

بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله دار ضعیف بهسازی شده در کاربرد همزمان آهک، خاکستر بادی و ضایعات لاستیک

مهرداد امینی زاده^۱، مهدی مخبری^{۲*}، مهدی مؤمنی رق آبادی^۳

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

maz_civil_en@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

mehdi.mokhberi@iau.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

mm.pmi.ced@iauk.ac.ir

چکیده:

بسیاری از پروژه‌های عمرانی باید بر خاک‌های ضعیف و یا مسئله دار احداث شوند. گاهی بستر راه‌ها یا ساختگاه احداث بناها از رس‌های ضعیف و یا ماسه بادی تشکیل شده‌اند که جز با اصلاح خواص آنها قابل استفاده نیستند. از گذشته تاکنون آهک به عنوان یکی از مصالح اصلاح خاک شناخته می‌شده است. گاهی نیز با کاربرد همزمان آهک و خاکستر بادی چسبندگی خاک را افزایش می‌دهند. در مناطق گرم و کویری از این دو مصالح سنتی برای کاهش نشست پی و ایجاد لایه مستحکم در بستر راه‌ها استفاده می‌شود. از طرفی در سال‌های اخیر به دلیل کاهش اثرات منفی زیست محیطی، استفاده از لاستیک‌های فرسوده در بهسازی خاک مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل عملکرد متفاوت افزودنی‌های سنتی با ضایعات لاستیک، بررسی تأثیر همزمان اجزاء لاستیک فرسوده، مصالح سنتی و خاکستر بادی که در مناطق کویری ایران به فراوانی دیده می‌شود، ضرورت پیدا می‌کند. در این تحقیق تأثیر افزودن پودر لاستیک فرسوده و الیاف لاستیک بر روی خواص مکانیکی افزودنی آهک و آهک-خاکستر بادی بررسی شده است. آزمایش‌ها و نتایج نشان می‌دهد که افزودن پودر لاستیک به مصالح بهسازی شده با مصالح سنتی افزایش شکل پذیری را به همراه دارد. از طرفی استفاده از الیاف لاستیک به طور قابل توجهی مقاومت فشاری، شکل پذیری، مدول الاستیک، مدول حجمی (بالک)، مدول برجهندگی و مقاومت برشی را در تمام زمان‌های عمل‌آوری بهبود می‌بخشد، ولی افزایش الیاف باعث کاهش کرنش شکست می‌گردد. بدیهی است که بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک بهسازی شده متناسب با انتخاب بهینه افزودنی و مسلح کننده می‌باشد. در یک نتیجه گیری کلی افزودن ۱۲٪ پودر لاستیک فرسوده و ۱٪ الیاف لاستیک به آهک-خاکستر بادی مناسب ترین نتیجه را برای بهسازی خاک ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی:

پودر لاستیک، الیاف، خاک ضعیف، خاکستر بادی، آهک

* Corresponding Author

Evaluation of the geotechnical specification of weak problematic treated soils in the application of lime, fly-ash, and rubber waste

Abstract:

Some construction projects require building on weak or problematic soils. The subgrade layer of roads or construction areas may consist of weak clays or sand that needs modification. In the past, combining lime and fly ash has improved soil adhesion. In hot and desert areas, these materials reduce foundation settlement and create a strong roadbed layer. Recently, there has been a focus on using recycled materials and industrial wastes due to environmental concerns. Due to the different performance of traditional additives with rubber waste, it is necessary to investigate the simultaneous effect of waste rubber components, traditional materials, and fly ash, which is abundant in the desert regions of Iran. This study investigates the impact of adding rubber powder and rubber fibers to lime and lime-fly ash improved soil. The results indicate that adding rubber powder increases the soil's compressive strength and other resistance parameters. Moreover, it enhances ductility. Additionally, using rubber fibers significantly improves compressive strength, ductility, elastic modulus, bulk modulus, resilient modulus, and shear resistance, although it reduces the failure strain. It is obvious that the improvement of the geotechnical characteristics of the improved soil is proportional to the optimal selection of additives and reinforcement. Overall, adding 12% worn rubber powder and 1% rubber fibers to lime-fly ash provides the most suitable result for soil improvement.

Keywords: Rubber powder, rubber fibers, weak soils, fly ash, lime,

۱- مقدمه

در بسیاری از فعالیتهای عمرانی به ناچار نیاز به استفاده از خاکهای ضعیف و مشکل ساز محلی است. ملاحظات اقتصادی، در دسترس نبودن مواد با کیفیت و فواصل حمل و نقل اغلب اصلاح و بهبود خاک را توجیه می کند. خاکهای بی کیفیت معمولاً می توانند رفتار مهندسی نامطلوبی مانند تورم و انقباض زیاد، ظرفیت باربری کم و حساسیت به رطوبت بالا از خود نشان دهند. خاکهای رسی و خاک های ماسه بادی در مناطق بیابانی و کویری از جمله خاکهای مشکل ساز در پروژه های راه سازی و ساختمانی هستند. بنابراین مهندسان ژئوتکنیک به دنبال روش ها و تکنیک های کاربردی و اقتصادی برای حل این مشکلات هستند. تثبیت این نوع خاک ها با استفاده از افزودنی های مختلف امری طبیعی است زیرا جایگزینی مواد پی با خاک های با کیفیت عالی هزینه بر است. پرکاربردترین افزودنی برای تثبیت خاک های رسی و بهبود خصوصیات آنها از گذشته تا سال های اخیر آهک و پس از آن سیمان می باشد.

