

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سن، دما و میزان الیاف بر رفتار باتارد مسلح دوستدار محیط زیست

محمد مصطفی جعفری*^۱، محمدحسین باقری پور^۲

^۱ مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵

چکیده

از نقایص تثبیت خاک با آهک می‌توان به کاهش مقاومت در اثر اشباع شدن و رفتار نامطلوب ترد آن اشاره نمود. که آن‌ها را می‌توان به ترتیب با استفاده از سیمان در کنار آهک (باتارد) (Bastard mortar) و نیز تسلیح باتارد به کمک الیاف برطرف نمود. در پژوهش حاضر نمونه‌هایی با درصد الیاف مختلف جهت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، به منظور بررسی تأثیر سن، درجه حرارت عمل‌آوری و میزان الیاف به عنوان تعدادی از عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای ژئوتکنیکی باتارد مسلح، ساخته شد. این نمونه‌ها در سنین و دماهای مختلف، عمل‌آوری و تست شده و پارامترهای متعددی از آن‌ها نظیر: مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته (Modulus of elasticity) و ... محاسبه گردید. نتایج نشان داد که واکنش‌های پوزولانی، سن و درجه حرارت عمل‌آوری نقش مؤثری در بالا بردن پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها داشته و وجود الیاف نیز نقش مهمی در شکل‌پذیر کردن رفتار نمونه‌ها دارند به‌طور مثال کرنش گسیختگی در نمونه‌های سه روزه مسلح با ۲/۵٪ الیاف، ۱/۷۵ برابر نمونه‌های سه روزه فاقد الیاف مشاهده شد. مدول الاستیسیته نمونه‌هایی که ۲۱ روز و در دمای ۶۰°C عمل‌آوری شده‌اند بیش از ۳ برابر مقدار متناظر در نمونه‌های ۱۴ روزه عمل‌آوری شده در دمای ۳۰°C است.

کلیدواژه‌ها: باتارد مسلح، سن عمل‌آوری، الیاف لاستیک بازیافتی، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی در پروژه‌های عمرانی، پیشرفت‌های زیادی در زمینه تثبیت و تسلیح خاک با استفاده از مواد بازیافتی صورت پذیرفته است. به عبارت دیگر تثبیت و تسلیح خاک به عنوان ابزاری، به جای تعویض خاک نامرغوب با مصالح مرغوب مورد استفاده می‌باشد. به کمک تثبیت و تسلیح خاک می‌توان پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت فشاری خاک را افزایش، نشست ناشی از وجود سرباره‌ها را کاهش و ویژگی‌های نفوذپذیری خاک‌ها را تغییر داد (Bell و Kirsch، ۲۰۱۲). تثبیت خاک عموماً با استفاده از اضافه کردن یک ماده افزودنی به خاک نظیر: آهک، سیمان، خاکستر بادی، ژئوپلیمرها، خاکستر نیشکر و سرباره کوره‌های ذوب فلزات صورت می‌پذیرد (Suksiripattanapong و همکاران، ۲۰۱۵؛ Kua و همکاران، ۲۰۱۷؛ Suksiripattanapong و همکاران، ۲۰۱۷؛ Arulrajah و همکاران، ۲۰۱۷).

همکاران، ۲۰۱۷). همچنین با استفاده از فرآیندهای فیزیکی نظیر: تراکم دینامیکی و یا پیش بارگذاری می‌توان خاک محل را تثبیت کرد (Bell و Kirsch، ۲۰۱۲). تسلیح خاک با استفاده از افزودن عامل یا عوامل مسلح کننده نظیر: ژئوسنتتیک‌ها (Koerner، ۲۰۱۲) و یا الیاف که به صورت رشته‌های مجزا از یکدیگر بوده و به صورت تصادفی در درون جسم خاک قرار می‌گیرند انجام می‌شود (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲). در دهه‌های اخیر تسلیح خاک با استفاده از الیاف که به صورت تصادفی در توده خاک قرار گرفته و سبب بهبود پارامترهای آن می‌شود با استقبال گسترده‌ای مواجه شده است (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). از فواید استفاده از الیاف نسبت به ژئوسنتتیک‌ها (که به صورت لایه‌ای در توده خاک قرار می‌گیرند) می‌توان به کمتر شدن احتمال به‌وجود آمدن صفحات ضعیف در جسم خاک، عدم وقوع شکست‌های ناگهانی و فاجعه‌بار، قابل استفاده بودن در فضاهای محدود، شکل‌پذیری بالاتر

مقادیر ناچیز کاهش پیدا می‌کند (Jahandari و همکاران، ۲۰۱۸). در شهرهایی (مانند کرمان) که مدیریت و دفع آب‌های زیرسطحی و زیرزمینی به‌عنوان یک بحران و معضل درآمده است، به‌علت نقص در سیستم دفع فاضلاب شهری، شاهد بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی و وارد آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری به میراث گران‌بهای فرهنگی بوده و به‌علت ریزدانه بودن خاک منطقه و خاصیت کشش مویینگی به‌آسانی درجه اشباع مناطقی در بستر سازه‌ها بالا می‌رود. در صورت تثبیت خاک با استفاده از سیمان در کنار آهک و ساخت ملات باتارد، به نحو مطلوبی می‌توان با نقص ناشی از ضعف مقاومت خاک در اثر افزایش درجه اشباع مقابله کرد. Jahandari و همکاران در سال ۲۰۱۹، تأثیر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی بر رفتار خاک ریزدانه تثبیت‌شده با ۷ درصد آهک و همچنین تثبیت‌شده با ۴ درصد سیمان و ۳ درصد آهک را مطالعه نمودند. در این تحقیق بیش از ۲۵۰ نمونه ساخته و در سنین ۱۴، ۲۸، ۴۵ و ۶۰ روزه عمل‌آوری شد. سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌ها با درجه‌های اشباع مختلف (۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد، اولاً افزایش درجه اشباع تأثیر اساسی بر کاهش مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده داشته است و ثانیاً وجود سیمان در طرح اختلاط سبب مقاومت بیشتر خاک تثبیت‌شده در برابر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی شده است. به‌طوری‌که کم‌ترین و بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و آهک و با درجه اشباع ۱۰۰٪ به‌ترتیب ۲۳۸ و ۳۳۸ کیلوپاسکال که مربوط به نمونه‌های ۱۴ و ۶۰ روزه می‌باشد، گزارش شده و این در حالی است که مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و در درجه اشباع ۱۰۰٪ صفر بوده و تابع سن عمل‌آوری نمی‌باشد (Jahandari و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از موادی مانند آهک، سیمان و یا آهک و سیمان به‌صورت توأم و در کنار یکدیگر به‌منظور تثبیت خاک، از طرفی مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده را افزایش داده و از طرف دیگر سبب افزایش تردی رفتار مصالح موردنظر شده (Kafodya و Okonta، ۲۰۱۸) و این نقصی است که با استفاده از الیاف در کنار سیمان و آهک برطرف می‌گردد (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). Park در سال ۲۰۰۹ مشاهده کرد که افزودن یک درصد الیاف پلی‌وینیل^۶ الکل و ۴ درصد سیمان به ماسه سبب افزایش دو برابری در مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح شده است (Park، ۲۰۰۹).

و مقرون به‌صرفه‌تر بودن اشاره کرد (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Salbas و Yetimoglu، ۲۰۰۳؛ Mirzababaei و همکاران، ۲۰۱۳). اگرچه انواع گوناگونی از الیاف طبیعی مانند: الیاف نارگیل (Sivakumar Babu و Vasudevan، ۲۰۰۸)، نیشکر (Dang و همکاران، ۲۰۱۶)، سیسال^۳ (Okonta و Kafodya، ۲۰۱۸)، کنف هندی^۴ (Yixian و همکاران، ۲۰۱۶) الیاف درخت خرما (Azadegan و همکاران، ۲۰۱۲) و گونه‌های متفاوتی از الیاف مصنوعی جهت تسلیح خاک به‌کار برده می‌شوند؛ اما توجه به این نکته ضروری است که علی‌رغم ارزان بودن الیاف طبیعی نسبت به الیاف مصنوعی، آن‌ها در مقابل شرایط جوی و عوامل خوردنده محیطی دارای مقاومت بسیار کمتری خصوصاً در مقایسه با الیاف مصنوعی پلیمری می‌باشند (Hejazi و همکاران؛ ۲۰۱۲). از انواع مختلف الیاف مصنوعی که به‌طور گسترده در تسلیح خاک به‌کار می‌روند می‌توان به الیاف پلی‌اتیلن (Azadegan و همکاران، ۲۰۱۲؛ Akbulut و همکاران، ۲۰۰۷)، پلی‌پروپیلن^۵ (Park، ۲۰۰۹؛ Kim و Kim، ۲۰۱۱؛ Consoli و همکاران، ۲۰۰۳؛ Duan و Zhang، ۲۰۱۹) پلی‌استر^۶ (Chaduvula و همکاران، ۲۰۱۷؛ Consoli و همکاران، ۲۰۰۴) شیشه (Consoli و همکاران، ۲۰۰۴؛ Consoli و همکاران، ۱۹۹۸؛ Mukherjee و Mishra، ۲۰۱۹؛ Patel و Sing، ۲۰۱۹) کرین (Gao و همکاران، ۲۰۱۷؛ Cui و همکاران، ۲۰۱۸) و الیاف فلزی (Fatahi و همکاران، ۲۰۱۲) اشاره کرد. مطالعاتی که در سال‌های اخیر بر روی خاک مسلح انجام شده است بیشتر با هدف معرفی کاربردهای عملی استفاده از این روش جهت استفاده در پروژه‌های عمرانی انجام شده و کمتر به نقش الیاف در بهبود ویژگی‌های مقاومتی و خصوصیات شکل‌پذیری خاک‌ها پرداخته شده است (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعات متعددی از چسباننده‌هایی نظیر سیمان (Consoli و همکاران، ۲۰۱۱a؛ Consoli و همکاران، ۲۰۱۱b؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ayeldeen و Kitazume، ۲۰۱۷؛ Festigato و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bekhiti و همکاران، ۲۰۱۹) و آهک (Dang و همکاران، ۲۰۱۹؛ Okonta و Kafodya، ۲۰۱۸؛ Chai و همکاران، ۲۰۱۸) در ترکیب با الیاف جهت تقویت خاک استفاده شده است. تثبیت با آهک از دیرباز تاکنون جهت بسترسازی تکیه‌گاه سازه‌ها و بهسازی خاک‌های مسئله‌دار موردتوجه مهندسی ژئوتکنیک بوده است. ضعف عمده روش تثبیت با آهک این است که در صورت اشباع شدن خاک تثبیت‌شده بنا به هر دلیلی اعم از بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، صعود مویینگی آب، نزولات جوی، نشست آب و ... مقاومت و ظرفیت باربری خاک تثبیت‌شده به سمت

