

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،

* (ایمیل نویسنده مسئول) keramati@sharoodut.ac.ir

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

چکیده

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٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱٪)، 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 R^2 حدوداً ۰.۸۸ نیز کارایی مدل های روش سطح پاسخ (RSM) را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: الیاف ساقه برنج، هوازدگی، پوسیدگی، سیمان، روش سطح پاسخ

خاک ماده‌ای 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 می‌دهد، به‌ویژه در شرایط بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد. علاوه بر این، حد پلاستیک، رفتار غیرخطی همراه با سختی وابسته به تنش دارد. درک این پیچیدگی‌ها و شناخت رفتار خاک برای تحلیل‌های ژئوتکنیکی و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی اهمیت دارد [1]. خاک‌های رسی به دلیل زاویه اصطکاک پایین و مقاومت برشی محدود، اغلب مشکلاتی مانند نشست بیش از حد، ظرفیت باربری کم و چالش‌های مرتبط دیگر را ایجاد می‌کنند. روش‌های مختلفی برای بهبود خاک‌های رسی وجود دارد که شامل تراکم خاک با استفاده از غلظت‌ها یا سایر تکنیک‌ها می‌شود. روش‌های مکانیکی و مواد شیمیایی متعددی برای بهبود رفتار خاک در دسترس است، اما انتخاب روش مناسب با توجه به عوامل مختلف مانند جنبه‌های اقتصادی و ساخت‌وساز، ملاحظات زیست‌محیطی و غیره چالش برانگیزتر است [2,3].

با پذیرش گسترده ایده توسعه پایدار در قرن حاضر، در دهه‌های اخیر مواد متنوعی برای بهبود خاک به جای مواد سنتی مانند بتن و آهک استفاده شده‌اند [4]. الیاف مصنوعی به دلیل عملکرد بالا در بتن سازه‌ای و تقویت خاک، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. [5,6] علاوه بر این، برخی پژوهشگران استفاده از الیاف طبیعی را به جای مواد مصنوعی برای تأکید بر ژئوتکنیک پایدار تأیید کرده‌اند [7, 8]. از جمله مهم‌ترین الیاف طبیعی که تاکنون استفاده شده‌اند می‌توان به الیاف نارگیل، سبزال، نخل، جوت، کتان، کاه، بامبو و زنجیر اشاره کرد. تأثیر این الیاف بر تثبیت خاک به ویژگی‌هایی مانند نسبت ابعادی، اصطکاک سطحی، درصد وزنی و مدول الاستیسیته الیاف بستگی دارد. [9] تولید سالانه انبوه الیاف ساقه برنج و ضایعات آن در اراضی کشاورزی که توسط کشاورزان سوزانده می‌شود، می‌تواند باعث آلودگی زیست‌محیطی شود و در صورت تداوم در سال‌های آینده، ماده آلی خاک را کاهش دهد. از این رو، کاه برنج به عنوان یک فیبر طبیعی سازگار با محیط زیست در این تحلیل استفاده شد. [10] 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. [11]

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 [12]. 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 [13]. استفاده از ضایعات کشاورزی در سال‌های اخیر برای کاهش ضایعات و انتشار کربن به یک موضوع داغ تبدیل شده است. بخش ضایعات به عنوان یکی از منابع اصلی گرمایش جهانی از نظر گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است [14]. 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 [15]. 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 [16,17].

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 به عنوان عنصر حیاتی الیاف گیاهی در نظر گرفته می‌شود و ترکیب شیمیایی این الیاف به سلولز، همی سلولز و لیگنین وابسته است. سلولز به صورت مارپیچی تنظیم شده و دیواره سلولی را تقویت می‌کند [18,19]. 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، مسئله مطرح‌شده در اینجا زیست‌تخریب‌پذیری و پوسیدگی الیاف به دلیل عوامل محیطی است که ممکن است بر خاک تأثیر بگذارد. بنابراین، بررسی اثرات پوسیدگی و هوازدهی و شبیه‌سازی 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 روش‌های عددی و محاسباتی نظیر روش‌های مبتنی بر پایتون، متلب و... به منظور پیش‌بینی داده‌ها می‌تواند یک گام موثر در کاهش هزینه‌ها و صرفه جویی در نظر گرفته شود که پیشتر در کاربردهای مهندسی عمران اعمال شده است [20-22]. در همین راستا روش سطح پاسخ به منظور ایجاد نمودارهای تشخیصی و پیش‌بینی داده‌ها استفاده گردید [23,24].

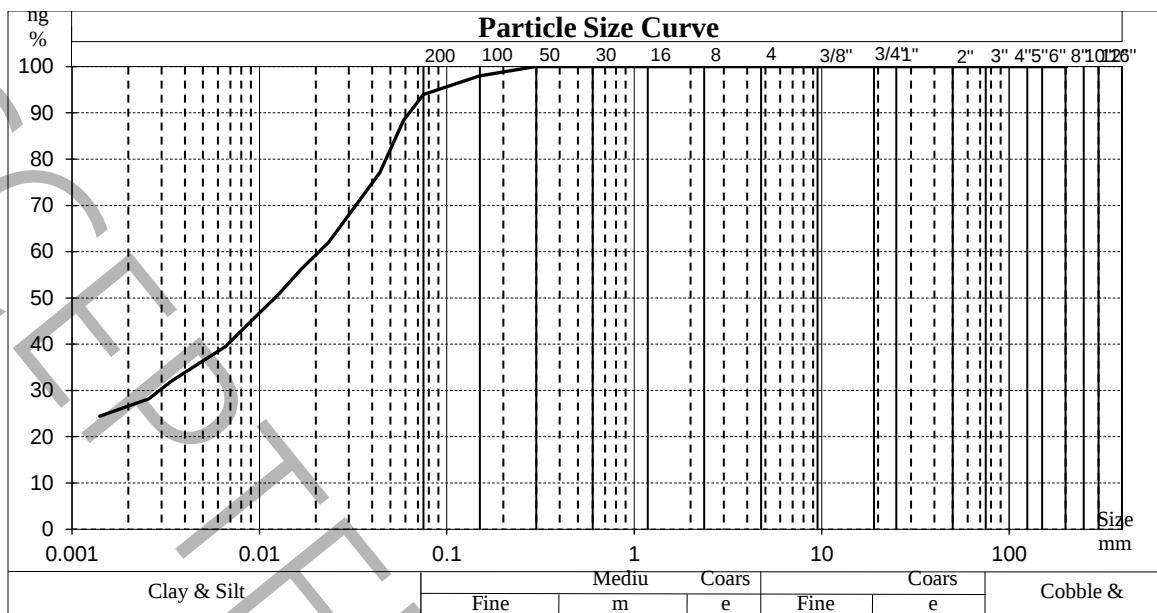
آزمایش‌های مربوط به بررسی اثرات هوازدهی شامل سیکل ذوب - یخ و فرآیند خشک کردن است. با توجه به آب‌وهوای نسبتاً خشک محل نمونه‌برداری، در این مطالعه تصمیم گرفته شد از روش سیکل ذوب - یخ برای بررسی تأثیر هوازدهی بر خاک تثبیت‌شده با الیاف ساقه برنج استفاده شود. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D560/D560M-16 انجام شد. پس از بررسی ادبیات فنی توسط نویسندگان، از سیمان و الیاف طبیعی در برنامه آزمایشی استفاده شد و شرایط پوسیدگی و هوازدهی 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 هیدرومتری استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش هیدرومتری 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.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک

Figure1. Soil grain size distribution curve

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک

Table1. Physical properties of the studied soil

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

۲-۲- الیاف ساقه برنج

الیاف ساقه برنج از زمین‌های کشاورزی روستای المشیر واقع در استان مازندران تهیه گردید. وزن مخصوص این الیاف حدود $0.23 \frac{gr}{cm^3}$ و با قطر میانگین 0.2 سانتی‌متر تهیه شده‌اند. با توجه به محدودیت‌های ابعادی قالب نمونه‌سازی تک‌محوری (قطر

داخلی ۴۹/۹ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹/۰۲ میلی‌متر) الیاف‌ها به صورت خشک به طول‌های ۱ سانتی‌متر بریده شده‌اند. در شکل ۲ آماده سازی الیاف جهت نمونه سازی ارائه شده است.



شکل ۲- آماده سازی الیاف جهت نمونه سازی

Figure 2. Preparation of fibers for sample fabrication

۲-۳- سیمان

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

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 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 دوره ی عمل آوری 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 دست نخورده طبق استاندارد ASTM D698، اقدام گردید. مخلوط خاک و الیاف و سیمان با هم ترکیب شده و در ۳ لایه با ۲۵ ضربه 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 بدست آمده است.

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

این آزمایش نوع خاصی از آزمایش UU می‌باشد که بطور معمول برای نمونه‌های رسی و چسبنده 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. آزمایش تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D۲۱۶۶ 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 5 mm/min به نمونه اعمال شد. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که بار به نقطه اوج خود رسیده و سپس کاهش پیدا کند. تغییر طول (ΔL) به کمک سنسور LVDT با کورس ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر محاسبه شده است. همچنین برای اندازه‌گیری 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.

داده‌های خروجی در سیستم، در فضای نرم‌افزار Vira Data Soft مربوط به دیتالاگر پردازش می‌شوند. در این نرم‌افزار برای هر یک 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 می‌شود. در شکل ۳ دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده و متعلقات آن ارائه شده است.



شکل ۳- دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده

Figure3. Unconfined compressive strength (UCS) machine

۳-۴- فرآیند نمونه سازی

۳-۴-۱- نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

ساخت نمونه‌ها 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٪، ۵۰٪، ۱٪) و همچنین با درصد‌های مختلف سیمان (۴٪، ۸٪، ۱۲٪) و تحت عمل آوری ۲۸ روزه بر حسب وزن مخصوص حداکثر خشک و رطوبت بهینه در قالب نمونه‌سازی با ارتفاع ۹۹/۰۲ میلی متر و قطر داخلی ۴۹/۹ میلی متر ساخته شد. بعد از آنکه نمونه‌ها درون قالب متراکم شد، سطح بالا و پایین نمونه صاف و یکدست شد و از قالب نمونه ساز خارج شد. نمونه‌ها برای عمل آوری (صفر، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) درون پلاستیک در دمای محیط قرار داده شد تا رطوبت نمونه‌ها تا اتمام زمان عمل آوری حفظ شود.

نمونه‌های در نظر گرفته شده در این آزمایش دارای عمل آوری صفر، ۷، 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 سانتی گراد 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 سانتی گراد قرار داده تا اثر پوسیدگی الیاف بر مقاومت فشاری خاک بررسی شود. الیاف ساقه برنج در دمای ۲۸۰ درجه سانتی گراد دچار پوسیدگی می‌شوند. برای نزدیک بودن این شبیه سازی به واقعیت، به نمونه‌های ۲۸ روزه پوسیدگی اعمال شده تا اثر پوسیدگی بر مقاومت فشاری خاک بررسی شود.

۲-۴-۳- نمونه های آزمایش سیکل ذوب - یخ

از آنجاییکه الیاف مورد استفاده در این پژوهش در دسته الیاف طبیعی می باشد طبیعی است که تغییرات آب و هوایی ممکن است بر روی خاکی که بوسیله این الیاف تسلیح شده اند تاثیر گذارد. آزمایش های مورد نظر برای بررسی اثر هوازدگی، آزمایش های سیکل ذوب - یخ و تر - خشک است. در 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 - ASTM D560/D560M انجام شده است.

در ابتدا، ترکیب خاک و الیاف با درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ طبق وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در قالب تراکم قرار داده شده و بعد از آماده سازی نمونه، از قالب خارج می شوند. در این تحقیق برای بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر روی نمونه ها صرفاً نمونه های 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 نمونه ها، درون پلاستیک قرار داده شدند. در ابتدا وزن، قطر و ارتفاع نمونه اندازه گیری شده و سپس نمونه ها را بعد از فرآیند عمل آوری در فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت قرار می دهیم. سپس وزن، ارتفاع و قطر نمونه ها مجدداً اندازه گیری می شود. در گام بعد نمونه ها را در دمای محیط که حدوداً ۲۴ درجه سانتی گراد است قرار داده و بعد از ۲۴ ساعت دوباره وزن، ارتفاع و قطر نمونه را اندازه گیری می کنیم. بعد از آن با برس، اطراف نمونه را ۱۸-۲۰ مرتبه و بالا و پایین نمونه را ۲-۴ مرتبه برس می کشیم (سیکل اول). تمامی این مراحل باید طی ۱۲ سیکل تکرار شود و تغییرات ثبت شود. در شکل ۴ فرآیند آماده سازی نمونه های سیکل ذوب - یخ را مشاهده می کنید.