از اولین مطالعات تحقیقاتی بر روی خاک های تثبیت شده با آهک، تحقیقاتی است که در سال ۱۹۸۱ برای بهبود خواص خاک های ریزدانه انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که درصد آهک مورد نیاز برای افزایش خواص خاک های ریزدانه بین ۳٪ تا ۸٪ است. علاوه بر این، شفته آهکی (خاک بهسازی شده با آهک) و ملات آهک به طور گسترده در پروژه های ساختمانی مختلف استفاده می شود. [۱]. ملک پور و توفیق (۲۰۱۰) گزارش کردند که ستون های شفته آهکی حاوی ۲۰٪ آهک و ۲۲٪ رس، ظرفیت باربری خاک های مشکل دار را به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد [۲]. استفانیو و پایایی (۲۰۰۵) اثرات مقدار و اندازه سنگدانه بر ویژگی های شفته آهکی را بررسی کردند. در این تحقیق مخلوط های مختلفی با درصد آهک به سنگدانه و نسبت آب به آهک متفاوت تهیه شد. نتایج نشان داد

که مصالح درشت در شفته آهکی تأثیری بر مقاومت ملات ندارد، اگرچه به دلیل تراکم، منافذ مویینیگی بسیار کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر مقاومت شفته آهکی با کاهش نسبت آهک به سنگدانه با حداکثر اندازه صفر تا ۴ mm به دست می‌آید [۳].

صابریان و همکاران (۲۰۱۷) اثر پدیده مویینیگی و بالا آمدن سفره‌های آب‌های زیرزمینی بر خواص مکانیکی شفته آهکی را با انجام آزمایش و همچنین مدل ریاضی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پدیده مویینیگی و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی باعث کاهش خواص مقاومتی شفته آهکی می‌شود [۴]. جهاننداری و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر چرخه‌های ذوب-یخبندان، درجه اشباع و زمان عمل‌آوری بر پارامترهای ژئوتکنیکی شفته آهکی-سیمانی و شفته آهکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سطح آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع، مقاومت شفته آهکی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. در حالی که اگر به جای شفته آهکی از شفته آهکی سیمانی استفاده شود، افزایش آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع تأثیری بر خواص مقاومتی ندارد [۵].

استفاده از خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و پوسته برنج همراه آهک به منظور توسعه پایدار اکوسیستم و هم چنین برای تثبیت و بهبود مقاومت خاک مشکل دار توسط محققان گزارش شده است. با این حال، استفاده از خاکستر بادی به تنهایی برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رس برای راه سازی و طراحی فونداسیون ممکن است کافی نباشد. بنا براین استفاده از خاکستر بادی همراه با آهک گزینه مناسبی برای بهبود مشخصات خاک استفاده می‌شود که توجه محققین را به خود جلب کرده است [۶]. سیواپولیا و همکاران گزارش کردند که اضافه کردن خاکستر بادی همراه با آهک به خاک موجب افزایش پلاستیسیته خاک می‌شود. هر چند بهبود پلاستیسیته خاک با افزودن ۱٪ گچ به این ترکیب بارزتر است.

از سوی دیگر، توجه روزافزون به چالش‌های زیست محیطی، محققان را تشویق به استفاده از مصالح نوین و یا استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی برای بهبود خواص مهندسی و کاهش نگرانی‌های زیست محیطی کرده است [۷-۱۵]. در سال ۲۰۱۰، تأثیر استفاده از لایه ژئوگرید بر مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی ملات سیمان و آهک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که بیشترین مدول الاستیسیته با بیشترین نسبت سیمان به آهک به دست می‌آید. البته میزان بهینه سیمان نباید از ۵٪ بیشتر باشد. ایشان نشان دادند که استفاده از لایه ژئوگرید در مخلوط ماسه و سیمان تحت انرژی ثابت باعث کاهش وزن مخصوص خاک می‌شود [۱۶-۱۸]. جهاننداری و همکاران نشان دادند که استفاده از لایه‌های ژئوگرید در خاک‌های تثبیت شده با آهک منجر به افزایش قابل توجه شکل پذیری و کاهش شاخص شکنندگی می‌شود [۱۹-۲۱].