6. Polyester
7. Polyvinil alcohol

3. Sisal
4. Hemp
5. Polypropylene

از آزمایش برش مستقیم برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف لاستیک فرسوده نشان داد، که بدون توجه به طول الیاف، بیشترین چسبندگی برای الیاف لاستیک مربوط به ۰/۵٪ و برای الیاف شیشه مربوط به ۰/۱٪ الیاف می‌باشد. همچنین مشاهده شد، هرچه نسبت ظاهری الیاف (نسبت طول به قطر) کمتر باشد (خصوصاً در مقدار الیاف بهینه) میزان تأثیر الیاف در افزایش چسبندگی بیشتر و هر اندازه نسبت ظاهری الیاف بیشتر باشد، تأثیر آن‌ها در افزایش زاویه اصطکاک داخلی بیشتر است (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). علیرغم اینکه محققین بسیاری به استفاده از الیاف حاصل از مواد ضایعاتی و دورریز جهت تسلیح خاک بکر روی آورده‌اند، مطالعات کمی بر روی افزایش شکل‌پذیری خاک تثبیت‌شده با سیمان و آهک و مسلح شده با الیاف، صورت گرفته است. لذا یکی از اهداف تحقیق حاضر تمرکز بر این مسئله می‌باشد. الیاف حاصل از زباله‌ها و مواد ضایعاتی بنابه دلایلی نظیر: ارزانی، قابلیت استفاده مجدد و کمک به دفع ضایعات و پاک‌سازی محیط‌زیست بر الیاف مصنوعی که برای مقاصد مختلف، من جمله تسلیح خاک تولید می‌شوند ارجحیت دارند. به‌عنوان مثال الیاف حاصل از بازیافت قالی‌های کهنه (Mirzababaei و همکاران، ۲۰۱۳؛ Fatahi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Festugato و همکاران، ۲۰۱۸) به‌منظور تسلیح خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لاستیک‌های فرسوده بخش عظیمی از زباله‌ها را در کشورهای مختلف دنیا، اعم از توسعه‌یافته و در حال توسعه به خود اختصاص داده و هر ساله با اضافه شدن حجم این لاستیک‌های فرسوده چالش‌های جدی در زمینه مدیریت دفع زباله‌ها به وجود می‌آید (Mohajerani و همکاران، ۲۰۲۰). سالانه ۱۷ میلیون تن لاستیک در سراسر جهان به انتهای عمر مفید خود رسیده و بلااستفاده می‌شوند (Abbaspour و همکاران، ۲۰۱۹). این لاستیک‌های فرسوده به دلیل این‌که از نظر زیست‌محیطی تجزیه‌ناپذیرند، قادر خواهند بود در طول سالیان دراز در طبیعت باقی‌مانده و تجزیه نشوند. علاوه بر این‌که به دلیل شکل هندسی، لاستیک‌های فرسوده فضای زیادی اشغال می‌کنند، با توجه به رنگ تیره آن‌ها در فصول گرم سال ممکن است به‌صورت خودبه‌خود محترق شده و با سوختن خود گازهای سمی تولید نمایند که به‌وسیله جریان باد تا شعاع ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر از محیط‌زیست را آلوده نموده و با خطر جدی مواجه کنند (Mohammadinia و همکاران، ۲۰۱۸). خطرات جدی ناشی از انتشار گازهای سمی که برای سلامت انسان و محیط‌زیست اطراف آن مخاطره‌آفرین است سبب شده تا محل دفن این ضایعات از جوامع شهری فاصله بگیرد (Mohammadinia و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین بر طبق توافقنامه‌های بین‌المللی سوزاندن

Park در سال ۲۰۱۱ خاک ماسه بد دانه‌بندی شده را با نسبت‌های مختلف سیمان و الیاف پلی‌وینیل الکل مخلوط نمود. نتایج آزمایشات نشان داد، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مسلح شده بیش از سه برابر نمونه‌های مسلح نشده است. همچنین شاخص شکل‌پذیری در نمونه‌های مسلح شده با یک درصد الیاف ۴ و یا بزرگ‌تر از چهار بوده و به مقدار سیمان در نمونه‌ها وابسته نیست (Park، ۲۰۱۱).

Jafari و Esna-ashari در سال ۲۰۱۲ از ۱۲ ترکیب مختلف با مخلوط هم‌زمان آهک، خاک رس و الیاف لاستیک در مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز تحت ۳ سیکل ذوب و انجماد استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده افزایش حداکثر ۴۳۰ کیلوپاسکال مقاومت فشاری با افزودن ۱/۵ درصد الیاف لاستیک بود. درحالی‌که با یک سیکل ذوب و انجماد حداکثر مقاومت به‌دست‌آمده ۱۶۵ کیلوپاسکال بود. درنهایت تثبیت با ۴٪ آهک در مقابل ۸٪ آهک و نمونه‌های تثبیت نشده مقاومت و دوام بهتری نشان داد (Jafari و Esna-ashari، ۲۰۱۲).

Butt و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر استفاده از موی انسان را به‌عنوان یک الیاف طبیعی بر رفتار خاک رس مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد، با مسلح نمودن خاک رس با حدود ۲٪ الیاف موی انسان، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)^۸ برای نمونه‌ها از ۴/۷٪ به ۷/۸٪ افزایش یافته است. همچنین هنگامی که درصد الیاف از مقدار ۲٪ بیشتر شود، به دلیل کاهش چسبندگی که بین ذرات خاک و الیاف اتفاق می‌افتد، از مقدار CBR و مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌ها کاسته گردیده است (Butt و همکاران، ۲۰۱۶).

Valipour و همکاران در سال ۲۰۲۱ جهت تسلیح خاک رس از الیاف لاستیک‌های فرسوده و الیاف شیشه استفاده کردند. برای این منظور از الیاف با طول‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر جهت تسلیح خاک استفاده شد. در ابتدا وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه برای خاک فاقد عوامل تسلیح و خاک با ۰/۵٪، ۱/۱٪ و ۱/۵٪ الیاف از طریق آزمایش تراکم پروکتور^۹ استاندارد تعیین شد. سپس خاک و الیاف در ۳ لایه ۷ میلی‌متری درون قالب برش مستقیم به ابعاد ۱۰×۱۰×۲ سانتی‌متر (برای هر درصد الیاف با توجه به وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه مربوط به آن) کوبیده شده و تحت اثر تنش‌های نرمال ۵۵، ۱۰۵ و ۲۰۵ کیلوپاسکال مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. لازم به‌ذکر است در هر مرحله پس از اعمال تنش قائم، قالب برش مستقیم از آب پر شده و بلافاصله با سرعت ۰/۷۵mm/min نیروی برشی تا جابه‌جایی ۱۲ میلی‌متر اعمال گردید. پوش موهر-کولمب^{۱۰} حاصل

10. Mohr-Coulomb Envelope

8. California Bearing Ratio

9. Standard Proctor Compaction Test

می‌کند. موارد متعددی از کاربرد انواع الیاف جهت تسلیح خاک‌ها مورد مطالعه و بررسی محققان قرار گرفته است (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲). مقاومت و شکل‌پذیری قابل‌قبول خاک‌های مسلح الیافی سبب شده تا مشکلاتی که ناشی از افت و انقباض خاک‌ها به وقوع می‌پیوندد به حداقل رسیده و عرض ترک‌های به‌وجود آمده در درون خاک محدود شده (Ehrlich و همکاران، ۲۰۱۹) و همین امر سبب شود تا خاک مسلح الیافی به‌عنوان محصولی قابل رقابت با دیگر مصالح به‌منظور استفاده در لایه‌های روسازی راه‌ها، خاک‌ریزهای راه‌آهن، دیوارهای حائل، شیروانی‌های خاکی و پوشش‌های غیرقابل نفوذ در محل‌های دفن زباله‌ها مطرح شود. ظرفیت باربری قابل‌قبول خاک‌های مسلح الیافی سبب شده تا مقاومت آن‌ها در برابر بارهای دینامیکی و تکرارشونده نظیر بار حاصل از عبور و مرور وسایل نقلیه افزایش و تغییر شکل به‌وجود آمده در آن‌ها ناشی از این‌گونه بارها کاهش یافته و همین امر منجر شود تا با صرف هزینه‌ای اندک و مسلح نمودن مصالح زیرین از ضخامت لایه‌های فوقانی روسازی‌ها و خاک‌ریزها که به‌دلیل کیفیت بالای آنها اکثراً گران‌قیمت نیز هستند کاسته شود (Chandra و همکاران، ۲۰۰۸).

Saberian و همکاران در سال ۲۰۲۱ سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتن را با استفاده از افزودن الیاف حاصل از ماسک‌های سه‌لایه حفاظت فردی در مقابل ویروس کرونا^{۱۵} جهت استفاده در لایه‌های اساس و زیر اساس مسلح نمودند. نتایج آزمایشات نشان داد، با افزودن ۱٪ از الیاف موردنظر به مصالح، بیش‌ترین مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول بستر حاصل می‌گردد. آن‌ها همچنین برآورد کردند جهت ساخت یک جاده دو بانده به طول ۱ کیلومتر، عرض ۷ متر و ضخامت ۰/۵ متر برای اساس و زیراساس به حدود ۹۳/۲ تن ماسک (۳ میلیون ماسک) نیاز است که استفاده از این ماسک‌های مصرف‌شده می‌تواند کمک شایانی به بازیافت زباله‌های تولیدشده در اثر بیماری کووید^{۱۶} ۱۹ نماید (Saberian و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین شکل‌پذیری بالای خاک مسلح الیافی در مقایسه با خاک فاقد عوامل تسلیح سبب افزایش طول عمر مفید لایه‌های روسازی می‌گردد (Edinçliler و Gagatay، ۲۰۱۳). در مواردی که خاک ریزدانه با موادی نظیر سیمان، آهک و یا ژئوپلیمرها تثبیت نگردد و فعل‌وانفعالات شیمیایی در درون خاک به وقوع نپیوندد، استفاده از الیاف در این نوع خاک‌ها هیچ‌گونه ناسازگاری با محیط‌زیست و پوشش گیاهی موجود در خاک نخواهد داشت.