شکل ۴- فرآیند آماده سازی نمونه های سیکل ذوب - یخ

Fig4. Process of preparing freeze-thaw cycle samples

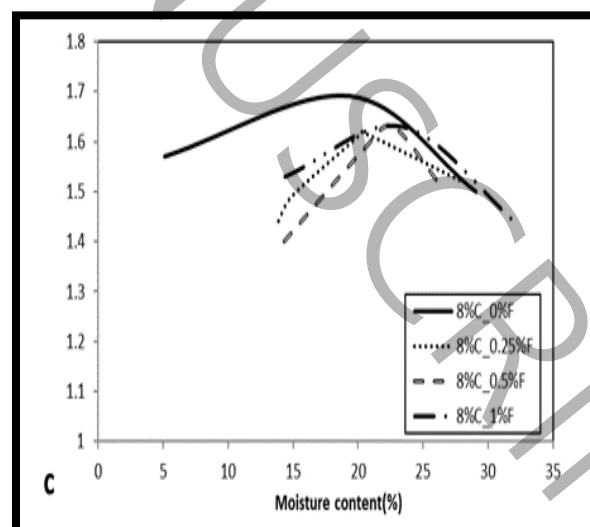
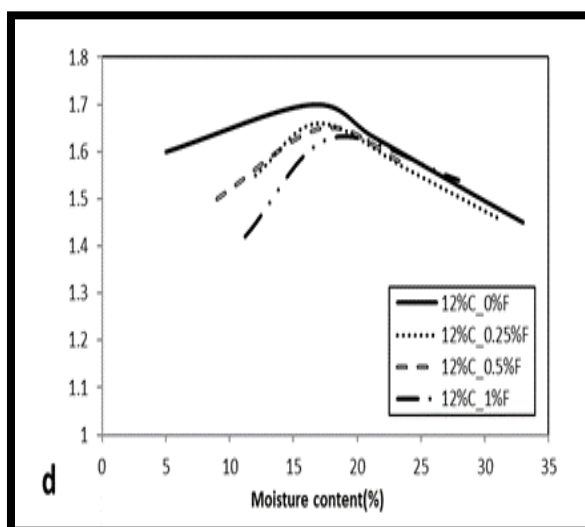
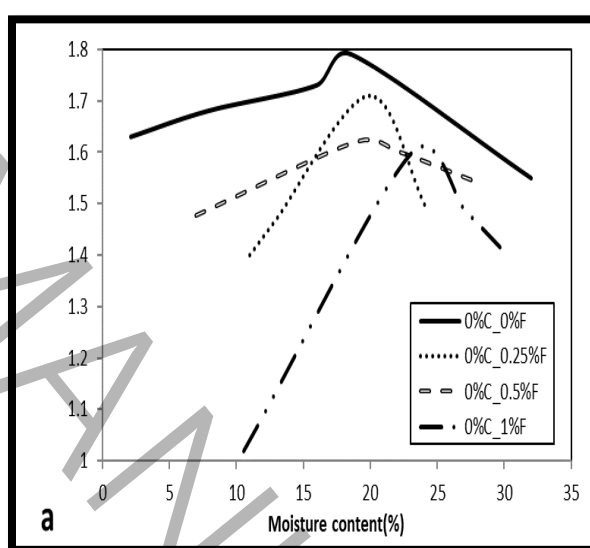
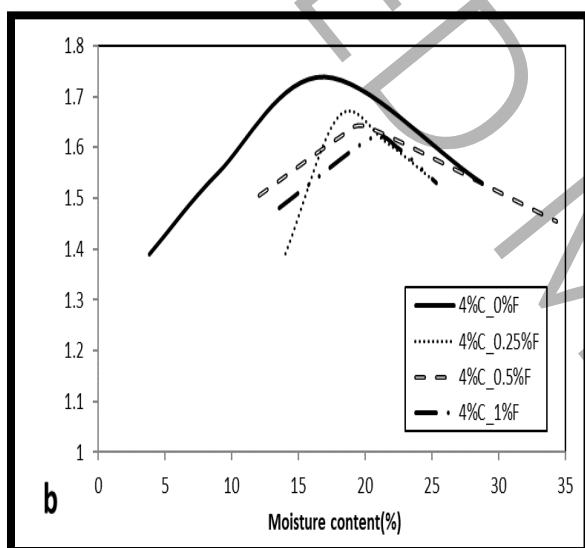
۵-۳- مدل سازی عددی (روش سطح پاسخ)

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 [23-24].

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.



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

Figure5. The results of the standard compaction tests with varying percentages of fibers: (a) 0% cement, (b) 4% cement, (c) 8% cement, (d) 12% cement

جدول ۲- نتایج آزمایش تراکم استاندارد

Table2. Results of standard compaction test

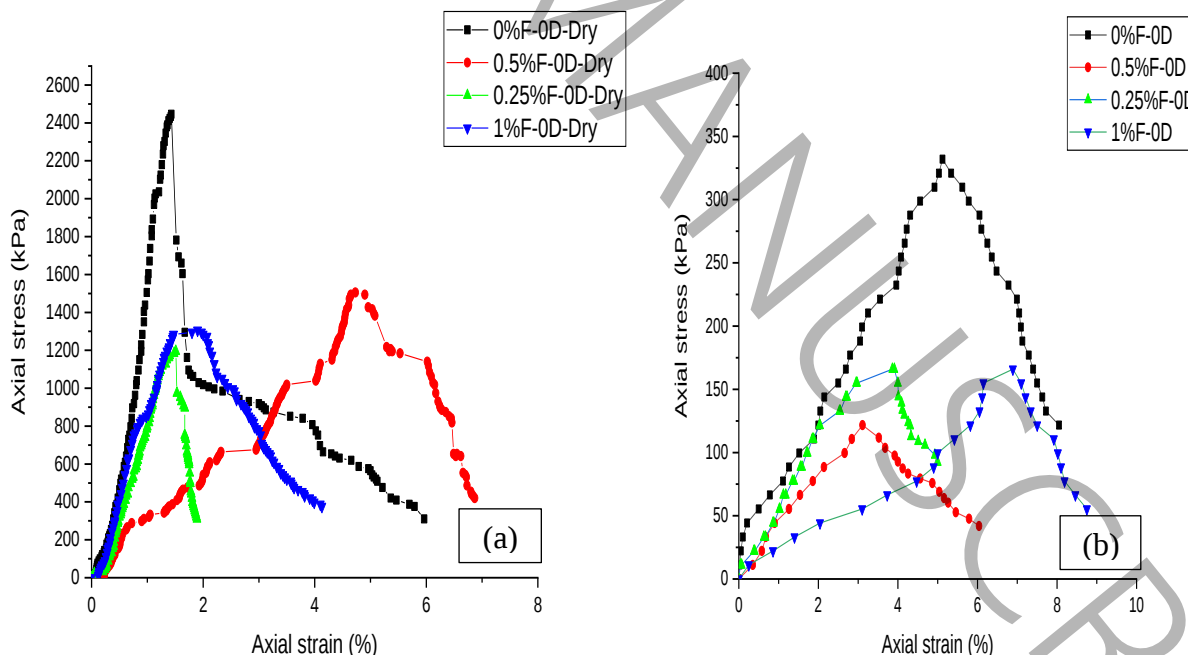
ردیف	علامت اختصاری	درصد وزنی سیمان	درصد وزنی الیاف	$\omega(\%)$	$\gamma_d (gr/cm^3)$
۱	0%C_0%F	۰	۰	۱۸/۵۳	۱/۷۴
۲	0%C_0.25%F	۰	۰/۲۵	۱۹/۹۱	۱/۷۱
۳	0%C_0.5%F	۰	۰/۵	۱۹/۰۲	۱/۶۲
۴	0%C_1%F	۰	۱	۲۳/۱۲	۱/۶
۵	4%C_0%F	۴	۰	۱۶/۹۵	۱/۷۴
۶	4%C_0.25%F	۴	۰/۲۵	۱۸/۰۳	۱/۶۶۱
۷	4%C_0.5%F	۴	۰/۵	۲۰/۱	۱/۶۴
۸	4%C_1%F	۴	۱	۲۰/۴۸	۱/۶۲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

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 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.