در دسته دیگری از مطالعات تأثیر افزایش درصد‌های مختلف پودر لاستیک بر خواص مکانیکی خاک رس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات محمدی فر و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که افزودن پودر تیر تأثیر مثبتی بر کاهش محدودیت‌های اتربرگ، بهبود مقاومت و نفوذپذیری و کاهش پتانسیل تورم و وزن مخصوص خاک دارد. بنابراین می‌توان از آن به عنوان افزودنی برای افزایش خواص خاک استفاده کرد [۲۲]. در سال ۲۰۰۴، کومار و شارما (۲۰۰۴) تأثیر افزودن خاکستر بادی را بر خواص مهندسی خاک‌های متورم شونده از جمله هدایت هیدرولیکی، پلاستیسیته، چگالی، مقاومت بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزودن ۲۰٪ خاکستر بادی، انعطاف پذیری حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که بسته به نوع خاک، میزان موثر خاکستر بادی برای بهبود خواص مهندسی خاک بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ است [۲۳]. تحقیقات آزمایشگاهی داهاله و همکاران (۲۰۱۶) بر روی خاک‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و آهک هیدراته نشان داد که خاکستر بادی به طور قابل توجهی خواص مقاومتی خاک رس را تغییر می‌دهد. همچنین افزودن تا ۵۰٪ خاکستر بادی در افزایش خواص مقاومتی خاک موثر است، در حالی که بیش از این مقدار مقاومت کلی خاک را کاهش می‌دهد [۲۴]. سینگز و همکاران مخلوطی از خاک متورم شونده را با ۶٪ خرده لاستیک مختلف به دست آمده از لاستیک‌های فرسوده تهیه کردند. نتایج نشان داد که افزودن خرده لاستیک تا ۲/۵٪ مقاومت فشاری را تا ۴۳۰ kPa افزایش می‌دهد [۲۵].

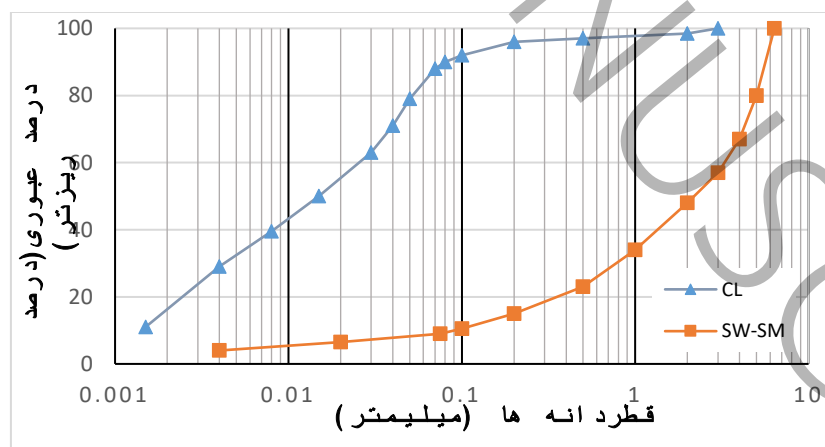
نتایج مطالعات اکبری مهر و اسماعیل افلاکی حاکی از آن است که افزودن پودر لاستیک به خاک‌های رسی تأثیر مثبتی در کاهش حدود اتربرگ، افزایش راندمان و بهبود مقاومت، نفوذپذیری، کاهش تورم و ویژگی‌های نشست و کاهش تراکم خاک دارد. بر اساس آزمایشات سه محوری انجام شده در این تحقیق ایشان مشخص شد که در فشار همه جانبه یکسان و اندازه فیبرهای لالستیکی یکسان میزان کرنش خرابی با افزایش میزان فیبر لالستیکی و اندازه آنها کاهش می‌یابد که این مطلب نشان دهنده این موضوع است که المانهای لالستیکی به عنوان جاذب انرژی عمل میکنند. در نمونه‌های ترکیبی تا محدوده ای خاص، افزایش فشار همه جانبه باعث افزایش مقاومت می‌شود و بعد از آن با افزایش فشار همه جانبه مقاومت برشی کاهش می‌یابد. [۲۶-۲۹]. در سالهای اخیر نیز مطالعات کامل تری بر روی خصوصیات

و رفتار خاک‌های بهسازی شده با خرده لاستیک و مصالح جدید و یا سنتی انجام شده است. این مطالعات بر ضرورت استفاده از مصالح بازیافتی برای حفظ و پایداری محیط زیست تأکید دارند. [۳۰-۳۶] نگاهی اجمالی به مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی بر روی خاک تثبیت شده با آهک و شفته آهکی انجام شده است، ولی مطالعات بسیار محدودی برای ارزیابی خواص مکانیکی خاک بهسازی شده با ترکیب مصالح سنتی موجود در استان‌های کویری و مواد بازیافتی موجود در آن مناطق وجود دارد. محققان قبلی بر امکان استفاده از لاستیک‌های زائد در شفته معمولی برای کاهش اثرات منفی زیست محیطی آن‌ها توصیه کرده اند، با این وجود کاربرد لاستیک به دلیل کاهش مقاومت خاک بهسازی شده با آهک به طور گسترده در عمل مورد استفاده قرار نگرفته است. با توجه به اینکه کاربرد شفته آهکی و شفته خاکستر بادی- آهکی به تنهایی برای دستیابی به مقاومت بالا مقرون به صرفه نیست، ترکیب این مصالح با ذرات لاستیک فرسوده می‌تواند ضمن تأمین مقاومت مورد نیاز صرفه اقتصادی هم به همراه داشته باشد. این تحقیق به طور جامع اثرات افزودن پودر و الیاف لاستیک را بر روی انواع خواص مکانیکی شفته آهکی و شفته خاکستر بادی- آهکی را ارزیابی می‌کند.