با توجه به مباحث بالا و همچنین با توجه به این‌که تاکنون استفاده از این نوع الیاف به‌همراه سیمان و آهک به‌عنوان

لاستیک‌های فرسوده به‌منظور تولید انرژی به‌علت آن‌که تولید گازهای سمی را به‌همراه دارند ممنوع شده است (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). به‌منظور غلبه بر مشکلات ذکرشده در بالا، روش‌های مختلف دفع زباله به‌وجود آمده و مؤسسات مختلفی نظیر کارخانه لاستیک‌سازی استرالیا (USTMA) و کارخانه بازیافت لاستیک‌های فرسوده اروپا (ETRA) منابع و امکانات خود را برای این امر مهم اختصاص داده‌اند (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر از فرآورده‌های حاصل از بازیافت لاستیک‌های فرسوده در اشکال مختلفی نظیر: خرده لاستیک^{۱۱} (Hataf و Rahimi، ۲۰۰۶)، تراشه لاستیک^{۱۲} (Saberian و همکاران، ۲۰۱۸)، دانه‌هایی لاستیک^{۱۳} (Arulrajah و همکاران، ۲۰۱۹) و الیاف موجود در لاستیک^{۱۴} (Akbulut و همکاران، ۲۰۰۷؛ Bekhiti و همکاران، ۲۰۱۹؛ Kalkan، ۲۰۱۳) به‌عنوان راه‌حلی پایدار، دائمی و سازگار با محیط‌زیست، جهت تقویت پارامترهای مقاومتی خاک‌ها از یک طرف و دفع زباله‌ها از طرف دیگر استفاده شده است. یکی از موادی که از بازیافت لاستیک‌های فرسوده تولید شده و به‌عنوان مسلح‌کننده خاک کاربرد دارد الیاف پلیمری درون این لاستیک‌ها (RTPF) است. این الیاف پلیمری به‌همراه رشته‌های فولادی، جهت بالا بردن مقاومت کششی و بهبود کارایی لاستیک نقش مهم و حیاتی ایفا می‌کنند. با وجود مقاومت کششی بالای الیاف موردنظر و قابلیت استفاده از آن‌ها به‌منظور مسلح نمودن خاک، مطالعات محدودی در خصوص استفاده از این نوع الیاف در جهت بالا بردن پارامترهای مقاومتی فشاری و برشی خاک صورت پذیرفته است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۱۹؛ Narani و همکاران، ۲۰۲۰).

نفوذپذیری کم خاک‌های ریزدانه رسی از یک طرف سبب شده تا سازه‌های خاکی نظیر: خاک‌ریزها، سدهای خاکی، روکش‌های ناتراوا در محل‌های دفن زباله و ... از این‌گونه خاک‌ها ساخته شوند اما از طرف دیگر مقاومت برشی کم و حساسیت زیاد این‌گونه خاک‌ها در برابر تغییرات درصد رطوبت سبب شده تا در هنگام تغییرات فصلی و محیطی، تغییر حجم‌های قابل‌ملاحظه‌ای در این نوع خاک‌ها صورت پذیرفته و استفاده از آن‌ها را در ساخت‌وسازهای ژئوتکنیکی با محدودیت مواجه سازد و در برخی موارد مهندسان طراح را مجبور به تعویض خاک محل نماید. بنابراین ایده تسلیح خاک‌های ریزدانه رسی به‌کمک الیاف که به‌صورت رشته‌های مجزا از یکدیگر بوده و به‌طور تصادفی در درون جسم خاک قرار می‌گیرند، نقش مهمی در استفاده اثربخش از خاک به‌عنوان یک ماده طبیعی در ساخت سازه‌های خاکی ایفا

14. Recycled Tire Polymer Fibers
15. Coronavirus
16. COVID-19

11. Tire Shreds
12. Tire Chips
13. Tire Derived Aggregates

دارای قطر معادلی کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر بوده و ۱۰۰٪ آن‌ها از الک نمره ۴ عبور کرده‌اند. ترکیبات اصلی تشکیل‌دهنده خاک رس در جدول (۲) مشاهده می‌شود. همچنین مجموع ترکیبات دی‌اکسید سیلیسیم (SiO₂)، اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) و اکسید آهن (Fe₂O₃) برابر ۶۴/۸٪ است که از مقدار مینیمم موجود در مرجع (ASTM-C618-19, 2015) که برابر با ۷۰٪ می‌باشد، کمتر است. بنابراین به‌منظور بالا بردن مقاومت فشاری تک‌محوری و کاهش پتانسیل تورم و انقباض خاک موردنظر جهت استفاده در مقاصد بسترسازی راه‌ها و بهسازی خاک زیر فونداسیون سازه‌ها لازم است تا از مواد پوزولانی‌ای نظیر آهک و یا سیمان به‌عنوان مواد افزودنی در کنار خاک ریزدانه رسی موردنظر استفاده کرد ((Saberian و Rahgozar, ۲۰۱۶؛ Sirvitmaitrie و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به خصوصیات خمیری، خاک موردنظر در گروه رس‌های کم پلاستیک (CL) قرار می‌گیرد که از محل یک پروژه عمرانی در شهر کرمان تهیه شده است.

۲-۲- سیمان، آهک و آب

آهک مورد استفاده از نوع آریمان^{۱۷} آهک هیدراته نوع A با خلوص تقریبی ۷۵٪ و سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند معمولی بوده که مشخصات شیمیایی آهک و سیمان موردنظر در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود بیش‌ترین ترکیب موجود در سیمان و آهک، اکسید کلسیم (CaO) بوده که مقدار آن در سیمان و آهک به ترتیب ۶۲/۴۵٪ و ۶۲/۹۶٪ است.

جدول ۱- مشخصات خاک ریزدانه

مشخصه	نتیجه	مرجع / شماره استاندارد
کلاس خاک ریزدانه	CL	Unified Soil Classification System
نوع کانی رس	Kaolinite	(۲۰۱۳, Das)
عدد فعالیت	۰/۶۳	(۲۰۱۳, Das)
LL (%)	۳/۱۴	(۱۹۷۲, ASTM D-423-66)
PI (%)	۱۲/۱	(۱۹۸۲, ASTM D-424-54)
G _s	۲/۶۷	(۲۰۱۰, ASTM D-854-10)
F ₂₀₀ (%)	۸۹/۲	(۲۰۰۲, ASTM D-422-63)
F ₄ (%)	۱۰۰	(۲۰۰۲, ASTM D-422-63)
C _c	۰/۹	(۲۰۰۲, ASTM D-422-63)
C _u	۳۵	(۲۰۰۲, ASTM D-422-63)
D ₁₀ (mm)	۰/۰۰۰۸	(۲۰۰۲, ASTM D-422-63)
γ_{dmax} (kN/m ³)- ω_{opt} (%)	۱۸/۳۸ - ۱۵/۹	(۲۰۰۷, ASTM D-1557-07)

تثبیت‌کننده خاک و عامل تغییر در ماهیت و رفتار خاک مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر خاک ریزدانه رسی با سیمان و آهک تثبیت و با الیاف حاصل از بازیافت لاستیک فرسوده مسلح شده است. وجود آهک در طرح اختلاط محصول معرفی شده در پژوهش حاضر موجب تثبیت خاک شده و حضور سیمان در کنار آهک علاوه بر تثبیت مضاعف خاک، سبب شده تا مقاومت آن در برابر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع بیشتر شود. همچنین برای جلوگیری از رفتار ترد خاک تثبیت شده، محصول موردنظر (باتارد) با استفاده از الیاف، مسلح شده است. از میان انواع گوناگون الیاف موجود در بازار، جهت کمک به پاکیزگی محیط زیست و بازیافت زباله، از الیاف حاصل از بازیافت لاستیک‌های فرسوده استفاده شده است. از آنجاکه از طرفی رفتار مهندسی محصول حاصل (که ممزوجی از تثبیت‌کننده‌ها و تسلیح‌کننده‌ها می‌باشد) در مقابل بارهای وارده و در شرایط عمل‌آوری متفاوت نیاز به مطالعه و بررسی دقیق‌تری دارد و از طرف دیگر به جهت بهتر شناساندن این محصول به جامعه مهندسی برای استفاده در مقاصد گوناگونی نظیر: بسترسازی زیر فونداسیون سازه‌ها، راه‌ها، باندها، تثبیت و تسلیح خاک پشت دیوارهای حائل و ...، در پژوهش حاضر جهت مطالعه تأثیر سن، درجه حرارت عمل‌آوری و میزان الیاف موجود در طرح اختلاط بر پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری باتارد مسلح، در گام اول مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد و مصالح مورد استفاده تعیین و ارائه شده است. سپس نحوه ساخت نمونه‌ها و روش انجام آزمایشات صورت گرفته بر روی نمونه‌های ساخته شده مورد شرح و بسط قرار گرفته و در ادامه نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری صورت گرفته بر روی نمونه‌های غیرمسلح و مسلح با میزان مختلف الیاف و در سنین و شرایط مختلف عمل-آوری ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- معرفی مواد و مصالح مورد استفاده

۲-۱- خاک ریزدانه رسی

در ابتدا آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری، تعیین حدود اتربرگ، چگالی ویژه و تراکم استاندارد پروکتور بر طبق استانداردهای ASTM که شماره هر استاندارد در جدول (۱) آورده شده است، جهت شناسایی مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده در پژوهش صورت پذیرفت. مشخصات فیزیکی مصالح موردنظر در جدول (۱) و درصد ترکیبات تشکیل‌دهنده خاک رس که درصدی از وزن خشک آن می‌باشد در جدول (۲) آمده است. با توجه به اطلاعات حاصل از آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری ۸۹/۲٪ دانه‌های خاک

جدول ۲- ترکیبات تشکیل دهنده خاک رس، آهک و سیمان

درصد از وزن کل			
ترکیبات	خاک رس (%)	آهک (%)	سیمان (%)
CaO	۱۹/۱	۶۲/۹۶	۶۲/۴۵
SiO ₂	۴۳/۲	۴/۷۸	۲۳/۸۲
Al ₂ O ₃	۱۴/۵	۳/۹۰	۳/۹۸
Fe ₂ O ₃	۷/۱	۱/۲۱	۳/۴۷
MgO	۱/۴	۳/۹۷	۲/۵۴
SO ₃	۰/۰۳	-	۰/۰۲
Cl	۰/۰۱	۰/۰۱	-
افت وزنی	۱۳/۵	۲۳/۱۵	۰/۷۶

۲-۳- الیاف حاصل از بازیافت لاستیک فرسوده

الیاف مورد استفاده در پژوهش حاضر، الیاف حاصل از بازیافت لاستیک فرسوده خودروها می باشد. تعدادی از ویژگی های فیزیکی و مشخصات فنی الیاف مورد استفاده که برخی از آنها توسط مؤلفین اندازه گیری شده و برخی دیگر از کارخانه تولید الیاف استعلام شده، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات الیاف مورد استفاده

حالت فیزیکی	جامد رشته ای
رنگ	سیاه
چگالی ویژه*	۱/۱۴
قطر متوسط**	۰/۷۵mm
طول متوسط**	۲۰mm
مدول یانگ**	۴۵۷۵MPa
مقاومت کششی**	۵۲۰MPa
نقطه ذوب*	۲۶۰-۲۵۰°C

* استعلام از کارخانه سازنده الیاف. ** تست شده توسط مؤلفین

آب مورد استفاده جهت آزمایش های نظیر هیدرومتری و تعیین چگالی ویژه خاک از نوع آب مقطر آزمایشگاهی و جهت ساخت نمونه ها از آب لوله کشی شهری بوده است.

