک حسگر LVDT با بازه ۵۰ mm و دقت ۰/۰۱ mm محاسبه شده است. همچنین جهت اندازه‌گیری تنش از یک نیروسنج با ظرفیت ۵۰۰۰ kg استفاده شده است. داده‌های خروجی از طریق ثبت‌کننده داده در کامپیوتر ذخیره شده‌اند. در شکل ۳ دستگاه مقاومت فشاری محدود نشده به همراه حسگرها قرار داده شده است [۲۹].

جهت انجام آزمایش ابتدا دستگاه واسنجی شده و سپس نمونه در محل مخصوص خود گذاشته شده، به طوری که نمونه در مرکز صفحه پایینی قرار گرفته باشد. سپس بار محوری به روش کنترل کرنش با سرعت ۵ mm/min به نمونه اعمال شده است. این روند تا جایی ادامه داشته که بار به نقطه اوجی رسیده و سپس کاهش یافته باشد.

۳-۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

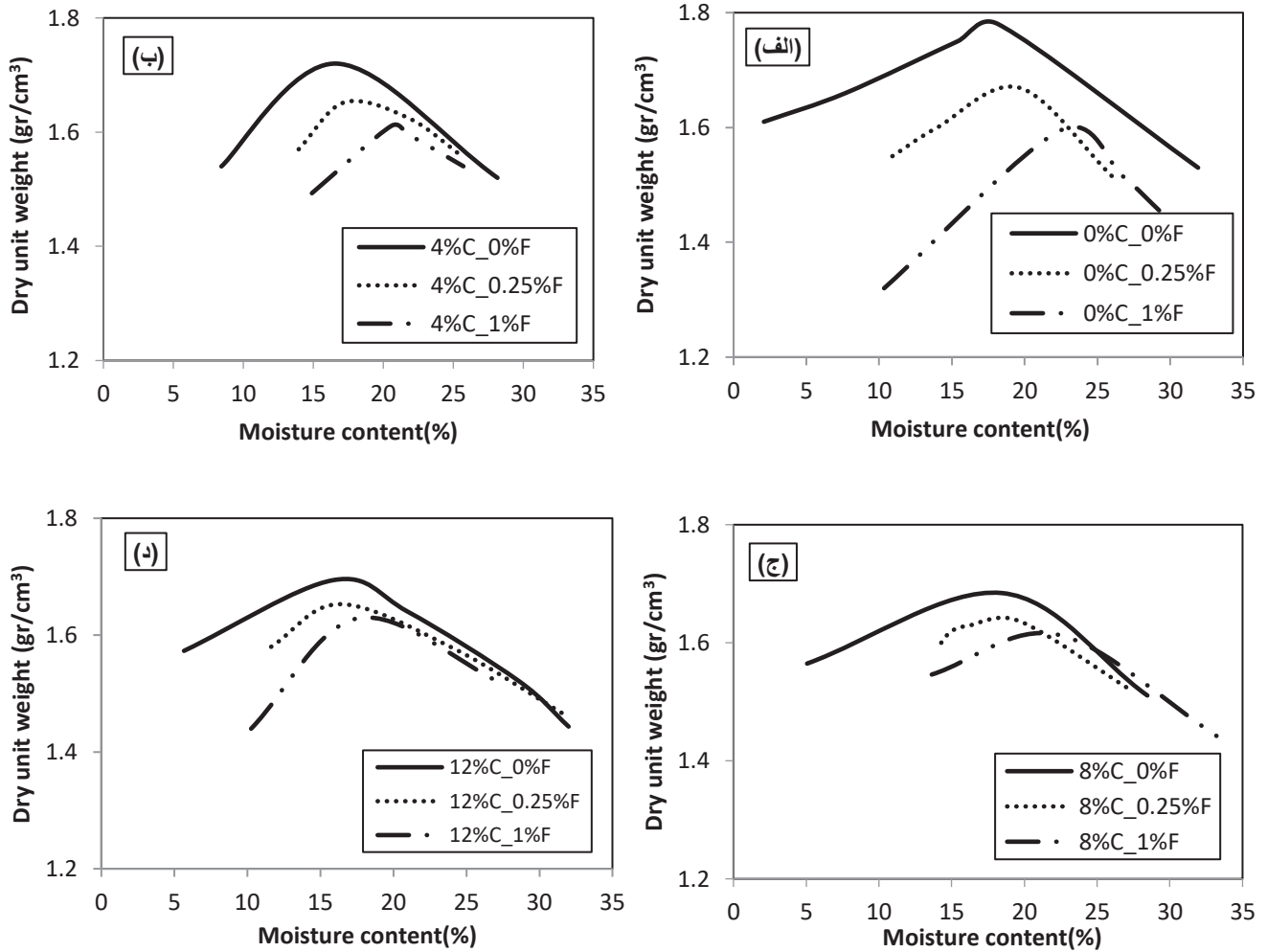
پس از مشخص شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه از طریق آزمایش تراکم استاندارد، نمونه‌ها با مقادیر وزنی مختلف الیاف (۰٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر)، سیمان (۰٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۰/۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) با وزن مخصوص

و درصد طوبت متفاوت (بر اساس نتایج آزمایش تراکم استاندارد) در قالب نمونه‌سازی به قطر داخلی ۵۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm ساخته شده‌اند. پس از متراکم شدن نمونه درون قالب، دو سطح مقطع آن صاف و یکدست شده و از قالب خارج شده‌اند. نمونه‌ها برحسب زمان عمل‌آوری (۰، ۷ و ۲۸ روز) جهت حفظ رطوبت، درون نایلون به مدت لازم در دمای محیط که حدود ۲۵°C است، نگهداری شده‌اند.