۲- مواد و روش آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح

خاک مورد استفاده در شفته آهکی از معدن شن و ماسه اختیار آباد کرمان و خاک رسی ریزدانه از منطقه ای واقع در شهر کرمان با مختصات جغرافیایی ۵۷،۳۸۰ و ۳۰/۲۸۹ از اعماق ۱ تا ۳ متری تهیه شد. برای بررسی رفتار خاک ابتدا آزمایش‌های اولیه بر روی خاک انجام گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک‌ها در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به معیارهای رده‌بندی آیین نامه ASTM، خاک مورد نظر از نوع رس با پلاستیسیته کم و آهک مصرفی در این تحقیق، آهکی هیدراته با درصد بالایی از عناصر هیدراته می‌باشد [۳۷]. خاکستر بادی مورد استفاده برای تولید نمونه‌های شفته خاکستر بادی-آهکی از کارخانه زرنند کرمان تهیه شده است. مشخصات این مصالح در جدول (۲) نشان داده شده است. ذرات لاستیک مورد استفاده مستقیماً از کارخانه لاستیک بارز کرمان خریداری شده است. قطر این ذرات بین ۰/۲ mm تا ۲ mm می‌باشد. همچنین الیاف لاستیک مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۰/۲ mm، طول ۲ mm تا ۲۵ mm، مقاومت کششی ۱۸۰ MPa و نقطه ذوب ۲۲۰ °C می‌باشد. طبق توصیه‌های مطالعات قبلی، از آب لوله‌کشی برای قالب‌گیری نمونه‌ها و از آب مقطر برای آزمایش‌های خصوصیات استفاده شده است [۳۸-۴۹]. تصاویر مربوط به مصالح مصرفی در شکل (۲) آورده شده است. هم چنین، تجزیه شیمیایی آهک مصرفی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی خاک رس و ماسه مورد استفاده در تحقیق

Figure 1: Particle size distribution curve for the coarse-grained and fine-grained soils

جدول (۱): مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Mechanical properties of the studied soils

مشخصات	نتایج	مراجع
خاک ریزدانه		
نوع خاک ریز دانه	CL-ML	ASTM 2487-11
درجه فعالیت خاک	0.47	-
حد روانی	33%	ASTM D423-66
شاخص خمیری	8%	ASTM 4318-D05 A
ماکزیمم وزن مخصوص خشک	18.7 kN/m ³	AASHTO T180
رطوبت بهینه	15%	AASHTO T180
توده ویژه	2.57	ASTM D854-10
خاک درشت دانه		
نوع خاک	SW-SM	ASTM 2487-11
اندازه مؤثر	0.1	ASTM D422-63
ضریب یکنواختی	34	ASTM D422-63
ضریب خمیدگی	1.9	ASTM D422-63
توده ویژه	2.65	ASTM D854-10

جدول (۲): مشخصات شیمیائی خاکستر بادی مورد استفاده

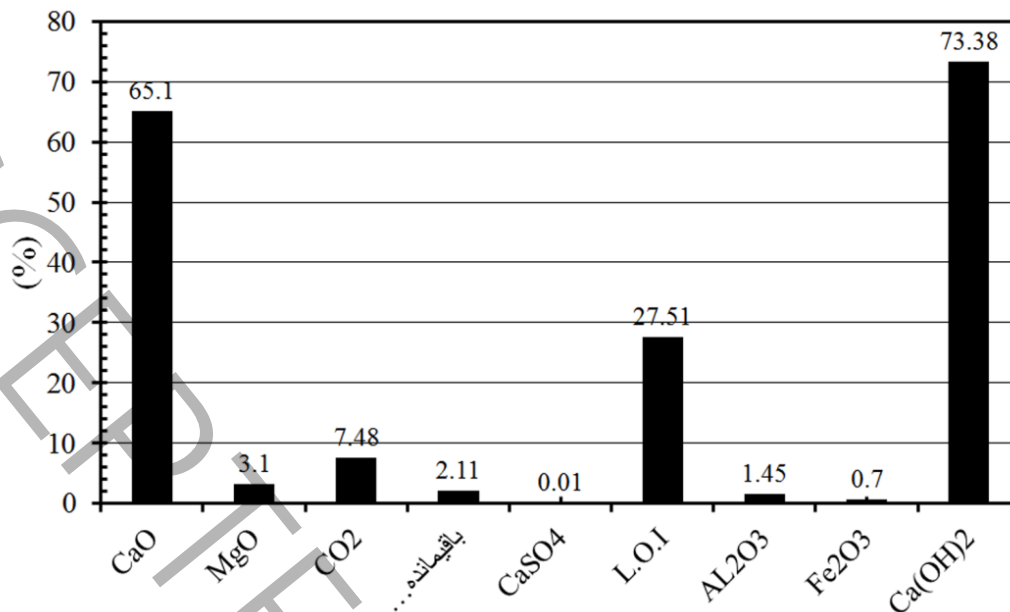
Table 2: Chemical features of used fly ash