۱-۲-۴- اثر الیاف ساقه برنج

تعداد آزمایشات مقاومت فشاری محصور نشده ۶۰ عدد می‌باشد که شامل درصدهای مختلف الیاف (۰٪، ۰.۵٪، ۰.۲۵٪، ۱٪) و سیمان (۰٪، ۰.۵٪، ۰.۲۵٪، 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 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.



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

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

مقاومت فشاری نمونه مرجع ۳۳۱/۹۷۰ کیلو پاسکال و کرنش گسیختگی آن ۵/۱۲٪ می‌باشد. در نمونه‌های صفر روزه طبق شکل ۱۱ با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱٪ الیاف، ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته و کرنش گسیختگی آن ۳۷/۵۷٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش پیدا کرده است. همچنین مقاومت فشاری نمونه خشک شده حاوی ۱٪ الیاف ۲۹۳/۳۳٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته و کرنش گسیختگی آن ۶۹/۸۹٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته است. در جدول ۳ تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف مرطوب و خشک نسبت به نمونه مرجع در روزهای عمل آوری مختلف ارائه شده است.

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

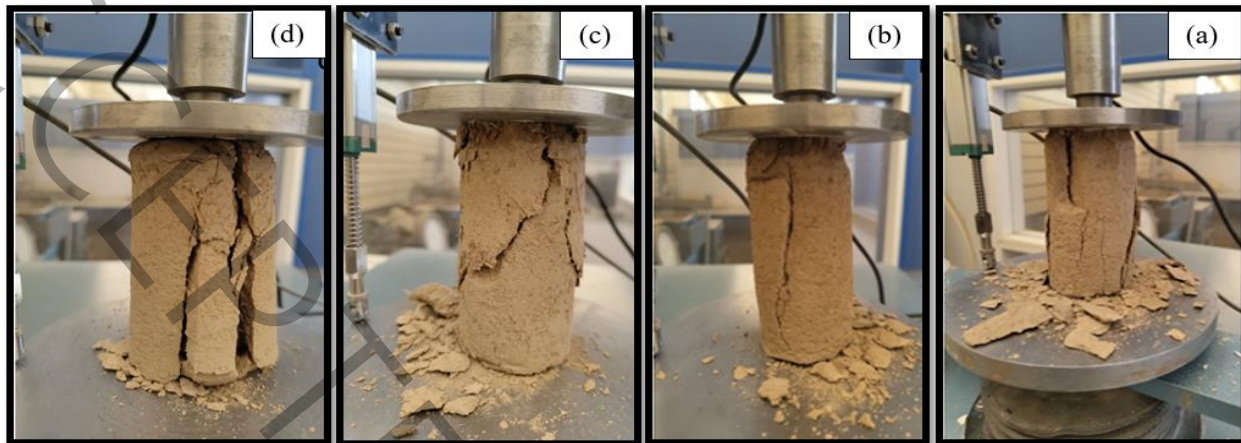
Table 3. Changes in the compressive strength and strain at failure of the samples containing 1% fibers, both wet and dry, compared to the reference sample over different curing days are as follows

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

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.

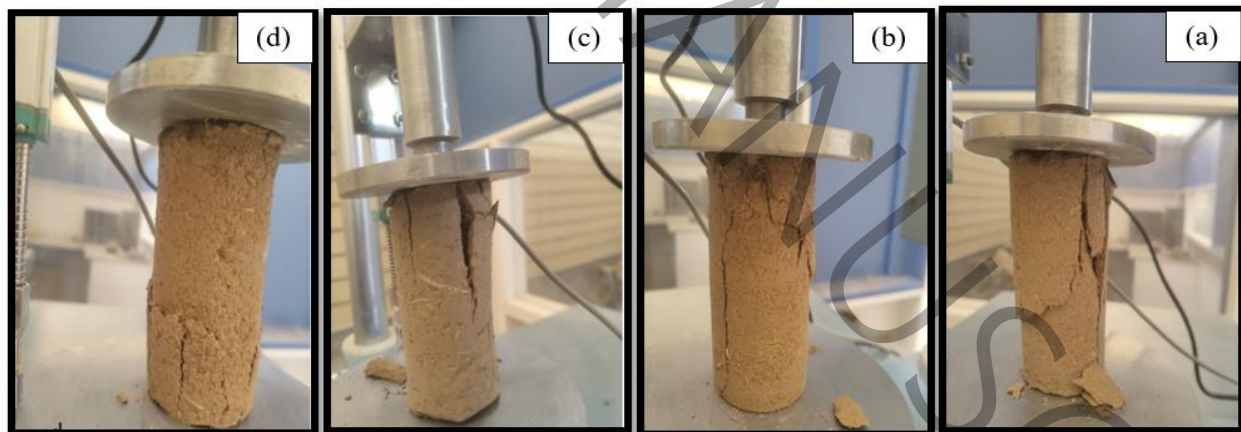
نمونه ۲۸ روزه خشک بیشترین افزایش در مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع را دارد. همانطور که گفتیم درگیری بین الیاف و خاک در نمونه‌های خشک با گذشت زمان در حال کاهش هست و الیاف در این نمونه کمترین نقش را دارد. پیشتر اشاره شد که با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری نمونه‌ها در حال کاهش است. بنابراین باتوجه به 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.

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 ۷- گسیختگی نمونه‌های خشک عمل‌آوری نشده: (a) نمونه ۰٪ الیاف (b) نمونه ۰٫۲۵٪ الیاف (c) نمونه ۰٫۵٪ الیاف (d) نمونه ۱٪ الیاف

Figure7. Failure modes of untreated dry samples: (a) 0% fiber sample, (b) 0.25% fiber sample, (c) 0.5% fiber sample, (d) 1% fiber sample



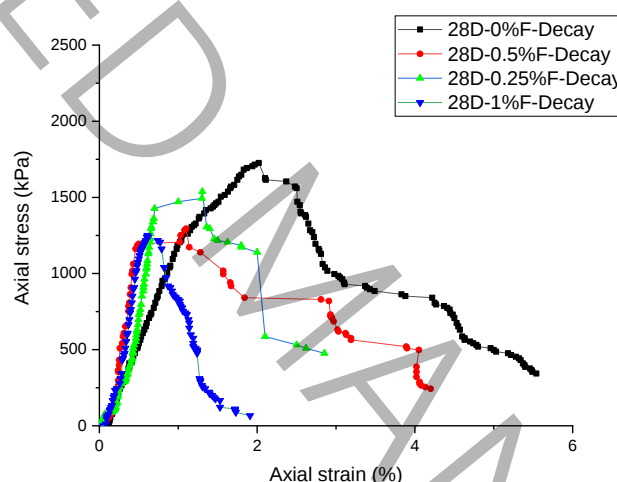
شکل ۸- گسیختگی نمونه‌های مرطوب عمل‌آوری نشده: (a) نمونه مرجع (b) نمونه ۰٫۲۵٪ الیاف (c) نمونه ۰٫۵٪ الیاف (d) نمونه ۱٪ الیاف

Figure8. Failure modes of untreated wet samples: (a) reference 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 گفته شد نمونه‌های پوسیده شامل نمونه‌هایی هستند که در دمای ۲۸ درجه سانتی گراد درون آون 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 ۶۹/۸۰٪ و ۲۸/۳۹٪ 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.