۴- بحث و تفسیر نتایج

۴-۱- آزمایش تراکم استاندارد

در شکل ۴ و جدول ۴ نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک مسلح نشده و خاک مسلح شده با درصد وزنی مختلف الیاف (۰٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و درصد وزنی مختلف سیمان (۰٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۰/۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) نشان داده شده است. با افزایش درصد وزنی الیاف در محتوی سیمان یکسان، نمودار تراکم به سمت راست و پایین حرکت کرده است. یعنی با کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه همراه بوده است که دلیل آن افزایش محتوی الیاف با وزن مخصوص پایین است. نتایج مشابه توسط تران و همکاران (۲۰۱۸) که بر روی فیبرهای طبیعی انجام گرفت نیز موید این مطلب می‌باشد [۲]. البته با افزایش درصد وزنی سیمان میزان تغییرات



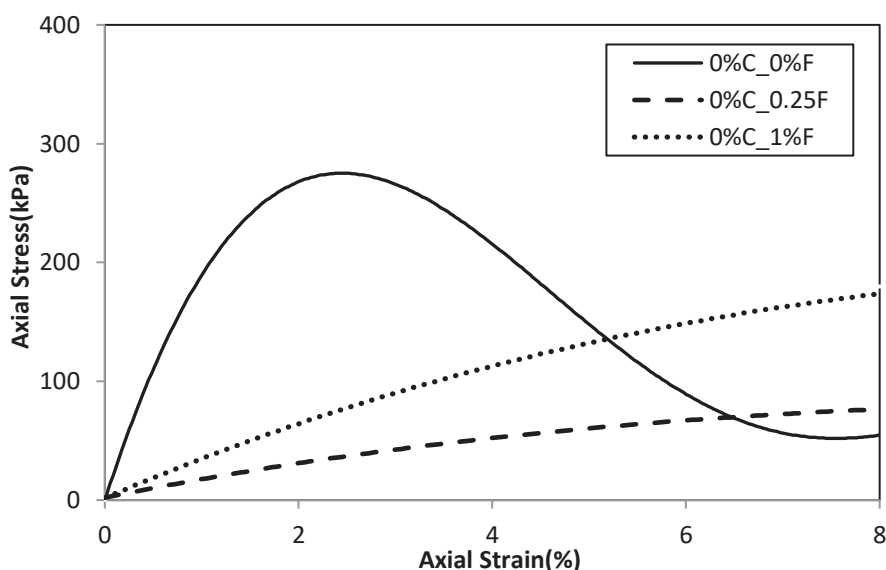
شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های مسلح شده با مقادیر وزنی مختلف الیاف و تثبیت شده با: (الف) ۰٪ سیمان، (ب) ۴٪ سیمان، (ج) ۸٪ سیمان، (د) ۱۲٪ سیمان.

Fig. 4. Results of standard compaction tests on samples reinforced with different weight values of fibers and stabilized with: (a) 0% cement. (B) 4% cement. (C) 8% cement. (D) 12% cement.

جدول ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد کلیه نمونه‌ها

Table 4. Standard compaction test results of all samples

$\gamma_{d \max} (\text{gr}/\text{cm}^3)$	$\omega_{opt} (\%)$	%F	%C	$\omega_{opt} (\%)$	$\gamma_{d \max} (\text{gr}/\text{cm}^3)$	%F	%C
۱/۶۸	۱۸/۴۴	٪۰		۱/۷۸	۱۸/۱۸	٪۰	
۱/۶۳	۱۹/۶۹	٪۰/۲۵	٪۸	۱/۶۶	۱۹/۶۴	٪۰/۲۵	٪۰
۱/۶۱	۲۲/۳۶	٪۱		۱/۵۹	۲۲/۵	٪۱	
۱/۶۹	۱۵/۸۷	٪۰	۲٪/۱	۱/۷۲	۱۶/۶۶	٪۰	٪۴
۱/۶۵	۱۶/۳۶	٪۰/۲۵		۱/۶۵	۱۷/۲۵	٪۰/۲۵	



شکل ۵. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های تسلیح شده با الیاف

Fig. 5. Stress-strain curves of reference specimens and specimens reinforced with fibers

۴-۲-۱- اثر تسلیح

در شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه مرجع (حاوی ۰٪ الیاف و ۰٪ سیمان) و نمونه‌های حاوی مقادیر وزنی مختلف الیاف ساقه برنج نشان داده شده است. در شکل مذکور مشاهده شده که نمونه‌های حاوی الیاف رفتار انعطاف‌پذیرتری نسبت به نمونه مرجع داشته و در این نمونه‌ها برخلاف نمونه مرجع نقطه عطف وجود نداشته است. نتایج جدول ۵ نشان داده است که با افزایش مقدار وزنی الیاف، کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌ها (کرنش گسیختگی نمونه مورد نظر نسبت به کرنش گسیختگی نمونه مرجع) افزایش یافته که حاکی از تغییر رفتار به حالت انعطاف‌پذیر است. همانطور که واضح است، در بین نمونه‌های حاوی الیاف با افزایش مقدار الیاف به علت اصطکاک جزئی ایجاد شده بین الیاف و خاک، مقاومت فشاری نسبی (مقاومت فشاری نمونه مورد نظر نسبت به مقاومت فشاری نمونه مرجع) کمی بهبود یافته است اما چون چسبندگی خاک و الیاف ناچیز است، مقاومت فشاری نمونه مرجع از نمونه‌های تسلیح شده بیشتر است. به طور کلی نتیجه گرفته شده است که استفاده از الیاف به تنهایی اثر منفی داشته و باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان با استفاده از سیمان به عنوان یک افزودنی در کنار الیاف، چسبندگی مورد نیاز را ایجاد کرد تا مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یابد و همینطور از تجزیه‌پذیری آن جلوگیری شود.

درصد رطوبت بهینه و نیز وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش یافته است، بدین معنی که در محتوای سیمان بالاتر میزان کاهش وزن مخصوص و افزایش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد الیاف کمتر شده است که این موضوع به جهت حضور ذرات ریز سیمان با وزن مخصوص بالا و البته فرآیند هیدراتاسیون سیمان بوده است. نتایج مشابه در مطالعه انجام شده توسط نظری و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان می‌دهد که با افزایش میزان سیمان به نمونه اصلاح نشده، ذرات با توجه به تبادل کاتیونی بزرگ‌تر شده و در مقابل تراکم مقاوم‌تر می‌شوند. در نتیجه وزن مخصوص حداکثر کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به فرآیند هیدراتاسیون، جذب آب افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد [۲].