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	tio ₂	Cao	V ₂ O ₅	So ₃	K ₂ O
۵۵/۸	۲۷/۹	۷/۰۹	۲/۲۵	۳/۹۶	۰/۰۹	۰/۳۲	۱/۵۵



شکل (۲): تصاویر مصالح مصرفی الف) خاکستر بادی ب) پودر لاستیک ج) الیاف لاستیک

Figure 2: Used materials (a) fly ash (b) rubber powder (c) rubber fibers



شکل (۳) نتایج تجزیه شیمیایی آهک مصرف شده در این تحقیق

Figure 3: Results of chemical analysis of lime used in this study

تست‌های مقاومت فشاری تک محوری (UCS) بر روی تمام نمونه‌ها انجام شد. در استاندارد ASTM D 5102 ضوابطی برای انجام آزمایش‌های تک محوری بر روی شفته‌های آهکی ارائه شده است [۵۰]. بر اساس این استاندارد مقدار کرنش محوری نباید از ۵٪ ارتفاع نمونه بیشتر باشد و همچنین سرعت بارگذاری باید بین ۰/۵ mm/min تا ۲ mm/min باشد. در این پژوهش سرعت بارگذاری دستگاه برابر ۱ mm/min تنظیم و کنترل شده است. پس از دو روز نمونه‌ها برای عمل آوری از قالب بیرون آمده و درون پلاستیک قرار داده شدند (۲). نمونه‌ها پس از عمل آوری در داخل دستگاه قرار داده می‌شوند. تمامی پارامترها و شرایط ساخت نمونه‌ها طبق تحقیق اخیر توسط جهاننداری و همکاران (۲) انجام شد. آزمایش تک‌محوری پس از کنترل‌های لازم از جهت اعمال دقیق بار به مرکز نمونه و سرعت بارگذاری، انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها، منحنی‌های مقاومت تک‌محوری نهایی نمونه‌ها و نیز کرنش محوری متناظر با آن برداشت شد. مدول سکانت برای ارزیابی مقاومت شفته آهک در برابر تغییر شکل استفاده می‌شود. این ضریب با تقسیم ۵۰٪ مقاومت فشاری بیشینه به کرنش محوری مربوطه محاسبه شد [۵۰].

مدول حجمی (K) مقاومت نمونه‌ها را در برابر فشار اندازه‌گیری می‌کند و از طریق رابطه (۱) محاسبه شد [۵۱].

$$K(\text{MPa}) = \frac{\sigma}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}} = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

در معادله (۱)، $(\Delta V/V)$ نشان دهنده تغییرات حجمی، σ فشار هیدرواستاتیک، ε_{xx} ، ε_{yy} و ε_{zz} به ترتیب جهت کرنش‌های مستقیم موازی با محورهای x، y و z، ν نسبت پواسون است که با توجه به شرایط خاک ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود، و E_s ضریب الاستیسیته خاک می‌باشد. به منظور بررسی مقاومت نمونه‌ها در برابر تغییر شکل عرضی، مدول برشی نمونه‌ها طبق معادله (۲) محاسبه شد [۵۲].

$$G(\text{MPa}) = \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yz}} = \frac{\sigma_{xy}}{2\varepsilon_{xy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

جدول (۳): طرح اختلاط نمونه‌های شفته آهک با و بدون مواد افزودنی

Table 3: Mixing plan for lime concrete samples with and without additive materials

شماره اختلاط	ماده افزودنی	ماسه (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	مقدار آهک (kg/m ³)	ماده افزودنی (%)	آب (kg/m ³)
۱	-	۱۰۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۰	۳۳۶
		۹۶۰	۲۳۰	۱۷۰	۴	۳۳۶
		۹۲۰	۲۳۰	۱۷۰	۸	۳۳۶
		۸۸۰	۲۳۰	۱۷۰	۱۲	۳۳۶
۲	پودر لاستیک	۸۴۰	۲۳۰	۱۷۰	۱۶	۳۳۶
		۸۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۲۰	۳۳۶
		۷۵۰	۲۳۰	۱۷۰	۲۵	۳۳۶
		۷۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۳۰	۳۳۶
		۹۹۵	۲۳۰	۱۷۰	۰/۵	۳۳۶
۳	الیاف لاستیک		۲۳۰	۱۷۰	۱	۳۳۶
			۲۳۰	۱۷۰	۱/۵	۳۳۶
			۲۳۰	۱۷۰	۲	۳۳۶

جدول (۴): طرح اختلاط نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی با و بدون مواد افزودنی

Table 4: Mixing plan for lim- concrete and fly ash samples with and without additive materials