جدول ۴- نام گذاری نمونه های ساخته شده و مشخصات آنها

نمونه ها	الیاف (%)	آهک (%)	سیمان (%)	دمای عمل آوری (درجه سانتی گراد)		تعداد نمونه ساخته شده
				۳۰	۶۰	
				سن (روز)	سن (روز)	
Soil (کنترل ۱)	۰	۰	۰	۱۴	۳	۲×۳
LC	۰	۳	۰	۱۴ و ۲۸	-	۲×۳
CC	۰	۰	۴	۱۴ و ۲۸	-	۲×۳
LCC (کنترل ۲)	۰	۳	۴	۱۴ و ۲۸	۳ و ۲۱	۴×۳
RLCC 0.4	۰/۴	۳	۴	۱۴ و ۲۸	۳ و ۲۱	۴×۳
RLCC 1.0	۱/۰	۳	۴	۱۴ و ۲۸	۳ و ۲۱	۴×۳
RLCC 1.7	۱/۷	۳	۴	۱۴ و ۲۸	۳ و ۲۱	۴×۳
RLCC 2.5	۲/۵	۳	۴	۱۴ و ۲۸	۳ و ۲۱	۴×۳

۳- نحوه ساخت نمونه ها و برنامه آزمایشگاهی

هدف اصلی در پژوهش حاضر مطالعه پارامترهای مکانیکی باتارد مسلح شده با الیاف لاستیک فرسوده با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری می باشد. بدین منظور و جهت ساخت نمونه ها ابتدا خاک مورد نظر در دمای آزمایشگاه خشک شد، سپس کلوخه های موجود در خاک ریزدانه به وسیله چکش لاستیکی خرد و از الک نمره ۴ عبور داده شد تا ضایعات و سنگ دانه های درشت احتمالی موجود در آن جدا شود. مقدار سیمان، آهک و آب مورد استفاده با توجه به مرجع (Jahandari و همکاران، ۲۰۱۸) انتخاب گردید. یکی از ویژگی های طرح اختلاط موجود در مرجع مورد نظر این است که ملات ساخته شده بدون نیاز به لرزش و تراکم در درون قالب به نحو مطلوبی قرار می گیرد. بنابراین نمونه ها با ۳٪ آهک (نسبت به وزن خشک خاک)، ۴٪ سیمان (نسبت به وزن

خشک خاک) و ۲۴٪ آب (نسبت به مجموع وزن خشک خاک، سیمان و آهک) تهیه شدند (Jahandari و همکاران، ۲۰۱۸). مقدار الیاف مورد استفاده نیز به عنوان درصدی از مجموع وزن خشک شامل: وزن خاک، سیمان و آهک مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر الیاف بر ویژگی های ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده با سیمان و آهک نمونه هایی به شرح جدول (۴) ساخته شد.

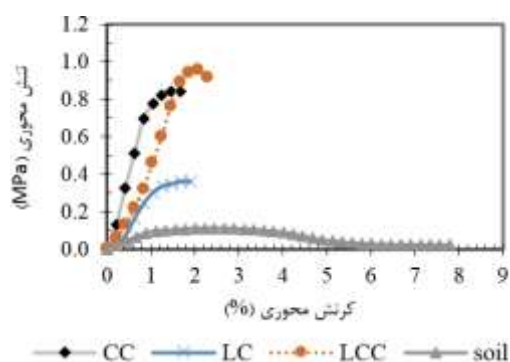
Morin و Ficarazzo (۲۰۰۶) پیشنهاد کردند به دلیل وجود تغییرات زیاد در ویژگی های مهندسی نمونه های خاک و سنگ، جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری آنها از نمونه های متعدد و به لحاظ آماری کافی مورد تست قرار گرفته و میانگین مقاومتها به عنوان مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته شود. و هر چه

سرعت بارگذاری برای کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر ۱mm/min انتخاب شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

در پژوهش حاضر جهت مطالعه تأثیر سن، درجه حرارت عمل‌آوری و میزان الیاف بر پارامترهای مقاومتی باتارد از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شده است. شکل (۱) دیاگرام تنش- کرنش خاک بکر^{۱۹}، خاک تثبیت‌شده با ۳٪ آهک (LC)^{۲۰}، خاک تثبیت‌شده با ۴٪ سیمان (CC)^{۲۱} و خاک تثبیت‌شده با ۳٪ آهک و ۴٪ سیمان (LCC)^{۲۲} پس از ۱۴ روز عمل‌آوری در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱) مشاهده می‌شود مقاومت فشاری خاک بکر ۰/۱۱MPa است. مشابه این مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک رس را Thompson نیز گزارش کرده است (Thompson, ۱۹۶۶).



شکل ۱- دیاگرام‌های تنش- کرنش خاک بکر (Soil)، خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک (LC)، خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد سیمان (CC) و خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک و ۴ درصد سیمان (باتارد) (LCC) در دمای عمل‌آوری ۳۰ درجه سانتی‌گراد و سن ۱۴ روزه

با توجه به شکل (۱) مشاهده می‌شود در نمونه‌های LC، CC و LCC، دیاگرام تنش- کرنش از مبدأ حرکت کرده تا به نقطه ماکزیمم خود برسد، پس از رسیدن به نقطه ماکزیمم که معرف مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها است، نمونه به‌طور ناگهانی گسیخته شده و ثبت ادامه دیاگرام تنش-کرنش غیرممکن می‌گردد که این رفتار معرف ترد بودن نمونه‌ها است. همچنین مشاهده می‌شود با افزودن آهک به خاک مقاومت فشاری تک‌محوری، افزایش چشمگیری نسبت به خاک بکر داشته و در

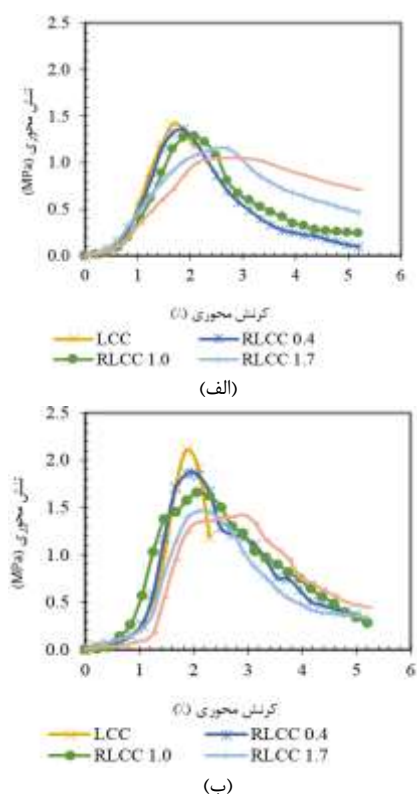
تعداد این نمونه‌ها به لحاظ آماری بیشتر باشد، مقاومت میانگین-گیری شده با قطعیت بیشتری می‌تواند به‌عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری خاک یا سنگ گزارش شود (Morin و Ficarazzo, ۲۰۰۶). لازم به‌ذکر است که عموماً کارهای تحقیقاتی همواره همراه با محدودیت‌هایی نظیر: تجهیزات و هزینه‌های آزمایشگاهی، زمان و نیروی انسانی می‌باشند که رسیدن به شرایط ایده‌آل آماری مشکل می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود در هر بخش، گروه‌های ۳ تایی به‌شکل استوانه، به قطر ۶ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر که تمام خواص و ویژگی‌های آن‌ها (درصد مواد تشکیل‌دهنده، سن عمل‌آوری، درجه حرارت عمل‌آوری و غیره) مشابه هم بوده ساخته شده است. جهت تفکیک نقش الیاف از نقش سیمان و آهک در تغییر رفتار خاک، نمونه‌هایی تحت عنوان RLCC^{۱۸} و به‌عنوان باتارد مسلح (خاک تثبیت‌شده با آهک و سیمان و مسلح با الیاف لاستیک فرسوده) در جدول (۴) نام‌گذاری شده است. جهت ساخت نمونه‌ها ابتدا خاک ریزدانه و الیاف (در صورت وجود با توجه به طرح اختلاط) به‌صورت خشک به‌مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط شده و سپس دوغاب سیمان و آهک به‌همراه آب لازم با توجه به طرح اختلاط ذکرشده در بالا که به‌مدت ۳ دقیقه کاملاً با هم مخلوط شده بودند، به مواد موردنظر اضافه گردید. سپس کلیه نمونه‌ها پس از جای گرفتن در قالب، به‌مدت ۷۲ ساعت و در شرایط محیط (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) جهت گیرش اولیه نگهداری شدند. پس از گذشت سه شبانه‌روز از قالب‌گیری، تمامی نمونه‌ها از قالب بیرون آمده، درون غشای پلاستیکی عاری از هوا (به‌منظور از دست ندادن رطوبت و عمل‌آوری مطلوب) قرار داده شده و نیمی از آن‌ها به‌مدت ۳ و ۲۱ روز در گرم‌کن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و نیم دیگر به‌مدت ۱۴ و ۲۸ روز در گرم‌کن با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند.

در پژوهش حاضر از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری منطبق بر استاندارد ASTM D2166 به‌عنوان یک معیار سنجش در خصوص مطالعه مشخصات رفتاری باتارد مسلح استفاده شده است (ASTM D-2166, ۲۰۱۳). برای تمامی تست‌ها سه نمونه با مشخصات کاملاً مشابه (از لحاظ درصد مواد تشکیل‌دهنده، سن و شرایط عمل‌آوری) ساخته و تست شد. جهت انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، از دستگاه سه‌محوری با فشار همه‌جانبه صفر استفاده شد. به‌منظور تست خاک فاقد تثبیت‌کننده از رینگ با ظرفیت ۳kN و جهت تست نمونه‌های باتارد، که دارای سیمان و آهک بودند از رینگ با ظرفیت بالاتر تا حد ۲۰kN استفاده گردید.

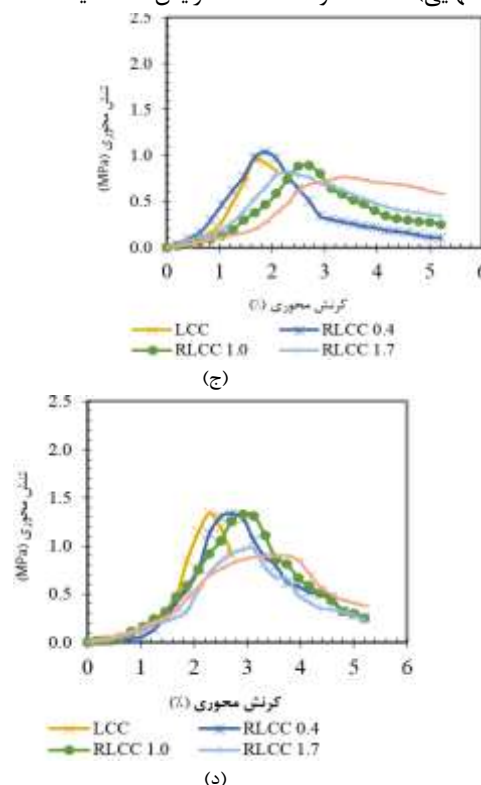
21. Cement Concrete
22. Lime Cement Concrete

18. Reinforced Lime Cement Concrete
19. Soil
20. Lime Concrete

و تأثیر سن عمل‌آوری به‌عنوان عامل تأثیرگذار دیگر بر رفتار خاک کاملاً مشهود است. شکل (۳) تأثیر سن عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سن عمل‌آوری مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته و این افزایش به صورت غیرخطی است، به نحوی که در سنین اولیه سرعت رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها بیشتر از سنین بالاتر است. این امر بدان علت است که اکثر واکنش‌های پوزولانی که سبب اتصال دانه‌های خاک به یکدیگر شده در سنین اولیه اتفاق افتاده و هر چه سن نمونه بیشتر می‌شود از شدت این واکنش‌ها کاسته شده و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها با سرعت کمتری رخ داده است. Zhang و همکاران در سال ۲۰۲۲ نتایج مشابهی در تثبیت خاک رس با آهک را گزارش کرده‌اند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲). پارامترهای گوناگون حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری برای کلیه نمونه‌های، در سنین متفاوت و شرایط گوناگون عمل‌آوری در جدول (۵) و جدول (۶) آورده شده است.