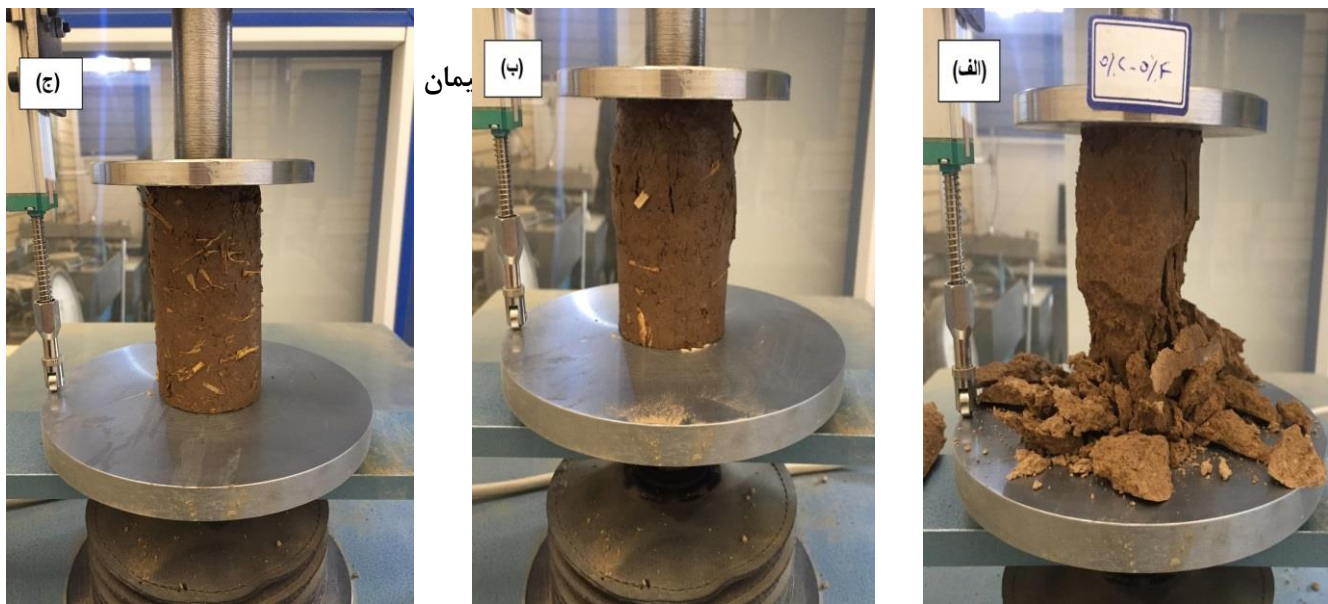
۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

تعداد ۳۰ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده جهت ارزیابی مقاومت فشاری در شرایط مختلف انجام شده است. پارامترهای متغیر آزمایش شامل درصد وزنی الیاف (۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر)، درصد وزنی سیمان (۰٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۰/۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و زمان عمل‌آوری (۰، ۷ و ۲۸ روز) می‌باشد. نتایج اثر تسلیح با الیاف، تثبیت با سیمان و زمان عمل‌آوری در ادامه آورده شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی الیاف

Table 5. Results of unconfined compressive strength test of fiber-containing samples

مشخصات نمونه	مقاومت فشاری نسبی	کرنش گسیختگی نسبی
0%C_0%F	۱	۱
0%C_0.25%F	۰/۳۳	۳/۲
0%C_1%F	۰/۶۳	۳/۲



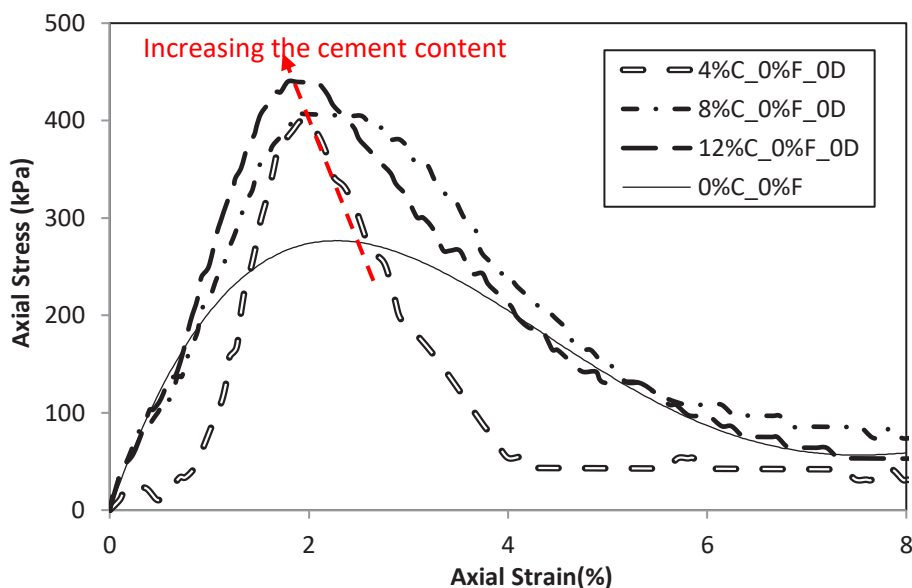
شکل ۶. نحوه گسیختگی نمونه‌های تسلیح شده (الف) نمونه مرجع. (ب) نمونه حاوی ۰/۲۵٪ الیاف. (ج) نمونه حاوی ۱٪ الیاف.

6. Failure of reinforced samples (a) Reference samples. (B) Sample containing 0.25% of fibers. (C) Sample containing 1% of fibers.