شماره اختلاط	ماده افزودنی	ماسه (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	مقدار آهک (kg/m ³)	خاکستر بادی (kg/m ³)	در صد افزودنی	آب (kg/m ³)
۱	-	۱۰۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۰	۳۳۶
		۹۶۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۴	۳۳۶
		۹۲۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۸	۳۳۶
		۸۸۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱۲	۳۳۶
۲	پودر لاستیک	۸۴۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱۶	۳۳۶
		۸۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲۰	۳۳۶
		۷۵۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲۵	۳۳۶
		۷۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۳۰	۳۳۶
		۹۹۵	۲۳۰	۸۵	۸۵	۰/۵	۳۳۶
۳	الیاف لاستیک	۹۹۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱	۳۳۶
		۹۸۵	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱/۵	۳۳۶
		۹۸۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲	۳۳۶

جدول (۵): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه درصدهای مختلف پودر لاستیک

Table 5. Geotechnical parameters of lime-concrete samples with different percentages of rubber powder

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل‌آوری (روز)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهندگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک	۳	۲۰۰	۱/۹۲	۵/۲۱	۹۳/۴	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۲۷۰	۱/۷۱	۷/۸۹	۱۰۲/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۸
		۲۸	۳۴۰	۱/۵۲	۱۱/۱۸	۱۱۰/۷۶	۴/۳۰	۹/۳۲
		۹۰	۳۵۰	۱/۲۰	۱۴/۵۸	۱۱۲	۵/۶۱	۱۲/۱۵
۲	آهک + ۴٪ پودر لاستیک	۳	۱۹۰	۲/۱۰	۴/۵۲	۹۲/۱۶	۱/۷۳	۳/۷۷
		۷	۲۶۳	۱/۹۰	۶/۹۲	۱۰۱/۲۱	۲/۶۶	۵/۷۷
		۲۸	۳۳۲	۱/۶۹	۹/۸۲	۱۰۹/۷۶	۳/۷۸	۸/۱۸
		۹۰	۳۴۱	۱/۳۹	۱۲/۲۷	۱۱۰/۸۸	۴/۷۲	۱۰/۲۲
	آهک + ۸٪ پودر لاستیک	۳	۱۸۴	۲/۱۹	۴/۲۰	۹۱/۴۲	۱/۶۲	۳/۵۰
		۷	۲۵۴	۲/۰۰	۶/۳۵	۱۰۰/۰۹	۲/۴۴	۵/۲۹
		۲۸	۳۲۵	۱/۸۱	۸/۹۸	۱۰۸/۹۰	۳/۴۵	۷/۴۸
		۹۰	۳۳۳	۱/۴۶	۱۱/۴۰	۱۰۹/۸۹	۴/۳۸	۹/۵۰
	آهک + ۱۲٪ پودر لاستیک	۳	۱۷۶	۲/۳۰	۳/۸۳	۹۰/۴۲	۱/۴۷	۳/۱۹
		۷	۲۴۶	۲/۰۸	۵/۹۱	۹۹/۱۰	۲/۲۷	۴/۹۲
		۲۸	۳۱۷	۱/۹۰	۸/۳۴	۱۰۷/۹۱	۳/۲۱	۶/۹۵
		۹۰	۳۲۷	۱/۶۴	۹/۹۷	۱۰۹/۱۵	۳/۸۳	۸/۳۱
	آهک + ۱۶٪ پودر لاستیک	۳	۱۷۰	۲/۴۱	۳/۵۳	۸۹/۶۸	۱/۳۶	۲/۹۴
		۷	۲۳۹	۲/۲۶	۵/۲۹	۹۸/۲۴	۲/۰۳	۴/۴۱
		۲۸	۳۱۱	۲/۰۱	۷/۷۴	۱۰۷/۱۶	۲/۹۸	۶/۴۵
		۹۰	۳۲۱	۱/۷۷	۹/۰۷	۱۰۸/۴۰	۳/۴۹	۷/۵۹
	آهک + ۲۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۶۳	۲/۴۹	۳/۲۷	۸۸/۸۱	۱/۲۶	۲/۷۲
		۷	۲۳۲	۲/۲۷	۵/۱۱	۹۷/۳۷	۱/۹۶	۴/۲۶
		۲۸	۳۰۷	۲/۱۲	۷/۲۴	۱۰۶/۶۷	۲/۷۸	۶/۰۳
		۹۰	۳۱۵	۱/۸۸	۸/۳۸	۱۰۷/۶۶	۳/۲۲	۶/۹۸
	آهک + ۲۵٪ پودر لاستیک	۳	۱۵۵	۲/۶۰	۲/۹۹	۸۷/۸۲	۱/۱۵	۲/۵۰
		۷	۲۲۶	۲/۴۰	۴/۷۱	۹۶/۶۲	۱/۸۱	۳/۹۲
		۲۸	۳۰۰	۲/۱۹	۶/۸۵	۱۰۵/۸۰	۲/۶۳	۵/۷۱
		۹۰	۳۰۷	۱/۹۵	۷/۸۸	۱۰۶/۶۷	۳/۰۳	۶/۵۷
	آهک + ۳۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۴۸	۲/۷۴	۲/۷۰	۸۶/۹۵	۱/۰۴	۲/۲۵
		۷	۲۲۰	۲/۵۳	۴/۳۵	۹۵/۸۸	۱/۶۷	۳/۶۲
		۲۸	۲۹۴	۲/۳۰	۶/۳۹	۱۰۵/۰۶	۲/۴۶	۵/۳۲
		۹۰	۳۰۱	۱/۹۹	۷/۵۶	۱۰۵/۹۲	۲/۹۱	۶/۳۰