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

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



شکل ۱۰- نمونه پوسیده شده بعد از آزمایش
Figure 10. Decayed sample after test

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

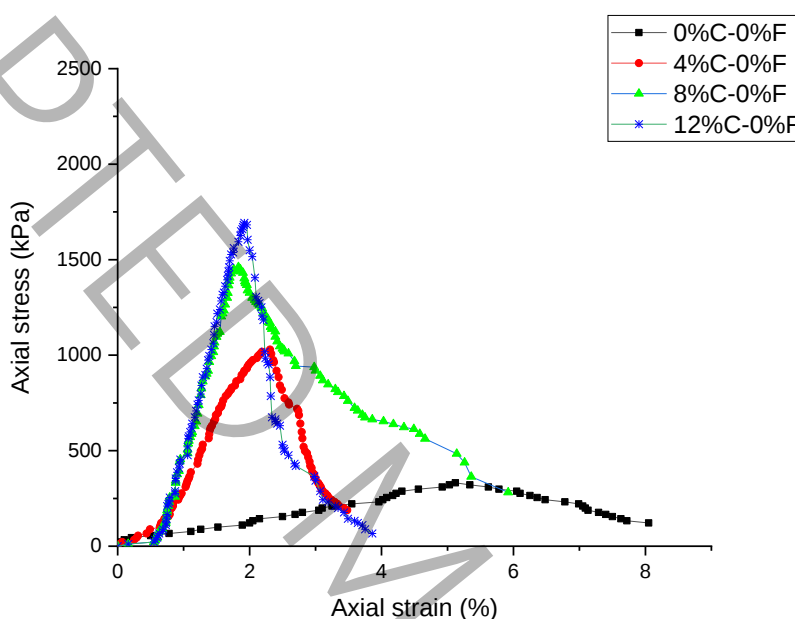
نمونه حاوی ۰٪ الیاف پوسیده مقاومت کمتری نسبت به نمونه حاوی ۰٪ الیاف خشک نشان می‌دهد. این نمونه همچنین کرنش گسیختگی کمتری نسبت به نمونه خشک نشان داده که می‌توان گفت این نتیجه بدلیل دمای بالایی است که نمونه‌های پوسیده در آن قرار گرفتند که ممکن است باعث تغییر بافت خاک شود. میزان کاهش مقاومت فشاری و کرنش 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 آن را 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 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 چشم پوشی کرد.

۱-۲-۴- اثر پوسیدگی بر نمونه‌های تثبیت شده با سیمان

در این بخش به بررسی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ 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.

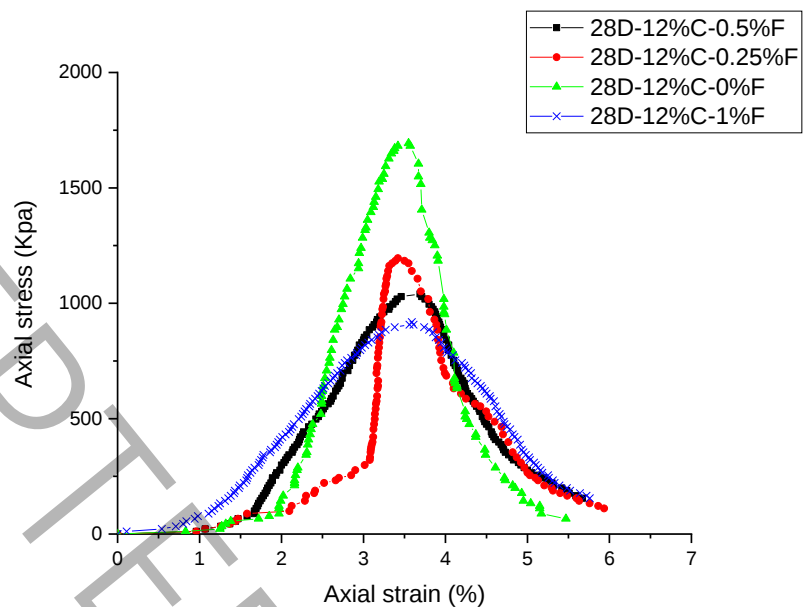
همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید، با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰٪ الیاف در حال افزایش هستند، یعنی اینکه نمونه‌ی حاوی ۱۲٪ سیمان مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۴٪ و ۸٪ سیمان نشان داده که این بدلیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان است. نمونه‌های حاوی سیمان دارای نقطه اوج گسیختگی 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.



شکل ۱۱- نمودار تنش_کرنش نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سیمان و بدون الیاف و نمونه مرجع

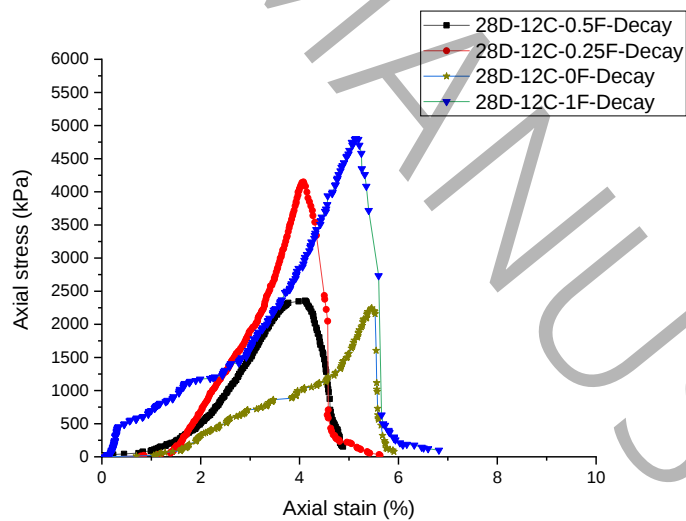
Figure 11. Stress-strain curves for samples containing various percentages of cement without fibers and the reference sample.

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. قبلاً 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 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.