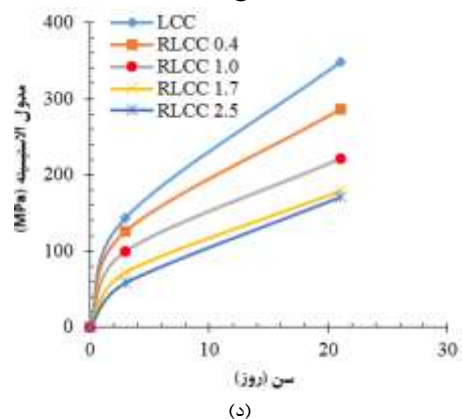
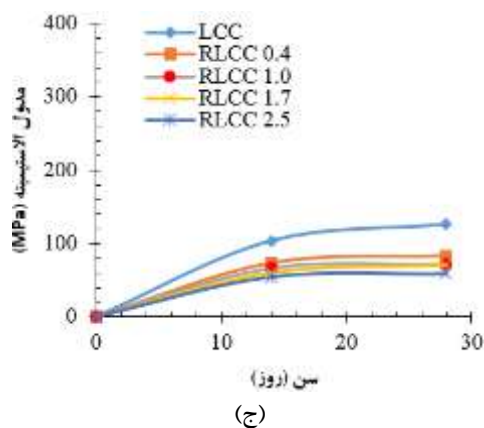


صورت استفاده از سیمان این افزایش بیشتر شده و رفتار خاک نیز تردتر شده است. همچنین مشاهده می‌شود در صورت استفاده هم‌زمان از آهک و سیمان در طرح اختلاط و تولید ملات باتارد، مقاومت فشاری تک‌محوری (نسبت به استفاده از سیمان و یا آهک به تنهایی) نمونه‌ها افزایش یافته است.



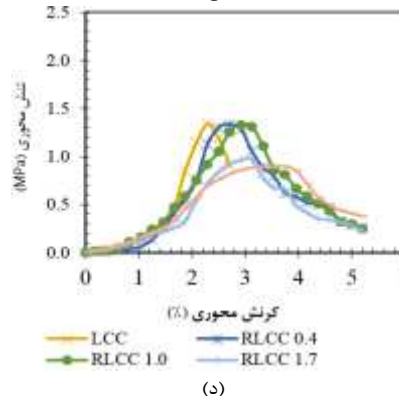
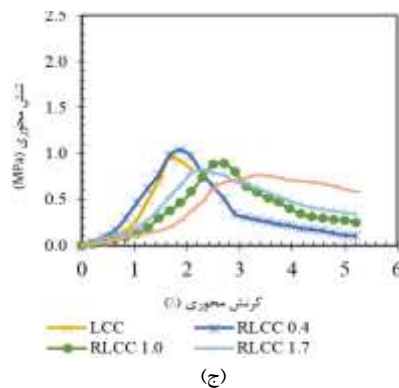
همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (LCC) ۲۸ روزه، ۳۸٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر ۱۴ روزه و پارامتر موردنظر در نمونه‌های ۲۱ روزه ۵۰٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر ۳ روزه بوده

در نمونه‌های ۲۱ روزه ۵۰٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر ۳ روزه بوده

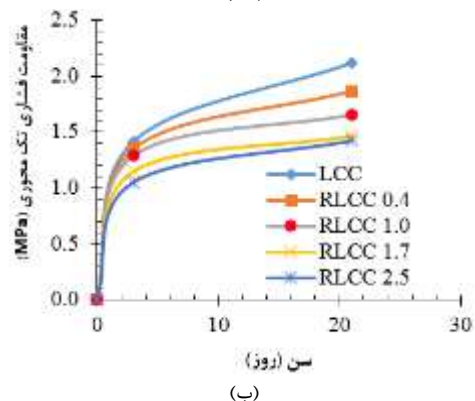
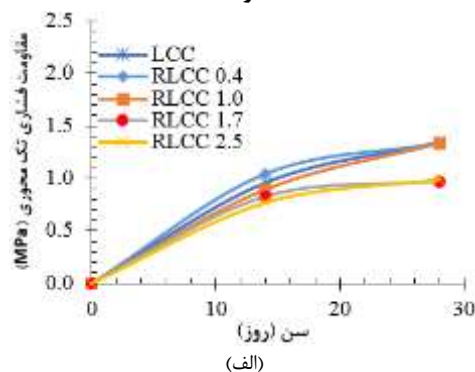


شکل ۳- تأثیر سن عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها: الف - ج) عمل آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ب - د) عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

با توجه به جداول موردنظر مشاهده می‌شود با افزایش میزان الیاف در طرح اختلاط اگرچه در بعضی حالات افزایش ناچیزی در مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها دیده شده است اما روند کلی به این صورت بوده که با افزایش میزان الیاف از مقاومت فشاری نمونه‌ها کاسته شده است. این پدیده بدین علت است که با افزایش میزان الیاف در بین ذرات خاک و مواد چسباننده، الیاف سبب دور شدن ذرات خاک و مواد چسباننده از یکدیگر شده و در نقاطی رشته‌های الیاف با یکدیگر در تماس قرار گرفته‌اند. با توجه به این- که چسبندگی بین رشته‌های الیاف با یکدیگر کمتر از چسبندگی بین الیاف و ذرات خاک و مواد چسباننده است، وجود الیاف سبب کاهش اتصال دانه‌ها به یکدیگر شده است. این روند با نتایج حاصل از تحقیقات Valipour و همکاران مطابقت دارد (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). روند کاهش مقاومت فشاری تک محوری با افزایش میزان الیاف در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۲- دیاگرام‌های تنش - کرنش: الف) نمونه‌های ۳ روزه عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ب) نمونه‌های ۲۱ روزه عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ج) نمونه‌های ۱۴ روزه عمل آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، د) نمونه‌های ۲۸ روزه عمل آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد



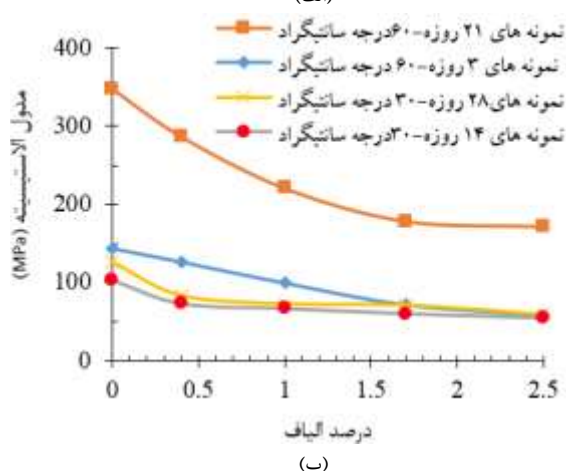
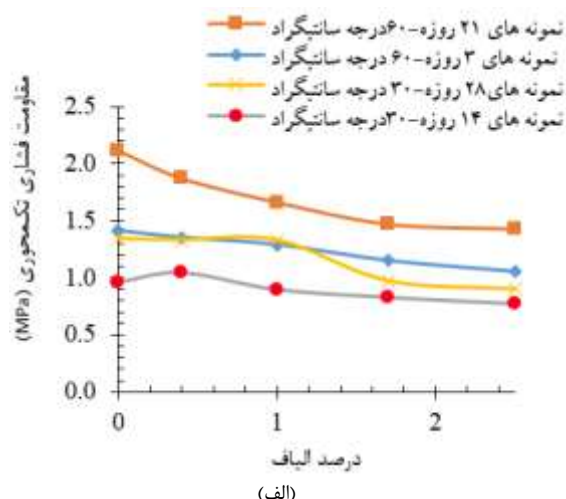
۰/۷۶۸	۵۴/۵۹	۳/۳۳۱	۱/۹۹۸	۱۴	۲/۵
۱/۳۴۲	۱۲۵/۷۳	۲/۲۹۰	۱/۰۰۰	۲۸	۰
۱/۳۳۱	۸۳/۰۰	۲/۷۰۷	۱/۱۸۲	۲۸	۰/۴
۱/۱۳۰	۷۲/۳۶	۲/۹۱۵	۱/۲۷۳	۲۸	۱
۰/۹۷۰	۷۰/۸۴	۳/۱۲۳	۱/۳۶۴	۲۸	۱/۷
۰/۸۹۸	۵۸/۸۳	۳/۷۴۸	۱/۶۳۷	۲۸	۲/۵

جدول ۶- پارامترهای مکانیکی محاسبه شده حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف الیاف و در شرایط نگهداری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

الیاف (%)	سن عمل‌آوری (روز)	I_d	ϵ_f (%)	E_s (MPa)	q_u (MPa)
۰	۳	۱/۰۰۰	۱/۶۶۷	۱۴۳/۲۵	۱/۴۱
۰/۴	۳	۱/۱۲۴	۱/۸۷۴	۱۲۵/۹۷	۱/۳۵
۱	۳	۱/۲۴۹	۲/۰۸۲	۹۹/۲۵	۱/۲۹
۱/۷	۳	۱/۶۲۴	۲/۷۰۷	۷۱/۴۵	۱/۱۵
۲/۵	۳	۱/۷۴۹	۲/۹۱۵	۵۸/۱۲	۱/۰۵
۰	۲۱	۱/۰۰۰	۱/۸۷۴	۳۴۷/۸۵	۲/۱۱
۰/۴	۲۱	۱/۰۵۵	۱/۹۷۸	۲۸۶۰/۷۵	۱/۸۷
۱	۲۱	۱/۱۰۴	۲/۰۶۹	۲۲۰/۶۱	۱/۶۶
۱/۷	۲۱	۱/۱۱۱	۲/۰۸۲	۱۷۸/۳۱	۱/۴۷
۲/۵	۲۱	۱/۵۵۵	۲/۹۱۵	۱۷۱/۵۷	۱/۴۲