سیمان آورده شده است. در نمودار تنش-کرنش این نمونه‌ها نقطه عطف وجود داشته که نشان دهنده رفتار شکننده نمونه‌ها است. نتایج جدول ۶ نشان داده است که در نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت شده با سیمان، با افزایش مقدار وزنی سیمان به علت افزایش واکنش هیدراتاسیون، مقاومت فشاری ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. همچنین دیده شده است که در نمونه‌های سیمانی مذکور با افزایش مقدار سیمان، کرنش گسیختگی ۲۹٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است که به علت ترد شدگی بیشتر نمونه‌ها به دلیل حضور سیمان است.

در شکل ۶ نحوه گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های مسلح شده با مقادیر وزنی مختلف الیاف آورده شده است. تمامی نمونه‌ها در کرنش یکسان ارزیابی شده‌اند و نشان دهنده اثر تسلیح و تغییر رفتار به حالت انعطاف‌پذیر با افزایش درصد وزنی الیاف می‌باشد.

جهت بررسی اثر افزودنی سیمان ۱۰ آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه‌هایی با مقادیر وزنی مختلف سیمان (۰٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۱/۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت (۰، ۷ و ۲۸ روز) انجام شده که نتایج آن در ادامه آمده است. در شکل ۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت شده با مقادیر وزنی مختلف



شکل ۷. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت شده با مقادیر وزنی مختلف سیمان.

Fig. 7. Stress-strain curves of the reference sample and uncured samples stabilized with different weight values of cement.

جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی سیمان

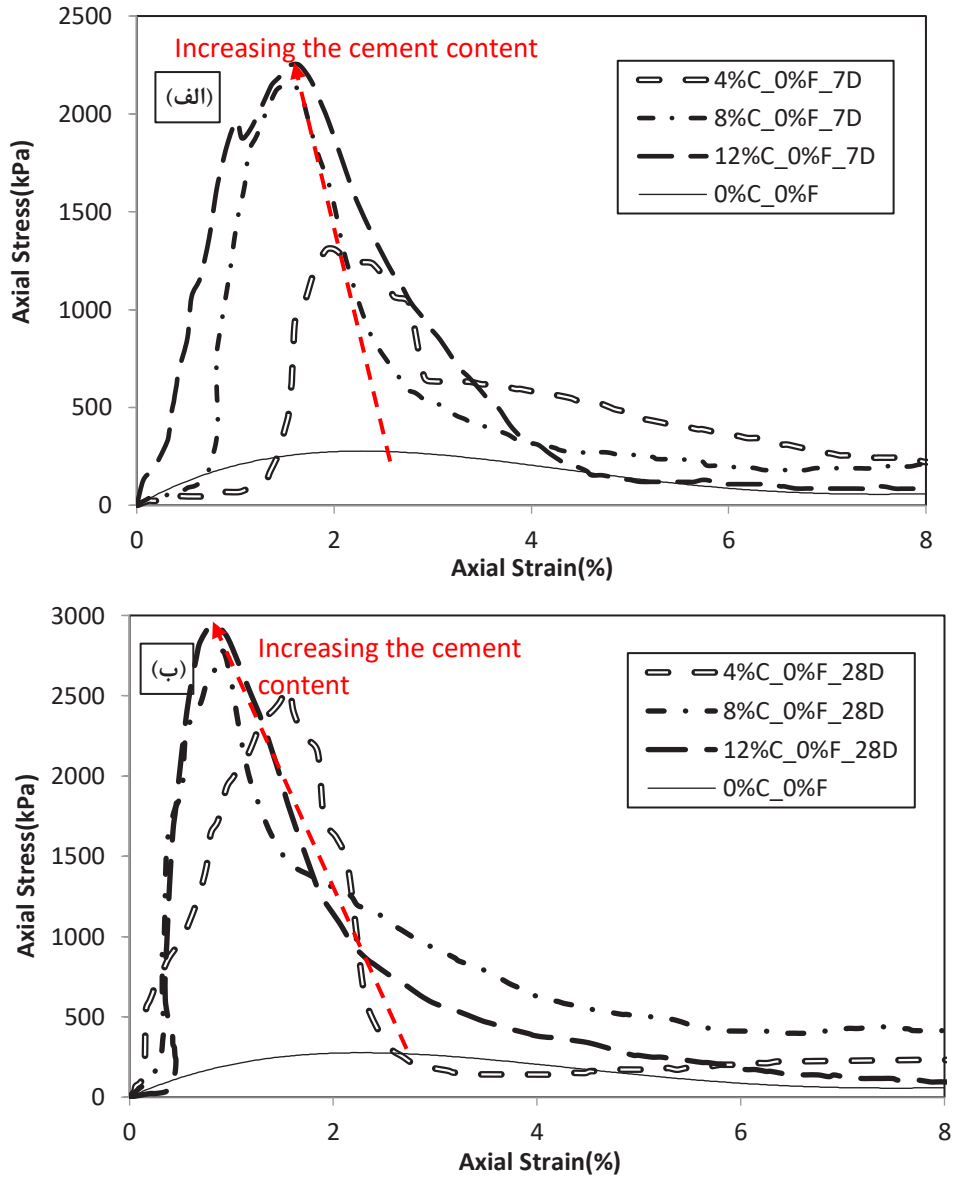
Table 6. Results of unconfined compressive strength test for uncured samples containing cement

مشخصات نمونه	مقاومت فشاری نسبی	کرنش گسیختگی نسبی
0%C_0%F	۱	۱
4%C_0%F_OD	۱/۴۵۳	۰/۷۶
8%C_0%F_OD	۱/۴۸۰	۰/۷۴
12%C_0%F_OD	۱/۶۰۰	۰/۷۱

۴-۲-۲- نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف ۸ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های عمل‌آوری نشده و تثبیت شده با مقادیر وزنی مختلف سیمان (۰/۴٪، ۰/۸٪، ۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و مسلح شده با مقادیر وزنی مختلف الیاف (۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) انجام شده است. در شکل ۹ و جدول ۸ تغییرات مقاومت فشاری نسبی و کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر وزنی مختلف سیمان و الیاف نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۹-الف مشخص است در یک مقدار ثابت الیاف، افزایش مقدار سیمان سبب افزایش

در شکل ۸ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه تثبیت شده با مقادیر وزنی مختلف سیمان نشان داده شده است. رفتار این نمونه‌ها همچون نمونه‌های عمل‌آوری نشده ترد و شکننده بوده و نقطه پیک گسیختگی در منحنی‌های تنش-کرنش آن‌ها واضح است.