شکل ۱۲- نمودار تنش_کرنش نمونه‌های مرطوب حاوی درصدهای مختلف الیاف و ۱۲٪ سیمان

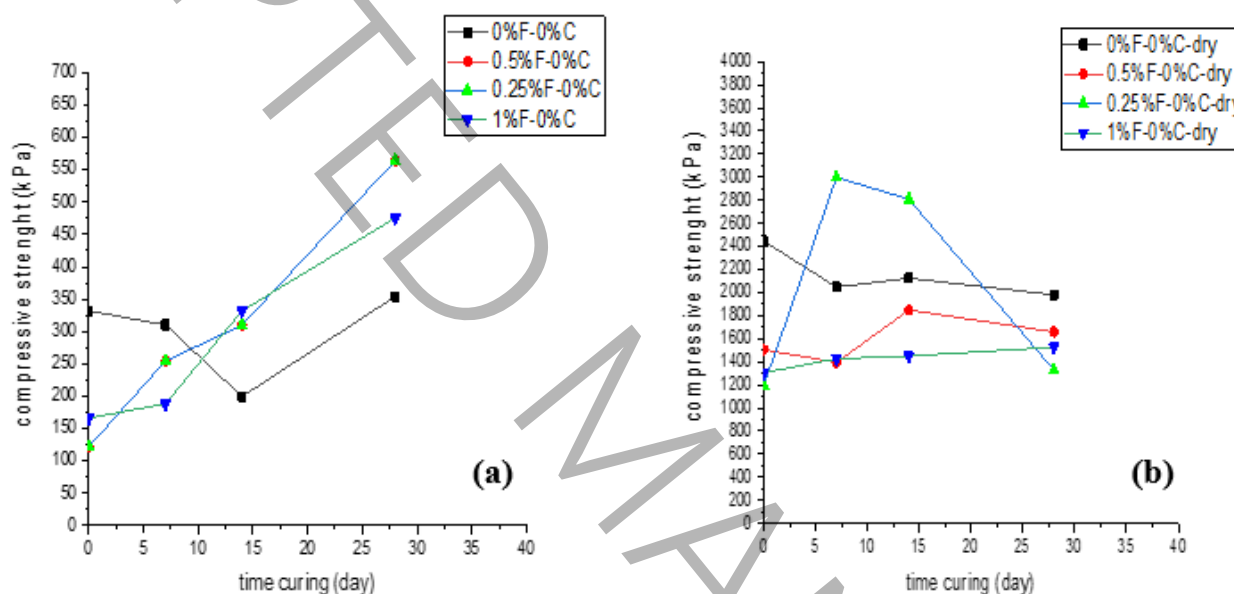
Figure 12. Stress-strain curve of wet samples containing different percentages of fibers and 12% cement



شکل ۱۳- نمودار تنش_کرنش نمونه‌های پوسیدگی حاوی درصدهای مختلف الیاف و ۱۲٪ سیمان

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

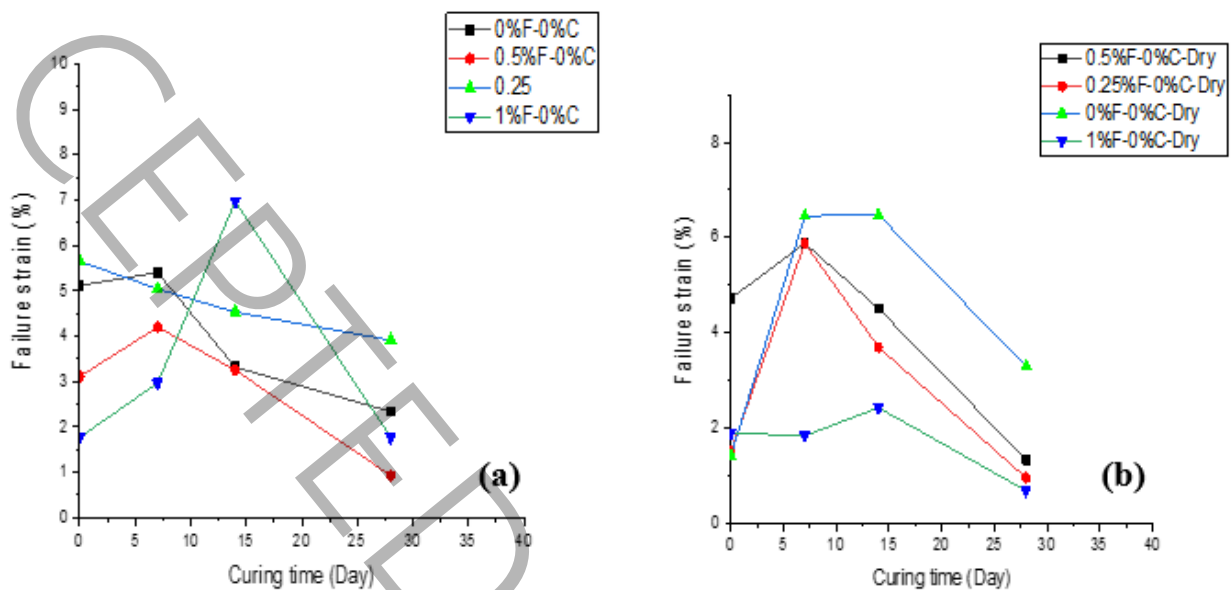
همانطور که گفته شد نمونه‌ها در روزهای عمل آوری ۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ساخته شدند. در این بخش اثر عمل آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شده است. با توجه به شکل ۱۴(a)، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش عمل آوری در درصدهای مختلف الیاف در حال افزایش است. با افزایش عمل آوری گیرش بین الیاف و خاک در حال کاهش است 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 خشک با درصدهای مختلف الیاف را در طول زمان‌های عمل آوری مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- نمودار تغییرات مقاومت فشاری در روزهای عمل آوری مختلف نمونه‌های مرطوب با درصد‌های مختلف الیاف: (a) نمونه مرطوب (b) نمونه خشک

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

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 می‌شود که باعث کاهش کرنش گسیختگی به مرور زمان می‌شود. در شکل ۱۵(b)، کرنش گسیختگی نمونه‌های خشک کاهشی بوده اما این کاهش در نمونه‌های حاوی ۰٪ و ۰.۲۵٪ الیاف ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است ولی این کاهش در نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف بیشتر مشاهده می‌شود. دلیل این رفتار سختی نمونه‌ها و همچنین افزایش این سختی با خشک شدن نمونه‌ها و از دست دادن رطوبت می‌باشد. در ابتدا الیاف دارای رطوبت بوده و انعطاف پذیر بودند اما با خشک شدن نمونه‌ها، الیاف موجود در آن هم خشک شده که باعث سختی بیشتر در نمونه می‌شود و در نتیجه با کاهشی تر شدن کرنش گسیختگی در نمونه‌های حاوی الیاف بیشتر می‌شود.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات کرنش گسیختگی در روزهای عمل آوری مختلف: (a) نمونه مرطوب (b) نمونه خشک
Figure 15. Figure of the failure strain variations over different curing days with various fiber percentages: (a) wet sample, (b) dry sample