جدول (۶): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه درصدهای مختلف الیاف لاستیک

Table 6. Geotechnical parameters of lime-concrete samples with different percentages of rubber fiber

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل‌آوری (روز)	مقاومت فشاری پیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهنگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک	۳	۲۰۰	۱/۹۲	۵/۲۱	۹۳/۴	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۲۷۰	۱/۷۱	۷/۸۹	۱۰۲/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۸
		۲۸	۳۴۰	۱/۵۲	۱۱/۱۸	۱۱۰/۷۶	۴/۳۰	۹/۳۲
		۹۰	۳۵۰	۱/۲۰	۱۴/۵۸	۱۱۲	۵/۶۱	۱۲/۱۵
	آهک + ۵٪ الیاف لاستیک	۳	۳۰۰	۲/۸۸	۵/۲۱	۱۰۵/۰۸	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۴۰۵	۲/۶۷	۷/۵۸	۱۱۸/۸۲	۲/۹۱	۶/۳۱
		۲۸	۵۰۶	۲/۴۶	۱۰/۲۸	۱۳۱/۳۴	۵/۱۴	۸/۵۷
		۹۰	۵۲۱	۲/۱۰	۱۲/۴۰	۱۳۳/۲۰	۴/۷۷	۱۰/۳۳
	آهک + ۱٪ الیاف لاستیک	۳	۳۰۵	۳/۳۱	۴/۶۱	۱۰۶/۴۲	۱/۷۷	۳/۸۴
		۷	۴۱۱	۳/۱۱	۶/۶۱	۱۱۹/۵۶	۲/۵۴	۵/۵۱
		۲۸	۵۱۴	۲/۹۵	۸/۷۱	۱۳۲/۳۳	۳/۳۵	۷/۲۶
		۹۰	۵۳۰	۲/۶۵	۱۰	۱۳۴/۳۲	۳/۸۵	۸/۳۳
۳	آهک + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	۳	۲۸۸	۳/۵۱	۴/۱۰	۱۰۴/۳۱	۱/۵۸	۳/۴۲
		۷	۳۸۹	۳/۳۴	۵/۸۲	۱۱۶/۸۳	۲/۲۴	۴/۸۵
		۲۸	۴۸۶	۳/۰۷	۷/۹۱	۱۲۸/۸۶	۳/۰۴	۶/۵۹
		۹۰	۵۰۱	۲/۸۱	۸/۹۱	۱۳۰/۷۲	۳/۴۳	۷/۴۲
	آهک + ۲٪ الیاف لاستیک	۳	۲۷۴	۳/۷۷	۳/۶۳	۱۰۲/۵۷	۱/۳۹	۳/۰۲
		۷	۳۷۰	۳/۵۵	۵/۲۱	۱۱۴/۴۸	۲/۰۰	۴/۳۴
		۲۸	۴۶۲	۳/۳۲	۶/۹۶	۱۲۵/۸۹	۲/۶۸	۵/۸۰
		۹۰	۴۷۷	۳/۰۶	۷/۷۹	۱۲۷/۷۴	۳/۰۰	۶/۴۹

طبق AASHTO T307، مدول انعطاف پذیری یک پارامتر برای اندازه گیری واکنش الاستیک خاک به تنش است. برخی پارامترهای موثر بر این ضریب شامل نوع خاک (درشت دانه یا ریز دانه)، شرایط بارگذاری، میزان خاک و تراکم خاک می-شود. این ضریب مطابق معادله (۳) به دست می‌آید [۵۳].

$$M_r \text{ (MPa)} = 0.124 \times UCS \text{ (KPa)} + 68.8 \quad (۳)$$

۳- بحث و بررسی

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی اثرات افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک و الیاف لاستیک بر خواص مکانیکی شفته آهکی و شفته خاکستر بادی-آهکی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری می‌باشد، نتایج نشان‌دهنده این است که هر ماده افزودنی بسته به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خود تأثیرات متفاوتی بر مقاومت، کرنش شکست، و مدول‌های مکانیکی دارد. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به طراحی مخلوط‌های بهینه برای کاربردهای مهندسی و ژئوتکنیکی کمک کند. در این بخش اثرات این افزودنی‌ها به تفکیک بررسی شده است.