نتایج جدول ۷ نشان داده است که با افزایش مقدار وزنی سیمان، به علت افزایش فرآیند هیدراتاسیون، مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب ۷۱۸٪ و ۹۷۰٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش و کرنش گسیختگی به علت ترد شدن نمونه‌ها، به ترتیب ۳۹٪ و ۶۷٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت است.



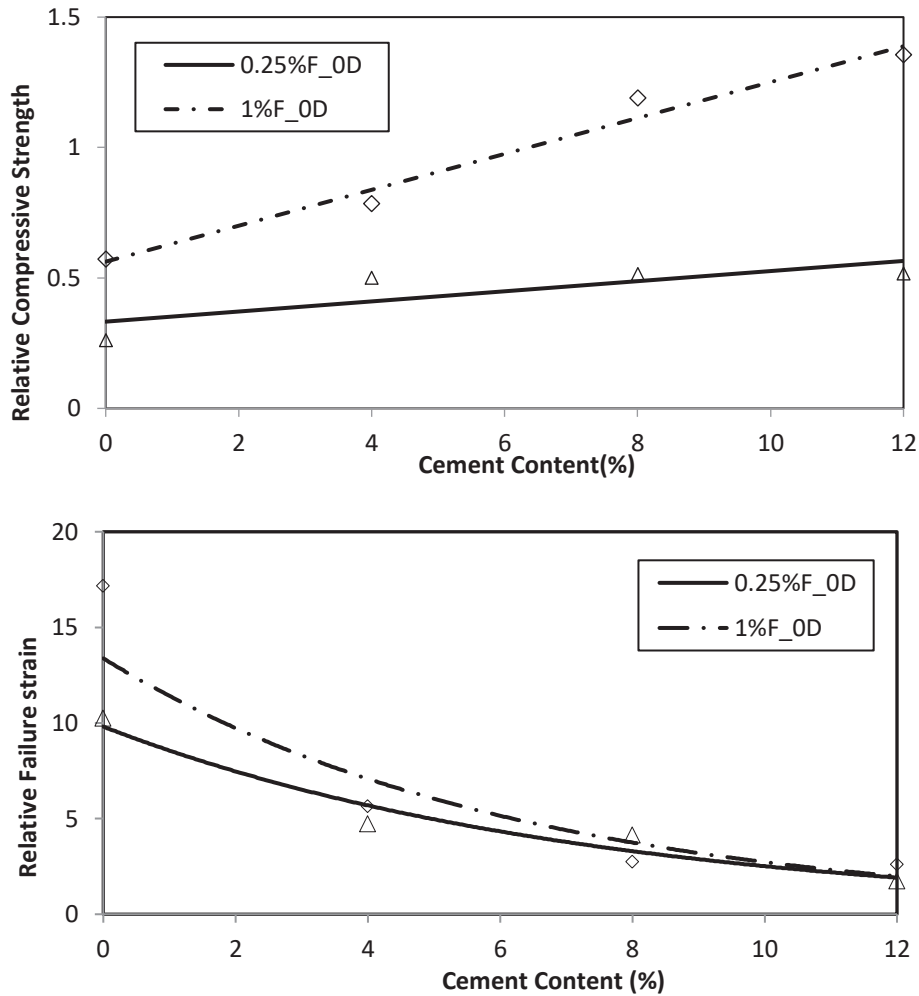
شکل ۸. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر وزنی مختلف سیمان. (الف) ۷ روزه. (ب) ۲۸ روزه.

Fig.8. Stress-strain curves of stabilized samples with different weight values of cement. (A) 7 days. (B) 28 days.

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه حاوی سیمان

Table 7. Results of unconfined compressive strength test of 7 and 28 days samples containing cement

کرنش گسیختگی نسبی	مقاومت فشاری نسبی	مشخصات نمونه	کرنش گسیختگی نسبی	مقاومت فشاری نسبی	مشخصات نمونه
۱	۱	0%C_0%F	۱	۱	0%C_0%F
۰/۱۶۲۶	۹/۲۶۸	4%C_0%F_28D	۰/۱۷۶۶	۴/۷۳	4%C_0%F_7D
۰/۳۶۶	۱۰/۱۰۲	8%C_0%F_28D	۰/۱۶۲۰	۷/۸۳	8%C_0%F_7D
۰/۳۲۶	۱۰/۷۰۸	12%C_0%F_28D	۰/۱۶۱۲	۸/۱۸	12%C_0%F_7D



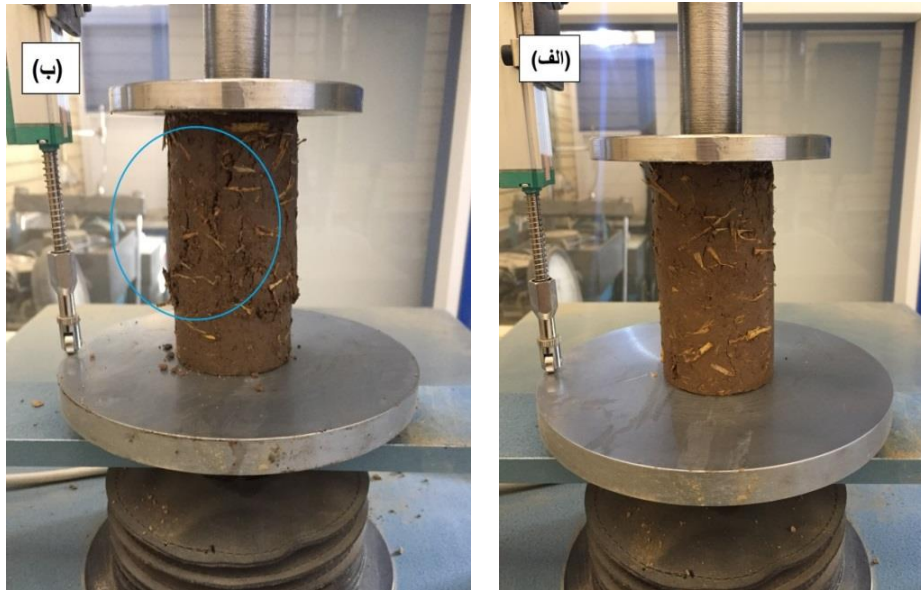
شکل ۹. تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر مختلف وزنی الیاف و سیمان. (الف) تغییرات مقاومت فشاری نسبی برحسب مقدار سیمان. (ب) تغییرات کرنش گسیختگی نسبی برحسب مقدار سیمان.