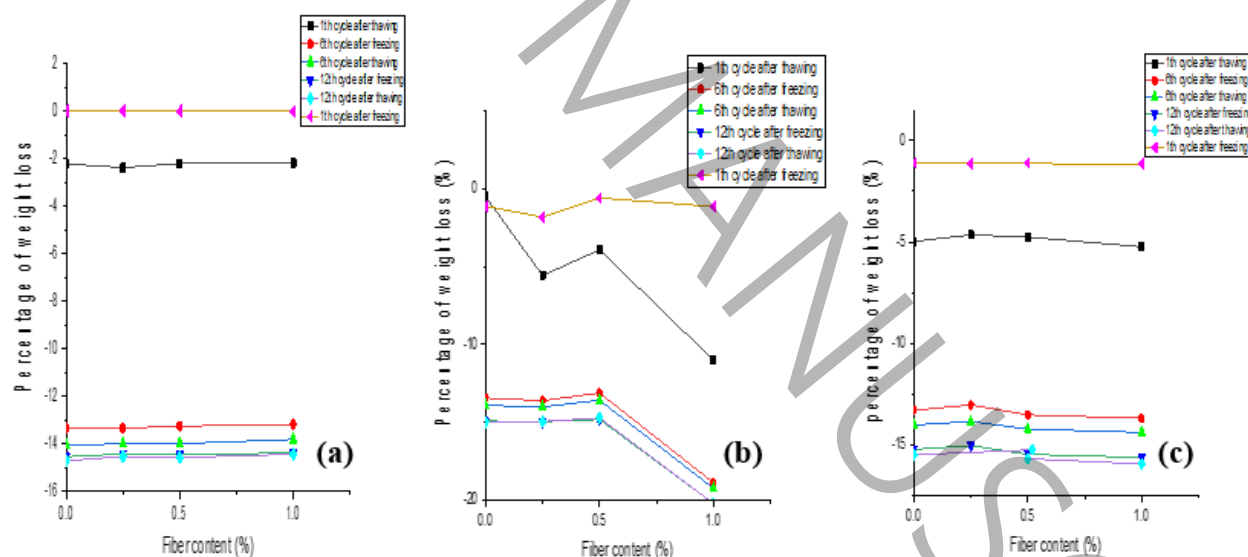
۳-۴- اثر هوازدگی و سیکل ذوب - یخ

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 شده‌اند 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 نمونه‌های این آزمایش بر اساس درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک ساخته شده‌اند.

بعد از تحلیل داده‌های گرفته شده از آزمایش سیکل ذوب - یخ، مشاهده شد که در نمونه‌های 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 نمونه‌های با الیاف کمتر شامل کاهش وزن بیشتری نسبت به نمونه‌های با الیاف بیشتر بوده اما این تغییر ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است. در نمونه های شامل عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه، نمونه‌های حاوی الیاف بیشتر درصد کاهش وزن بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف کمتر داشت و این تغییر هم ناچیز و قابل چشم پوشی است ولی در مجموع روند کاهشی است.

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 می‌زنند و در فرآیند ذوب آب می‌شوند که باعث کاهش وزن در نمونه و ریزش خاک در این خاک رمبنده می‌شوند. فرآیند برس کشیدن بر روی نمونه‌ها در کاهش وزن این نمونه‌ها بی تاثیر نیست. بعد از تکمیل شدن فرآیند ذوب، خرده خاک‌هایی که بر روی سطح و دیواره نمونه‌ها می‌ماند 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 نمونه‌ها انجام شود این بود که حفراتی که الیاف در خاک ایجاد می‌کنند با یخ زدن و ذوب شدن باعث کاهش زیاد در وزن نمونه‌ها و نشست خاک نشود. نتایج نشان می‌دهد این تغییرات بسیار کم و ناچیز بوده و می‌توان از آن چشم پوشی کرد اما در کل روند تغییرات وزن در همه‌ی نمونه‌ها کاهشی بوده است. در ادامه چند نمونه از این تغییرات در سیکل‌ها و زمان‌های 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 سیکل‌ها، 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

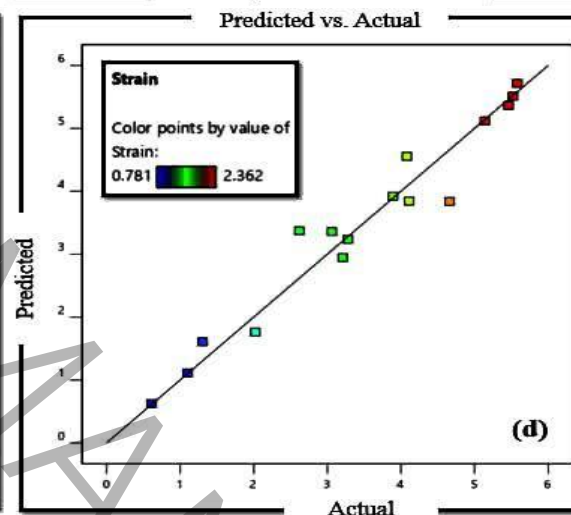
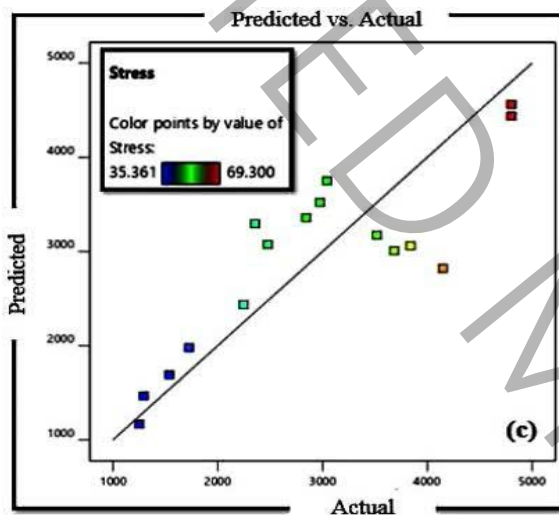
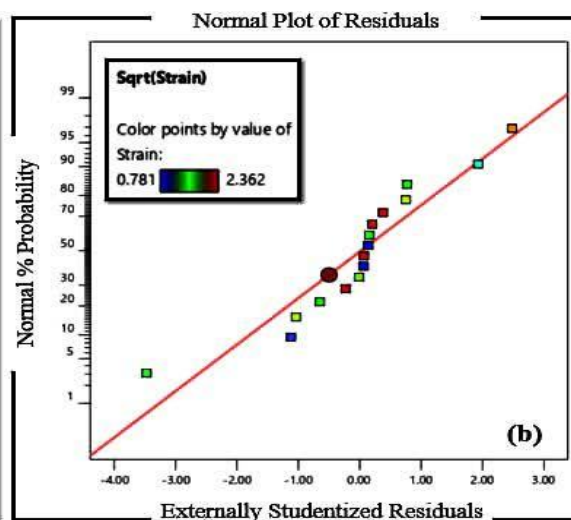
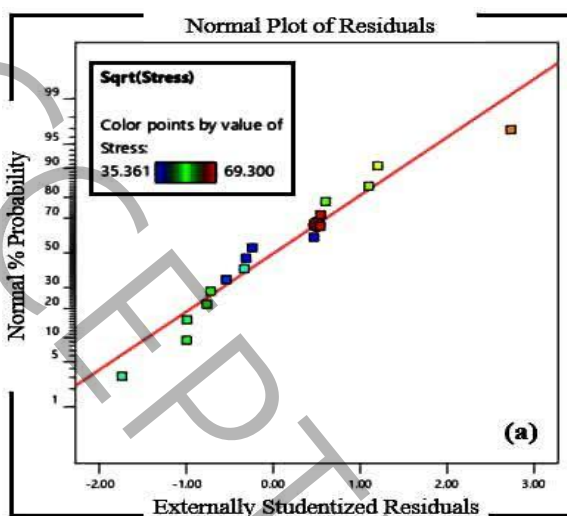
Figure 16. Weight variations of the samples: (a) un-cured, (b) cured for 14 days, and (c) cured for 28 days, after the 1st, 6th, and 12th freeze–thaw cycles.