۴-۲- مدول الاستیسیته

در پژوهش حاضر جهت تعیین مدول الاستیسیته مصالح، از شیب دیاگرام تنش- کرنش در ناحیه خطی استفاده شده است (Tang و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به شکل (۱) مدول الاستیسیته خاک بکر (نمونه شاهد و کنترل ۱ موجود در جدول (۴)) ۹/۵۶ Mpa است. همچنین مشاهده می‌شود با افزودن ۳٪ آهک به خاک، مدول الاستیسیته با افزایش چشمگیری همراه بوده و اگر به جای ۳٪ آهک از ۴٪ سیمان استفاده شود، این افزایش به مراتب بیشتر است. در حالی که نمونه‌های دارای ۳٪ آهک و ۴٪ سیمان دارای مدول الاستیسیته‌ای کمتر از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با آهک می‌باشند. به عبارت دیگر نمونه‌های تیپ LC، CC، و LCC موجود در شکل (۱) به ترتیب دارای مدول الاستیسیته ۴۰/۱، ۹۱/۳ و ۶۷/۴ Mpa می‌باشند. نمونه‌های (LCC) ۱۴ و ۲۸ روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و ۳ و ۲۱ روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) به ترتیب دارای مدول الاستیسیته ۱۰۳/۲، ۱۰۳/۲، ۱۲۵/۷، ۱۴۳/۳ و ۳۴۷/۹ بوده که به ترتیب ۱۰/۸، ۱۳/۲، ۱۵ و ۳۶/۴ برابر نمونه شاهد و کنترل شماره (۱) است. همان‌طور که در شکل (۳-ج) و شکل (۳-د) مشاهده می‌شود، با افزایش سن عمل‌آوری مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است و این افزایش در سنین کمتر، بیشتر بوده و همانند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری در اثر افزایش سن عمل‌آوری، روندی غیرخطی را دنبال می‌کند. به طوری که مدول الاستیسیته نمونه‌های (LCC)



شکل ۴- تأثیر میزان الیاف مورد استفاده در طرح اختلاط بر: الف) مقاومت فشاری تک‌محوری، ب) مدول الاستیسیته نمونه‌های باتارد مسلح با الیاف لاستیک فرسوده

با توجه به داده‌های موجود در جدول (۵) و جدول (۶) مشاهده می‌شود، درجه حرارت عمل‌آوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در رفتار مواد بوده به طوری که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (LCC) که ۳ و ۲۱ روز در دمای ۶۰ سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۵۸ برابر نمونه‌های متناظر ۲۸ روزه عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد است.

جدول ۵- پارامترهای مکانیکی محاسبه شده حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف الیاف و در شرایط نگهداری در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

الیاف (%)	سن عمل‌آوری (روز)	I_d	ϵ_f (%)	E_s (MPa)	q_u (MPa)
۰	۱۴	۱/۰۰۰	۱/۶۶۷	۱۰۳/۲۱	۰/۹۷۵
۰/۴	۱۴	۱/۱۲۴	۱/۸۷۴	۷۳/۰۱	۱/۰۴۱
۱	۱۴	۱/۶۲۴	۲/۷۰۷	۶۶/۶۹	۰/۸۹۳
۱/۷	۱۴	۱/۷۴۹	۲/۹۱۵	۶۰/۱۶	۰/۸۲۵

مقایسه با نمونه‌های LCC، رفتار مصالح را شکل پذیرتر کرده است. به عنوان مثال کرنش گسیختگی در نمونه‌های RLCC سه روزه (که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده) و حاوی ۰/۴٪، ۱/۱٪، ۱/۷٪ و ۲/۵٪ الیاف لاستیک فرسوده، به ترتیب ۱/۸۷۴٪، ۲/۰۸۲٪، ۲/۷۰۷٪ و ۲/۹۱۵٪ بوده در حالی که کرنش گسیختگی برای نمونه LCC (فاقد الیاف) سه روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، برابر ۱/۶۶۷٪ مشاهده شده است.

۴-۴- شاخص شکل پذیری

یکی از پارامترهایی که رفتار تغییر شکل پذیری خاک و سنگ را مشخص می‌کند، شاخص شکل‌پذیری است که با معادله (۱) محاسبه می‌شود (Kim و Kim، ۲۰۱۱؛ Karaca و Onargan، ۲۰۱۲).

$$I_d = \frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{cu}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، I_d شاخص شکل‌پذیری مصالح در اثر استفاده از الیاف بوده و ϵ_{ct} و ϵ_{cu} به ترتیب کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح می‌باشد. هرچه شاخص شکل‌پذیری بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده اختلاف بیشتر بین کرنش گسیختگی در نمونه مسلح نسبت به نمونه فاقد عوامل تسلیح است. به عبارت دیگر هرچه مصالح در اثر تحمل نیروهای وارده رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان دهد، مقدار شاخص شکل‌پذیری آن نیز بیشتر است. شکل (۵) تأثیر سن عمل‌آوری بر شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵-الف) و (۵-ب) می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش میزان الیاف، شاخص شکل‌پذیری افزایش پیدا کرده است. از طرفی نقش رطوبت مواد و مصالح به عنوان نقشی انکارناپذیر در رفتار آن‌ها در اشکال فوق‌الذکر قابل مشاهده است. به نحوی که در نمونه‌های ۱۴ روزه به دلیل داشتن رطوبت بیشتر نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه، شکل‌پذیری بیشتر است و این روند در مقایسه نمونه‌های ۳ روزه و ۲۱ روزه نیز مشاهده شده که نتایج در شکل (۵)، جدول (۵) و جدول (۶) آورده شده است.

با توجه به شکل (۲) می‌توان گفت، نمونه‌های RLCC نسبت به نمونه‌های LCC رفتاری شکل‌پذیرتر داشته و وجود الیاف سبب شده تا پس از گسیختگی نمونه نیز، ذرات خاکی که از هم جدا شده‌اند به کمک الیاف ارتباط خود با یکدیگر را حفظ نموده و نمونه‌ها پس از گسیختگی با افت مقاومت کمتری مواجه شوند و هرچه مقدار الیاف موجود در خاک بیشتر شده کاهش مقاومت پس از گسیختگی کمتر شده است. با توجه به اینکه رشته‌های الیاف به صورت تصادفی در درون نمونه‌ها پخش شده‌اند، وجود الیاف سبب شده تا عرض ترک‌ها کنترل شده و ترک‌هایی که در

۲۸ روزه، ۱/۲۲ برابر نمونه‌های ۱۴ روزه و مدول الاستیسیته نمونه‌های ۲۱ روزه، ۲/۴۳ برابر نمونه‌های سه روزه است. همچنین دمای عمل‌آوری به عنوان یک پارامتر بسیار مهم و تأثیرگذار بر مدول الاستیسیته مصالح می‌باشد. با توجه به جدول (۵) و جدول (۶) مدول الاستیسیته نمونه ۳ و ۲۱ روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، به ترتیب ۱۴٪ و ۱۷۷٪ بیشتر از نمونه ۲۸ روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد) است. در شکل (۴) تأثیر میزان الیاف لاستیک فرسوده بر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها نشان داده شد است. با توجه به شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف به طرح اختلاط، مدول الاستیسیته نمونه‌ها در تمامی گروه‌ها کاهش یافته است و این روند کاهش با تحقیقات Duan و همکاران مطابقت دارد (Duan و Zhang، ۲۰۱۹). با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود افزودن ۰/۴٪ الیاف به طرح اختلاط در نمونه‌های ۱۴ روزه (عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد) سبب شده تا مدول الاستیسیته با کاهش روبه‌رو شده و از مقدار ۱۰۳/۲ Mpa برای نمونه‌های فاقد الیاف (کنترل شماره (۲)) به ۷۳ Mpa برسد، در حالی که در نمونه‌های ۲۸ روزه، مدول الاستیسیته با کاهش ۴۲/۷ Mpa از مقدار ۱۲۵/۷ Mpa برای نمونه‌های غیرمسلح به مقدار ۸۳ Mpa برای نمونه‌های مسلح شده با ۰/۴٪ الیاف رسیده است. نمونه‌های ۲۱ روزه غیرمسلح (عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) بیشترین مدول الاستیک (۳۴۷/۹ Mpa) و نمونه با ۲/۵٪ الیاف (که به مدت ۱۴ روز در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده است) کمترین مدول الاستیک (۵۴/۶ Mpa) را دارا بوده که به ترتیب ۳۶/۴ و ۵/۷ برابر نمونه کنترل ۱ است.

۴-۳- کرنش گسیختگی

کرنش گسیختگی ϵ_f به عنوان کرنش متناظر با مقاومت فشاری تک‌محوری (کرنش متناظر با تنش حداکثر در دیاگرام تنش-کرنش) می‌باشد و بعضاً به عنوان شاخصی جهت مشخص نمودن رفتار ترد شکنی و یا شکل‌پذیری مصالح در بارگذاری مصالح به کار می‌رود. هرچه کرنش گسیختگی در مصالح بیشتر شود، نشان‌دهنده آن است که مصالح موردنظر رفتاری شکل‌پذیرتر داشته‌اند. در شکل (۱) کرنش گسیختگی در نمونه‌های Soil، CC، LC و LCC به ترتیب ۲/۴۵٪، ۱/۶۹٪، ۱/۴۶٪ و ۲/۰۸٪ است. کوچک‌تر بودن کرنش گسیختگی در نمونه‌های تثبیت‌شده، نسبت به نمونه Soil بدان علت است که وجود واکنش‌های پوزولانی و پیوند قوی بین ذرات خاک سبب رفتار تردتر، در نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه Soil شده است. اثر هم‌زمان استفاده از الیاف و تثبیت با سیمان و آهک در شکل (۲) نشان داده شده است. با مقایسه گراف‌های شکل (۲) و اعداد موجود در جدول (۵) و جدول (۶) مشاهده می‌شود استفاده از الیاف در نمونه‌های RLCC در

(ب)

شکل ۵- تأثیر میزان الیاف بر: الف) شاخص شکل پذیری نمونه‌ها، (دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، ب) شاخص شکل پذیری نمونه‌ها (دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد)

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر آزمایش‌های متعدد مقاومت فشاری تک-محوری به منظور مطالعه تأثیر سن، درجه حرارت عمل‌آوری و میزان الیاف بر پارامترهای ژئوتکنیکی باتارد مسلح صورت پذیرفت. تأثیر متغیرهای مذکور بر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، کرنش گسیختگی و شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها بررسی شد. نتایج شاخص حاصل از آزمایشات فوق به شرح ذیل بیان می‌گردند:

۱- سن عمل‌آوری به‌عنوان یکی از عوامل بسیار مهم در تغییر رفتار مصالح است. به‌طوری‌که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (LCC) ۲۸ روزه، ۳۸٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر ۱۴ روزه و پارامتر موردنظر در نمونه‌های ۲۱ روزه ۵۰٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر ۳ روزه است. همچنین مدول الاستیسیته نمونه‌های (LCC) ۲۸ روزه، ۱/۲۲ برابر نمونه‌های ۱۴ روزه و مدول الاستیسیته نمونه‌های ۲۱ روزه، ۲/۴۳ برابر نمونه‌های ۳ روزه به‌دست‌آمده است.