Fig. 9. Changes in the mechanical behavior of uncured samples containing different weight values of fibers and cement. (A) Changes in relative compressive strength with respect to the amount of cement. (B) Strain changes of relative failure in terms of cement content

جدول ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر مختلف وزنی الیاف و سیمان

Table 8. Results of unconfined compressive strength test of uncured samples containing different weight values of fibers and cement

1%F			0.25%F		
کرنش گسیختگی نسبی	مقاومت فشاری نسبی	درصد سیمان	کرنش گسیختگی نسبی	مقاومت فشاری نسبی	درصد سیمان
۷/۸۴۴	۰/۵۷۲	۰	۴/۶۸۴	۰/۲۶۲	۰
۲/۵۸۴	۰/۷۸۴	۴	۲/۱۶۶	۰/۵۰۱	۴
۱/۲۶۴	۱/۱۸۹	۸	۱/۸۹۲	۰/۵۱۴	۸
۱/۱۹۴	۱/۳۵۴	۱۲	۰/۷۹۶	۰/۵۱۶	۱۲



شکل ۱۰. گسیختگی نمونه عمل‌آوری نشده حاوی ۱٪ الیاف و (الف) ۰٪ سیمان. (ب) ۸٪ سیمان.

Fig.10. Failure of the uncured sample containing 1% fibers and (a) 0% cement. (B) 8% cement.

بهبود یافته است. همچنین منحنی‌های شکل ۱۱-ب نمایانگر آن است که به طور کلی در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف، گذشت زمان عمل‌آوری سبب کاهش کرنش گسیختگی نسبی شده است.

در شکل ۱۲ نحوه گسیختگی نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف و ۱۲٪ سیمان با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در کرنش محوری یکسان نشان داده شده است. نتایج نشان داده است که نمونه‌های حاوی الیاف و سیمان رفتار ترد و شکننده‌ای داشته‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

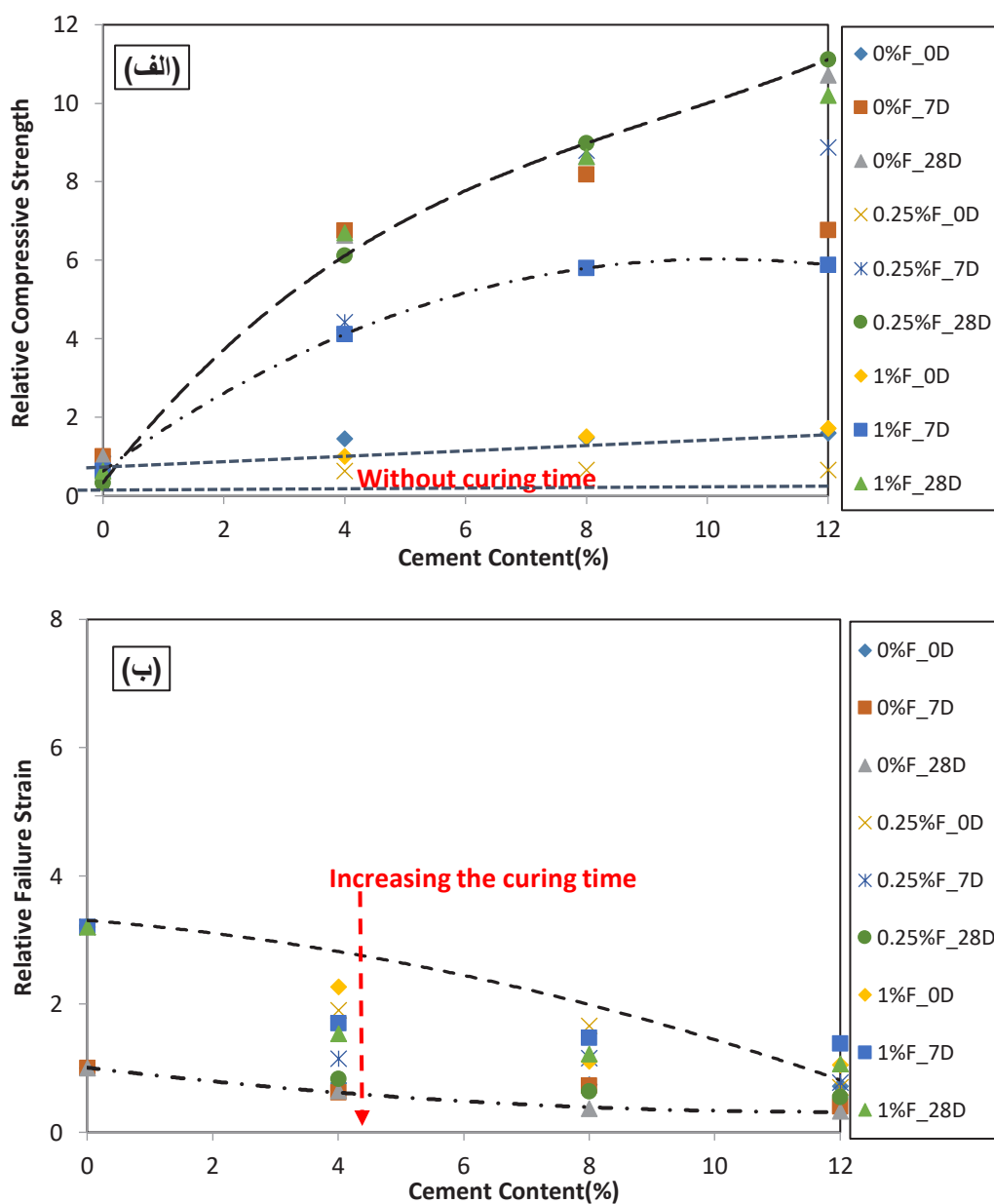
تحقیق حاضر به منظور بهسازی خاک‌های رسی انجام گرفته است. خاک‌های رسی به دلیل جذب آب بالا از جمله خاک‌هایی هستند که اصلاح و بهسازی آن‌ها حائز اهمیت است. استفاده مجدد از پسماندهای کشاورزی از یک طرف موجب کاهش آلودگی‌های محیط زیستی شده و از طرف دیگر استفاده از آن‌ها جهت بهسازی، سبب بهبود رفتار مکانیکی خاک می‌شود. تحقیقات نشان داده است که می‌توان به کمک مواد شیمیایی مانند سیمان از تجزیه‌پذیری این الیاف‌ها در دراز مدت جلوگیری کرد. در این تحقیق از الیاف ساقه برنج و سیمان جهت بهسازی خاک رسی و ارزیابی مقاومت فشاری استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