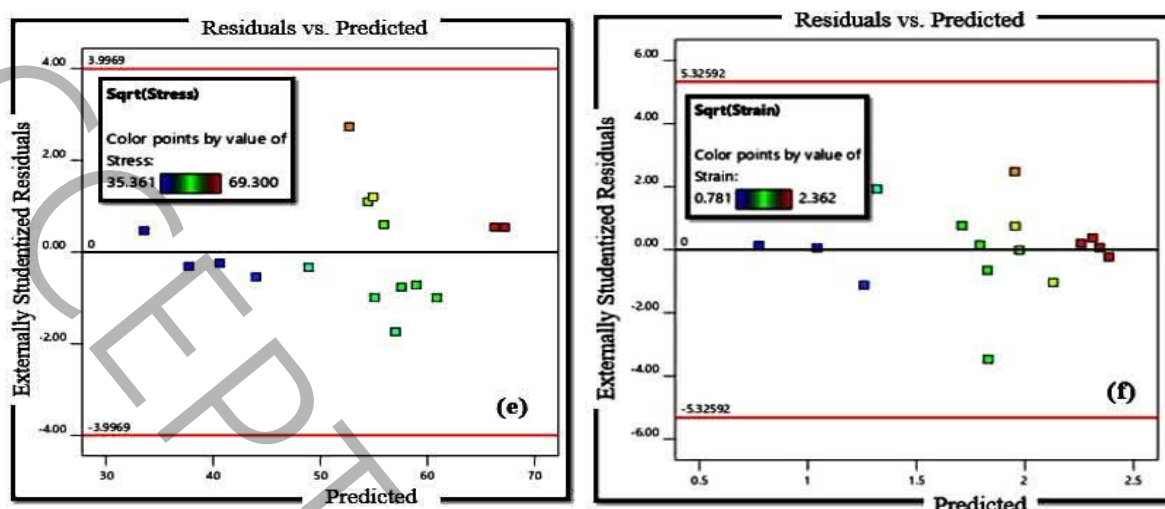
روش سطح پاسخ برای محاسبه مقادیر تنش و کرنش به کار گرفته شده است. روایی مدل ریاضی از طریق ارزیابی آماری با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه DX12 مورد بررسی قرار گرفت. در میان طرح های پیشنهادی، طرح کیوبیک و کوادراتیک برای پیش بینی تنش و کرنش استفاده شد. مدل با استفاده از سلسله مراتب مدل توسعه یافت و حذف خودکار به روش حذف به عقب، عبارتهای غیرمعنی دار را نادیده گرفت. مقادیر احتمال P و مقدار F سر رونالد فیشر، اهمیت آماری متغیرها و روابط آنها را تأیید می کنند. در این پژوهش، مقدار احتمال P برای تمام مدل ها کمتر از 0.001 بود که نشان دهنده کارایی قابل توجه (کمتر از 0.05) 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 پوشیدگی، 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 دارند. اشکال خاص مانند خط "S-شکل" می توانند ارزیابی مناسبی از تغییر شکل پاسخ را نشان دهند. شکل ۱۷ (a و b) نمودار توزیع نرمال باقیمانده ها را برای پاسخ های پارامتر تنش و کرنش تحت اثر پوشیدگی نشان می دهد. همه داده ها از یک فرمت ثابت پیروی کرده و توسط یک خط مستقیم نمایش داده شده اند. نمودارهای واقعی در مقابل پیش بینی شده، کمیتی یا مجموعه ای از کمیت ها را نشان می دهند که مدل نمی تواند به سادگی پیش بینی کند. نمودار مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده برای پارامترهای تنش و کرنش در شکل ۱۷ (c و d) نشان می دهد که نمودار تقریباً یک خط مستقیم ۴۵ درجه است که نشان دهنده همبستگی قوی بین نتایج واقعی و پیش بینی شده است. نمودار باقیمانده ها در مقابل داده های پیش بینی شده از یک نمودار پراکندگی با باقیمانده های خارجی روی محور Y و مقادیر پیش بینی کننده روی محور X تشکیل شده است. یک نمودار شکل گرفته به درستی با یک پرش کاملاً تصادفی اغلب یک نوار تقریباً افقی در امتداد محور باقیمانده های خارجی $= 0$ ایجاد می کند. علاوه بر این، هیچ تفاوتی بین نقطه داده و الگوی تصادفی کلی سایر باقیمانده ها وجود ندارد. شکل ۱۷ (e و f) توزیع ناهمگون داده ها و نمودار باقیمانده ها و مقادیر مورد انتظار (پیش بینی شده در مقابل باقیمانده) پارامترهای تنش و کرنش را نشان می دهد. اشکال ۱۷ (a تا f) نشان می دهند که هر دو مدل دقیق هستن و می توانند تعامل بین پاسخ ها و متغیرها را توضیح دهند و پیش بینی های جامع و قابل اعتمادی را ارائه می دهند.





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

Figure 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.

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 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.

۶. مدل‌های محاسباتی مبتنی بر روش سطح پاسخ همبستگی خوبی با یافته‌های تجربی داشتند. این نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای تنش (ضریب همبستگی $R^2 = 0.84$) و کرنش (ضریب همبستگی $R^2 = 0.94$) در خاک با الیاف پوسیده، کارآمد است.

مراجع

- [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

- [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 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.