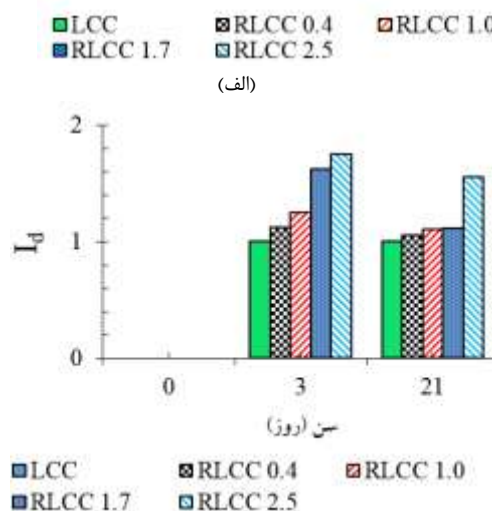
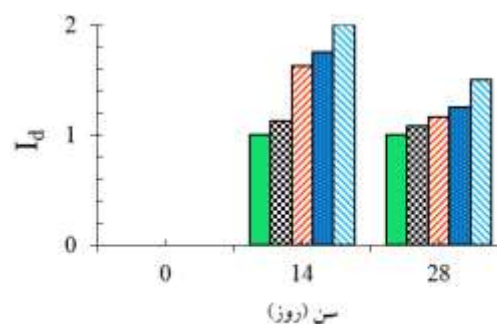
۲- درجه حرارت عمل‌آوری به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در رفتار مواد بوده به‌طوری‌که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (LCC) که ۳ و ۲۱ روز در دمای ۶۰ سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۵۸ برابر نمونه‌های متناظر ۲۸ روزه عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین مدول الاستیسیته نمونه‌های موردنظر ۱۴٪ و ۱۷۷٪ بیشتر از نمونه‌های (LCC) ۲۸ روزه می‌باشد.

۳- حضور الیاف سبب افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها شده است، به‌طوری‌که کرنش گسیختگی در نمونه‌های (RLCC) ۳ روزه مسلح با ۲/۵٪ الیاف لاستیک فرسوده، ۱/۷۵ برابر نمونه‌های (LCC) ۳ روزه فاقد الیاف است. وجود الیاف در خاک تثبیت‌شده سبب کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری شده و افزایش مقدار آن‌ها موجب شده تا افت مقاومت پس از گسیختگی کاهش یافته و مدول الاستیسیته (سختی) نمونه‌ها کاهش یابد.

۴-۴ نقش الیاف در کنترل عرض ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها به‌عنوان عاملی مؤثر در تغییر رفتار مصالح از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر بوده و رفتار آن را از رفتار کرنش نرم‌شونده به کرنش سخت‌شونده تغییر داده است.

۵- تأثیر وجود تثبیت‌کننده‌هایی نظیر سیمان و آهک در بالا

نمونه‌ها و در اثر نیروهای وارده به‌وجود می‌آیند، با گسترش کمتری ظاهر شده و همین امر سبب افزایش شکل‌پذیری گردیده است. همچنین با توجه به شکل (۲) مقاومت نهایی ماندگار (مقاومت فشاری تک‌محوری در کرنش‌های حدود ۵٪) نمونه‌های RLCC با افزایش مقدار الیاف بیشتر شده است و پس از گسیختگی، کاهش تنش در نمونه‌ها به‌صورت تدریجی رخ داده است. با توجه به آزمایشات انجام شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که استفاده از الیاف به‌خوبی توانسته است رفتار مصالح را شکل‌پذیرتر کرده و سبب شود گسیختگی در کرنش‌های بالاتری به وقوع بپیوندد. به‌عبارت‌دیگر با توجه به شکل (۲) و مقایسه با شکل (۱) که در آن دیاگرام تنش-کرنش خاک بکر نمایش داده شده است؛ می‌توان گفت که الیاف در کنار سیمان و آهک به نحو مطلوبی سبب شده‌اند تا گسیختگی در کرنش‌های بزرگ‌تری به وقوع بپیوندد و همین امر نشان‌دهنده این است که استفاده از الیاف در کنار تثبیت خاک به‌عنوان روشی نوین که مزایای تثبیت و تسلیح را در کنار هم دارد می‌تواند در پروژه‌هایی که هدف آن‌ها بهبود پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری خاک به‌صورت هم‌زمان است مورد استفاده قرار گیرد. به‌عبارت‌دیگر استفاده از الیاف، افزایش شکل‌پذیری و استفاده از تثبیت، افزایش پارامترهای مقاومتی خاک را به‌دنبال دارد. همچنین با افزایش میزان الیاف در توده خاک، رفتار مصالح از حالت کرنش نرم‌شوندگی به سمت کرنش سخت‌شوندگی سوق پیدا کرده و رفتار مصالح شکل‌پذیرتر شده است.



- mechanical characteristics of the palm fiber reinforced clay", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 17, 47-54.
- Bekhiti M, Trouzine H, Rabehi M, "Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil", *Construction and Building Materials*, 2019, 208, 304-313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.011>.
- Butt WA, Mir BA, Jha JN, "Strength behavior of clayey soil reinforced with human hair as a natural fibre", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34 (1), 411-417. URL: <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9953-x>.
- Chaduvula U, Viswanadham BVS, Kodikara J, "A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay", *Applied Clay Science*, 2017, 142, 163-172.
- Chandra S, Viladkar MN, Nagrale PP, "Mechanistic approach for fiber-reinforced flexible pavements", *Journal of Transportation Engineering*, 2008, 134, 1, 15-23. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2008\)134:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:1(15)).
- Chen M, Shen SL, Arulrajah A, Wu HN, Hou DW, Xu YS, "Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43 (6), 515-523. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.05.004>.
- Consoli NC, Montardo JP, Donato M, Prietto PDM, "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites", *Ground Improvement*, 2004, 8 (2), 77-90. URL: <https://doi.org/10.1680/grim.8.2.77.36370>.
- Consoli NC, de Moraes RR, Festugato L, "Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils", *Geosynthetics International*, 2011a, 18 (2), 57-62. URL: <https://doi.org/10.1680/gein.2011.18.2.57>.
- Consoli NC, Prietto PDM, Ulbrich LA, "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124 (12), 1211-1214. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1998\)124:12\(1211\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1998)124:12(1211)).
- Consoli NC, Vendruscolo MA, Prietto PDM, "Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129 (1), 96-101. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2003\)129:1\(96\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:1(96)).
- Consoli NC, Zortéa F, de Souza M, Festugato L, "Studies on the dosage of fiber-reinforced cemented soils", *Journal of materials in civil engineering*, 2011b, 23, 12, 1624-1632.
- Cui H, Jin Z, Bao X, Tang W, Dong B, "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms", *Construction and Building Materials*, 2018, 189, 286-295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>.
- بردن مقاومت نمونه‌ها به‌طور مشهودی قابل‌ملاحظه است، به‌نحوی که مقاومت فشاری نمونه‌های (LCC) ۱۴ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۸/۶۰ و ۱۲/۰۶ برابر خاک بکر و مقاومت فشاری نمونه‌های (LCC) ۳ و ۲۱ روزه عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۱۲/۶۹ و ۱۸/۹۹ برابر خاک بکر است.
- ۶- الیاف توانسته‌اند، شکل‌پذیری مطلوبی به نمونه‌ها داده و از شکست ترد آن‌ها جلوگیری نمایند بنابراین استفاده از الیاف در کنار تثبیت خاک روشی است که مزایای تسلیح و تثبیت را در کنار هم دارا بوده و از این روش می‌توان در پروژه‌های عمرانی " که نیاز به بهسازی خاک است استفاده کرد.
- ### ۶- مراجع
- Abbaspour M, Aflaki E, Moghadas Nejad F, "Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement", *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207, 1059-1071. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>.
- Akbulut S, Arasan S, Kalkan E, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, 2007, 38, 1-2, 23-32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.02.001>.
- Arulrajah A, Kua TA, Suksiripattanapong C, Horpibulsuk S, Shen JS, "Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds-bagasse ash based geopolymers with slag supplements", *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162, 1491-1501. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.171>.
- Arulrajah A, Mohammadinia A, Maghool F, Horpibulsuk S, "Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications", *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230, 129-136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.084>.
- ASTM D-2166, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", 2013, ASTM International.
- ASTM D 854-10, "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", 2010, ASTM International.
- ASTM D422-63, "Standard method for particle-analysis of soils", 2002, ASTM International.
- ASTM D423-66, "Standard Test Method of Test for Liquid Limit of Soil", 1972, ASTM International.
- ASTM-D1557-07, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort, (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", 2007, ASTM International.
- ASTM-D424-54, "Standard method of test for plastic limit", 1982, ASTM International.
- Ayeldeen M, Kitazume M, "Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45 (6), 592-602.
- Azadegan O, Kaffash EA, Yaghoubi MJ, Pourebrahim GR, "Laboratory study on the swelling, cracking and

- Jahandari S, Toufigh MM, Li J, Saberian M, "Laboratory Study of the Effect of Degrees of Saturation on Lime Concrete Resistance Due to the Groundwater Level Increment", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36 (1), 413-424. URL: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0335-4>.
- Kafodya I, Okonta F, "Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil", *Construction and Building Materials*, 2018, 170, 737-746. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.194>.
- Kalkan E, "Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils", *Applied Clay Science*, 2013, 80-81, 117-125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.014>.
- Karaca Z, Onargan T, "A new approach to stone deformation: Stone deformability index. Proceedings of Institution of Civil Engineers", *Construction Materials*, 2012, 165 (3), 189-195. URL: <https://doi.org/10.1680/coma.9.00031>.
- Kim TH, Kim YS, "Unconfined compressive strength and micro-structural properties of cemented sand and gravel materials", *Scientific Research and Essays*, 2011, 6 (4), 933-948.
- Kirsch K, Bell A, "Ground improvement", CRC Press, 2012.
- Koerner RM, "Designing with geosynthetics-Vol. 1", Xlibris Corporation, 2012.
- Kua TA, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Du YJ, Suksiripattanapong C, "Engineering and environmental evaluation of spent coffee grounds stabilized with industrial by-products as a road subgrade material", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19 (1), 63-75. URL: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1188-x>.
- Mirzababaei M, Miraftab M, Mohamed M, McMahon P, "Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139 (3), 483-493. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000792).
- Mohajerani A, Burnett L, Smith JV, Markovski S, Rodwell G, Rahman MT, Kurmus H, Mirzababaei M, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Maghool F, "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 155, 104679. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- Mohammadinia A, Disfani MM, Narsilio GA, Aye L, "Mechanical behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates", *Construction and Building Materials*, 2018, 168, 794-804. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.179>.
- Morin MA, Ficarazzo F, "Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz-Ram model", *Computers and Geosciences*, 2006, 32 (3), 352-359. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.06.022>.
- Mukherjee K, Mishra AK, "Hydro-Mechanical Properties of Sand-Bentonite-Glass Fiber Composite for
- Dang LC, Fatahi B, Khabbaz H, "Behaviour of Expansive Soils Stabilized with Hydrated Lime and Bagasse Fibres", *Procedia Engineering*, 2016, 143, 658-665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.093>.
- Das BM, "Advanced Soil Mechanics", CRC press, 2013, URL: <https://doi.org/10.1201/b15955>.
- Duan X, Zhang J, "Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 9561794. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/9561794>.
- Edinçlıler A, Cagatay A, "Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions", *Geosynthetics International*, 2012, 20 (1), 39-46. URL: <https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>.
- Ehrlich M, Almeida S, Curcio D, "Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner", *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 47 (1), 42-47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.005>.
- Fatahi B, Khabbaz H, Fatahi B, "Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement", *Geosynthetics International*, 2012, 19 (3), pp. 252-262. URL: <https://doi.org/10.1680/gein.12.00012>.
- Festugato L, Peccin da Silva A, Diambra A, Consoli NC, Ibraim E, "Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (2), 155-165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.11.003>.
- Gao L, Zhou Q, Yu X, Wu K, Mahfouz AH, "Experimental study on the unconfined compressive strength of carbon fiber reinforced clay soil", *Marine Georesources and Geotechnology*, 2017, 35 (1), 143-148. URL: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2015.1102184>.
- Hataf N, Rahimi MM, "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", *Construction and Building Materials*, 2006, 20 (10), 910-916. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.019>.
- Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers", *Construction and Building Materials*, 2012, 30, 100-116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>.
- Jafari M, Esna-ashari M, "Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition", *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82, 21-29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.012>.
- Jahandari S, Saberian M, Zivari F, Li J, Ghasemi M, Vali R, "Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 13 (2), 172-183.