مقاومت فشاری نسبی و به طور مشابه در مقدار سیمان ثابت، افزایش مقدار الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری نسبی شده است. همچنین در شکل ۹-ب دیده می‌شود که در یک مقدار یکسان الیاف، افزایش سیمان باعث شکننده‌تر شدن نمونه شده، در نتیجه نمونه در کرنش‌های محوری کمتری گسیخته شده است.

در شکل ۱۰ گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت شده با مقادیر مختلف وزنی سیمان و مسلح شده با ۱٪ الیاف نشان داده شده است که همگی در کرنش محوری ثابت ثبت شده‌اند. همانطور که از تصاویر مشخص است نمونه مسلح شده با ۱٪ الیاف رفتار انعطاف‌پذیر داشته و با افزایش مقدار سیمان رفتار نمونه‌ها به رفتار ترد و شکننده نزدیک شده است.

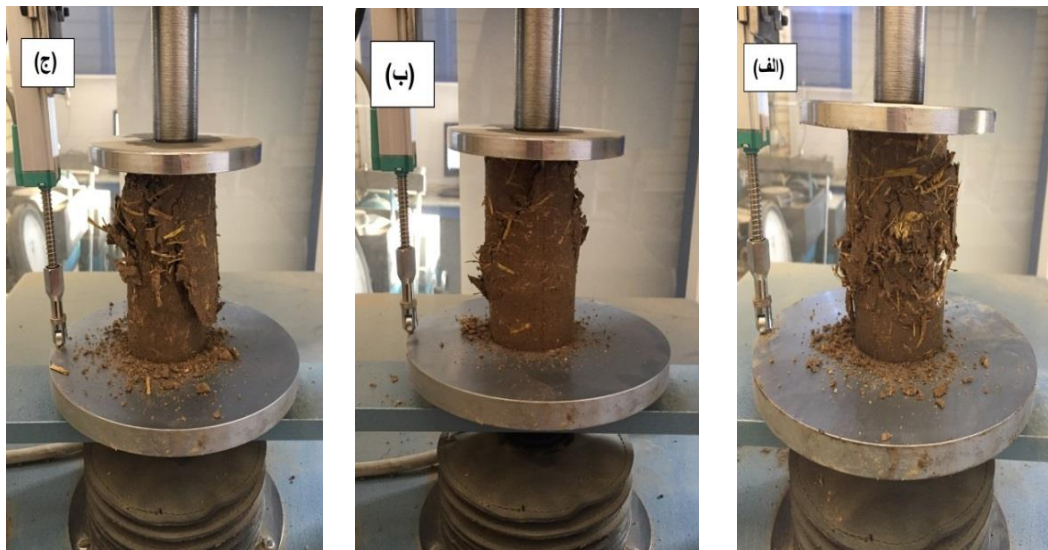
۴-۲-۳ اثر افزایش زمان عمل‌آوری

در شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری نسبی و کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌های حاوی مقادیر وزنی مختلف الیاف (۰٪، ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و سیمان (۰٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪ و ۰/۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار سیمان رسم شده است. با توجه به شکل ۱۱-الف واضح است که در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف با گذشت زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری نسبی



شکل ۱۱. تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف وزنی الیاف و سیمان با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت. (الف) تغییرات مقاومت فشاری نسبی برحسب مقدار سیمان. (ب) تغییرات کرنش گسیختگی نسبی برحسب مقدار سیمان

Fig. 11. Changes in the mechanical behavior of samples containing different weight values of fibers and cement with different curing times. (A) Changes in relative compressive strength with respect to the amount of cement. (B) Strain changes of relative failure in terms of cement content.



شکل ۱۲. نحوه گسیختگی نمونه‌های حاوی ۱۲٪ سیمان و ۱٪ الیاف. (الف) نمونه عمل‌آوری نشده. (ب) نمونه ۷ روزه. (ج) نمونه ۲۸ روزه

Fig. 12. Failure of samples containing 12% cement and 1% fibers. (A) uncured sample. (B) 7-days sample. (C) 28-days sample

سیمانی افزایش و کرنش گسیختگی نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است.

۴-مقایسه کرنش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی سیمان با نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی سیمان و الیاف نشان داده است که به طور کلی کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی سیمان به علت رفتار تردتر کمتر از نمونه‌های حاوی الیاف و سیمان بوده است.

۵-نمونه‌های عمل‌آوری نشده مسلح شده با الیاف رفتار انعطاف‌پذیر داشته و با افزایش مقدار سیمان این رفتار به رفتار شکننده نزدیک‌تر شده است.

۶-نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نشان داده است که در مقدار ثابت سیمان و الیاف، افزایش زمان عمل‌آوری سبب شده است که رفتار نمونه‌ها از حالت انعطاف‌پذیر به حالت شکننده نزدیک شود. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری و ثابت بودن مقدار سیمان و الیاف مقاومت فشاری نسبی افزایش و کرنش گسیختگی نسبی کاهش یافته است.

با توجه به نتایج، استفاده از این الیاف برای بهسازی خاک توصیه نمی‌شود.

۱-نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد که با افزایش مقدار الیاف در محتوی سیمان یکسان، نمودار تراکم به سمت راست و پایین حرکت کرده است که نشان دهنده کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه است.

۲-نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های مسلح شده با الیاف بیانگر آن است که نمونه‌های حاوی الیاف رفتار انعطاف‌پذیری داشته و با افزایش مقدار الیاف از ۰/۲۵٪ تا ۱٪ مقاومت فشاری کمی بهبود یافته است. اما چون چسبندگی بین خاک و الیاف کم است، مقاومت فشاری نمونه مرجع بیشتر بوده است. بنابراین به طور کلی نتیجه گرفته شده است که مقاومت فشاری کاهش یافته و استفاده از الیاف اثر عکس داشته است. همچنین به علت مکانیزم رفتاری الیاف که از گسیختگی زود هنگام جلوگیری می‌کند، افزایش الیاف سبب رفتار انعطاف‌پذیر شده و کرنش گسیختگی افزایش یافته است.

۳-نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نشان داده است که در نمودار تنش-کرنش این نمونه‌ها نقطه عطف وجود داشته که نشان دهنده رفتار ترد و شکننده است. همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪ مقاومت فشاری نمونه‌های

939-950.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

سیمان	C
رس با پلاستیسیته کم	CL
مدت زمان عمل‌آوری	D
الیاف ساقه برنج	F
چگالی ویژه	G_s
نشانه خمیری	PI
حد خمیری	PL

علائم یونانی

وزن مخصوص خشک حداکثر	γ_{dmax}
درصد رطوبت	ω
درصد رطوبت بهینه	ω_{opt}

منابع

- [6] M.S. Pakbaz, R. Alipour, Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay, *Applied Clay Science*, 67 (2012) 1-4.
- [7] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100748.
- [8] H.A. Chenarboni, S.H. Lajevardi, H. MolaAbasi, E. Zeighami, The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils, *Construction and Building Materials*, 272 (2021) 121630.
- [9] K.S. Wani, B. Mir, A comparative laboratory scale study on the effect of waste boulder crusher dust and cement in stabilising marginal sediments, *Geomechanics and Geoengineering*, (2020) 1-12.
- [10] M. Ayeldeen, M. Kitazume, Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6) (2017) 592-602.
- [11] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, Study on strength behavior of cement stabilized sludge reinforced with waste cornsilk fiber, *GEOMATE Journal*, 13(39) (2017) 140-147.
- [12] P. Donkor, E. Obonyo, Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers, *Materials & Design*, 83 (2015) 813-819.
- [13] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *Journal of materials science*, 51(14) (2016) 6517-6551.
- [14] M.A. Dafalla, A.A.B. Moghal, A.K. Al-Obaid, Enhancing tensile strength in clays using polypropylene fibers, *GEOMATE Journal*, 12(29) (2017) 33-37.
- [15] A.P. Balkis, The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 556-562.
- [16] S. Bojnourdi, S.S. Narani, M. Abbaspour, T. Ebadi, [1] H.M. 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) 1-13.
- [2] N.C. Consoli, M.A. Vendruscolo, A. Fonini, F. Dalla Rosa, Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3) (2009) 196-203.
- [3] M. Ayeldeen, A. Negm, M. El-Sawwaf, M. Kitazume, Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2) (2017) 329-339.
- [4] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, Study on Effect of Cornsilk Fiber in Cemented Soil Stabilization, in: *Congrès International de Géotechnique-Ouvrages-Structures*, Springer, 2017, pp. 571-579.
- [5] 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, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(3) (2020)

- [23] D. ASTM, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, ASTM D698, (2012).
- [24] A. Standard, Test method for particle-size analysis of soils, ASTM international, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D4513, 11 (2007).
- [25] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM international, 2006.
- [26] A. Standard, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, D2216-10). ASTM International, West Conshohocken, PA. doi, 10 (2010).
- [27] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international, 2010.
- [28] S.D. Petroudy, Physical and mechanical properties of natural fibers, in: Advanced high strength natural fibre composites in construction, Elsevier, 2017, pp. 59-83.
- [29] D. Astm, 2166. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, Annual Book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2006).
- [30] Z. Nazari, A. Tabarsa, N. Latifi, Effect of compaction delay on the strength and consolidation properties of cement-stabilized subgrade soil, Transportation Geotechnics, 27 (2021) 100495.
- S.M.M. Hosseini, Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures, Engineering Geology, 279 (2020) 105886.
- [17] K. Salimi, M. Ghazavi, Soil reinforcement and slope stabilisation using recycled waste plastic sheets, Geomechanics and Geoengineering, 16(6) (2021) 497-508.
- [18] P. Zak, T. Ashour, A. Korjenic, S. Korjenic, W. Wu, The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials, Construction and Building Materials, 106 (2016) 179-188.
- [19] 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.
- [20] A. Diambra, E. Ibraim, D.M. Wood, A. Russell, Fibre reinforced sands: experiments and modelling, Geotextiles and geomembranes, 28(3) (2010) 238-250.
- [21] A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications, Journal of Materials Science, 55(3) (2020) 829-892.
- [22] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Keramati, F. Sabbaqzade, A. Ramesh, Investigation of the Effect of Natural Rice Straw Fibers on the Mechanical Behavior of Clayey Soils Stabilized with Cement, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 3067-3082.

DOI: 10.22060/ceej.2022.19397.7158