- 4.
- Thompson MS, "Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures", *Highway Research Record*, 1966, 139, 1-14.
- Valipour M, Shourijeh PT, Mohammadinia A, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, 100474. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>.
- Wei L, Chai SX, Zhang HY, Shi Q, "Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber", *Construction and Building Materials*, 2018, 172, 300-308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>.
- Yetimoglu T, Salbas O, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21 (2), 103-110. URL: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7).
- Yixian W, Panpan G, Shengbiao S, Haiping Y, Binxiang Y, "Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34 (4), 1079-1088.
- Zhang Y, Gan Liu S, hong Deng G, Fang B, Xin Zhang Y, yi Lu Y, "Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of clay-gravel mixtures", *Journal of Mountain Science*, 2022, 19 (12), 3615-3626. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7317-6>.
- Landfill Application", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23 (11), 4631-4640. URL: <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2015-9>.
- Narani SS, Abbaspour M, Mir Mohammad Hosseini SM, Aflaki E, Moghadas Nejad F, "Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers", *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247, 119151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>.
- Park SS, "Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27 (2), 162-166. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.09.001>.
- Patel SK, Singh B, "Shear Strength and Deformation Behaviour of Glass Fibre-Reinforced Cohesive Soil with Varying Dry Unit Weight", *Indian Geotechnical Journal*, 2019, 49 (3), 241-254. URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0323-5>.
- Saberian M, Li J, Kilmartin-Lynch S, Boroujeni M, "Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase", *Science of the Total Environment*, 2021, 769, 145527. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145527>.
- Saberian M, Mehrinejad Khotbehsara M, Jahandari S, Vali R, Li J, "Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 12, 4, 347-356.
- Saberian M, Rahgozar MA, "Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips in combination with gypsum, lime or cement", *Mires and Peat*, 2016, 18. URL: <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.211>.
- Sirivitmaitrie C, Puppala A, Saride S, Hoyos L, "Combined lime-cement stabilization for longer life of low-volume roads", *Transportation Research Record*, 2011, 2204, 140-147. URL: <https://doi.org/10.3141/2204-18>.
- Sivakumar Babu GL, Vasudevan AK, "Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20 (9), 571-577.
- Suksiripattanapong C, Kua TA, Arulrajah A, Maghool F, Horpibulsuk S, "Strength and microstructure properties of spent coffee grounds stabilized with rice husk ash and slag geopolymers", *Construction and Building Materials*, 2017, 146, 312-320. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.103>.
- Suksiripattanapong C, Srijumpa T, Horpibulsuk S, Sukmak P, Arulrajah A, Du YJ, "Compressive strengths of water treatment Sludge-fly ash geopolymer at various compression energies", *Lowland Technology International*, 2015, 17 (3), 147-156. URL: https://doi.org/10.14247/Lti.17.3_147.
- Tang L, Cong S, Geng L, Ling X, Gan F, "The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils", *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145, 197-207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.00>

EXTENDED ABSTRACT

Laboratory Study of the Effect of Age, Temperature, and Fiber Content on the Behavior of Environmentally Friendly Reinforced Lime-Cement Concrete (RLCC)

Mohammad Mostafa Jafari^{a,*}, Mohammad Hossein Bagheripour^b

^a Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Received: 01 September 2021; **Review:** 09 March 2022; **Accepted:** 04 April 2022

Keywords:

Reinforced Lime-Cement-Concrete (RLCC), Curing age, Recycled Tire Polymer Fibers (RTPF), Uniaxial Compressive Strength (UCS), Modulus of elasticity.

1. Introduction

Current research has tried to study the effects of curing ages, curing temperature and Recycled Tire Polymer Fibers (RTPF) content on geotechnical properties of RLCC, such as unconfined compressive strength (UCS), secant modulus (E_s), strain failure (ϵ_f) and deformability index (I_d). The UCS test is a criterion to estimate the geotechnical parameters of RLCC samples in the presented research.

2. Methodology, sample preparation and testing

2.1. Methodology

In this study, cylindrical soil, Lime Concrete (LCC) and RLCC specimens were prepared with different fiber contents and cured in different curing conditions and periods.

Table 1 shows the name, curing times, and curing conditions for all specimens. However, following the mix design used in a recent research conducted by the authors on LCC (Jahandari et. al., 2019), the percentages of cement and lime in all specimens were kept constant at 4% and 3% of the dry weight of clayey soil, respectively. The water content was 24% of the total dry weight of the soil, cement, and lime in the mixture. The fibers were added to the mixes at 0%, 0.4%, 1%, 1.7% and 2.5% of the total dry weight of clayey soil, cement, and lime mixture.

2.2. Sample preparation

In order to prepare the specimens, clay soil and fibers were properly mixed together. The lime-cement slurry was made by mixing lime and cement with water content that amount of them is indicated in Table1. Then, the lime-cement slurry was added to the mixture of soil and fibers. The process of mixing was continued by an automatic mixer for 3 minutes until a homogeneous material was attained. The fresh mixture was poured into cylindrical molds with a diameter of 60 mm and a height of 120 mm. It should be noted that because of adopting a relatively high workability to represent the typical condition of RLCC and LCC in the real projects, the mixture could be properly placed in the molds without any vibration or compaction.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.m.jafari@gmail.com (mohammad mostafa jafari), bagheri@uk.ac.ir (Mohammad hossein bagheripour).

Table 1. Name and specification of the specimens.

Specimen	Lime (%)	Cement (%)	Water (%)	Fiber (%)	Curing temp. (°C)		Number of specimens
					30	60	
					Curing time (days)		
Soil (control 1)	0	0	24	0	14	3	2x3
LC	3	0	24	0	28, 14	-	2x3
CC	0	4	24	0	28, 14	-	2x3
LCC (control 2)	3	4	24	0	28, 14	21, 3	4x3
RLCC 0.4	3	4	24	0.4	28, 14	21, 3	4x3
RLCC 1.0	3	4	24	1.0	28, 14	21, 3	4x3
RLCC 1.7	3	4	24	1.7	28, 14	21, 3	4x3
RLCC 2.5	3	4	24	2.5	28, 14	21, 3	4x3

2.3. Testing

Three replicate specimens were prepared for each mix design, curing conditions and periods to ensure the accuracy of the test results. After 72 hours of RLCC casting, the specimens were demolded and then placed in a plastic bags to avoid significant variations in the moisture. Half of the samples were cured for 3 or 21 days at a temperature of 60 °C in oven, and the rest were cured for 14 or 28 days in oven at a temperature of 30 °C. After curing, the uniaxial compression tests with the loading rate of 1 mm/min were carried out on the samples. Three tests were conducted for each condition, and the average values were calculated and reported.

3. Results and discussion

3.1. Failure pattern

Fig. 1 shows the failure patterns of the control 2 and RLCC samples. The LCC without fibers had diagonal cracks and gradually expanded towards the middle of the sample. Therefore, the LCC surface clod spalled off, leading to a vivid brittle failure. For RLCC samples with 0.4% or 1.7% fibers, the crack width became much smaller with increasing fiber content. The uniformly dispersed fibers in RLCC created mesh constraint on soil particles. Thus, the crack initiation and development were inhibited. By adding extra fibers (2.5%) to the RLCC, the fibers agglomerated in the RLCC. The reason was due to developing cracks in RLCC and destroying the RLCC gradually from the fiber agglomeration that the frictional resistance between fibers is smaller as compared with that between fiber and soil particle. (Duan and Zhang, 2019) also reported a similar failure pattern.



Fig. 1. A view of typical specimens after failure (cured at 60°C)

3.2. Unconfined compressive strength (UCS) and stress-strain behavior of LCC specimens

The results show that the samples cured in oven at 60°C had higher UCS values compared with samples cured at 30°C, which is because hydration enhances in cementitious materials cured at elevated temperatures compared to samples cured at lower temperature. Further, at any curing time and curing condition, by increasing the fiber content, the secant modulus decreased because the contact behaviors between cement and soil particles was decreased by adding fiber

4. Conclusions

It has recently been proved that LCC has a superior performance over Lime Concrete (LC) in the presence of moisture resulted from capillary action and groundwater level increment under the foundations. However, because LCC is often used under the foundation of buildings, the uneven settlement of soil underneath usually causes cracks and subsequent durability issues in the concrete, more specifically in the presence of moisture and groundwater. The current research resolved this problem by incorporating small amounts of a very low-cost fiber in the LCC mix design to act as bridging ligaments behind crack tips to resist crack and improve the ductility. The performance of RLCC has been studied by focusing on the effects of various fiber contents, curing periods, and curing conditions on a number of geotechnical properties including the compressive strength, stress-strain behavior, secant modulus, deformability index and failure strain. The following main conclusions are drawn:

- In all curing periods and conditions, the ductility of RLCC significantly increases with the addition of Recycled Tire Polymer Fibers (RTPF). For example, deformability index of RLCC with adding fibers to the mix design increases between 50 to 100% compared with the reference LCC sample. In addition, RLCC with higher fiber content shows more ductile post-peak behavior compared to LCC or RLCC with lower fiber content .
- Curing time and curing condition significantly affect the geotechnical properties of LCC specimens. For example, the specimens cured for 3 days in 60°C show significantly higher UCS values compared with the specimens cured at 30°C for 14 and 28 days, and the UCS of specimens cured in 60°C for 21 days is almost 1.6 times higher than those cured for 28 days at 30°C. These results show that it is reasonable to cure the LCC samples in high temperature (60°C) for one or two days (instead of 28 days in 30°C) in order to save time in real LCC and RLCC projects.
- The secant modulus of specimens for any curing condition and curing period decrease by increasing the fiber content. Moreover, the deformability index of specimens for any curing condition and curing period increases by increasing the fiber content.

5. References

- Duan XL, Zhang JS, "Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- Jahandari S, Saberian M, Tao Z, Mojtahedi SF, Li J, Ghasemi M, Rezvani SS, Li W, "Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes", *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 160, 242-251.