۳-۱- بررسی خواص مکانیکی شفته آهکی بهسازی شده

در جدول (۵) خلاصه نتایج اندازه گیری پارامترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه پودر لاستیک و در جدول (۶) پارامترهای

مکانیکی نمونه‌های شفته آهک با الیاف لاستیک نشان شده است. در اشکال (۴) الی (۱۶) نتایج به تفکیک نشان داده شده است. در شکل (۴) ارتباط بین مقاومت فشاری بیشینه نمونه‌های حاوی شفته آهک اولیه و زمان عمل‌آوری در حالتی که مواد افزودنی به شفته آهک اضافه نشده باشد نشان داده شده است. بر اساس نتایج با افزایش زمان عمل‌آوری از ۳ به ۹۰ روز، مقاومت فشاری از ۲۰۰ MPa به ۳۵۰ MPa افزایش یافت. با این حال با افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ این افزایش مقاومت حدود ۳٪ می‌باشد که کمترین میزان است. به عبارتی دیگر بعد از ۲۸ روز نرخ افزایش مقاومت کمتر می‌شود. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های حاوی آهک، واکنش‌های پوزولانی بین هیدروکسید کلسیم (از آهک) و سیلیس/آلومینا در خاک، منجر به تشکیل ژل‌های سیمانی (C-A-H و C-S-H) می‌شود. این محصولات سیمانی به مرور زمان باعث پر شدن منافذ، کاهش تخلخل، و افزایش تراکم خاک می‌شوند که مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند. کاهش نرخ افزایش مقاومت بعد از ۲۸ روز به دلیل کاهش میزان واکنش‌ها و تکمیل نسبی روند تشکیل ژل‌های سیمانی است. در مراحل ابتدایی، واکنش‌ها سریع‌تر انجام می‌شوند، اما با پیشرفت زمان و کاهش آب آزاد، روند کاهشی واکنش‌ها بوقوع می‌پیوندد. کرنش شکست مربوط به مقاومت فشاری بیشینه، نیز با افزایش زمان عمل‌آوری روند کاهشی پیدا می‌کند. در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز نسبت به زمان عمل‌آوری ۳ روز، کرنش شکست حدود ۳۷/۵٪ کاهش می‌یابد. بر اساس شکل (۴) با افزایش زمان عمل‌آوری مدول سکانت به دلیل افزایش واکنش‌ها پوزولانی و کاهش آب افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ افزایش مدول سکانت مربوط به افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز است که حدود ۴۱٪ است. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ روز به ۹۰، ۳۰٪ افزایش در مدول سکانت مشاهده می‌شود. افزایش سختی نمونه‌ها به دلیل رفتار سیمانی شدن خاک و کاهش قابلیت تغییر شکل منجر به کاهش کرنش شکست می‌شود. این کاهش نشان‌دهنده رفتار شکننده‌تر نمونه‌ها در طول زمان عمل‌آوری است.

با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین مدول حجمی و سکانت وجود دارد. بنابراین هم چنان که انتظار می‌رفت مدول حجمی نیز با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش قابل توجهی داشت. از آنجائیکه مدول برجهندگی رابطه‌ی مستقیم و خطی با مقاومت تک محوری محصور نشده (UCS) دارد، با افزایش زمان عمل‌آوری این پارامتر نیز افزایش یافت. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۳ به ۷، مدول برجهندگی از ۹۳/۴ MPa به ۱۰۲ MPa افزایش یافت در حالی که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰، از ۱۱۰/۸ MPa به ۱۱۲ MPa افزایش یافت. همانند مدول سکانت و حجمی، روند مشابهی برای مدول برشی مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های مرجع برای مقایسه با سایر نمونه‌ها که حاوی مواد افزودنی هستند بررسی خواهد شد. به طور کلی می‌توان گفت که نمونه‌های حاوی آهک به دلیل واکنش‌های پوزولانی و پدیده سیمانی شدن در طول زمان عمل‌آوری، ویژگی‌های مکانیکی خاک از قبیل مقاومت فشاری، مدول برشی، مدول حجمی و مدول برجهندگی و همچنین سختی را بهبود می‌بخشد. کاهش نرخ بهبود این ویژگی‌ها در زمان‌های طولانی‌تر به تکمیل فرایند واکنش‌ها و محدودیت در دسترسی به آب و یون‌های آزاد مرتبط است. این نتایج اساس خوبی برای مقایسه بهسازی با شفته آهک را با نمونه‌های حاوی مواد افزودنی دیگر فراهم می‌کند.

۱-۱-۳- شفته آهکی حاوی پودر لاستیک

شکل ۵ تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی مقاومت فشاری بیشینه شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری را نشان می‌دهد. با افزایش درصد پودر لاستیک در تمامی زمان‌های عمل‌آوری، مقاومت فشاری بیشینه کمتر از نمونه شفته آهک بدون پودر لاستیک است. هر چند در تمام نمونه‌ها با درصد‌های مختلف پودر لاستیک مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال بیشترین میزان مقاومت در نمونه با ۴٪ پودر لاستیک و زمان عمل‌آوری ۹۰ روز اتفاق افتاد که حدود ۳۴۱ MPa گزارش شد که در مقایسه با نمونه مشابه شفته آهک بدون پودر لاستیک و زمان عمل‌آوری مشابه حدود ۲/۵٪ کاهش یافته است که مقدار ناچیزی است. بنابراین نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک از نظر مقاومت فشاری قابل مقایسه با نمونه شفته آهک بدون پودر لاستیک است.

شکل (۶) تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی کرنش شکست شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله، کرنش شکست نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک، در تمام زمان‌های عمل‌آوری بیشتر از نمونه‌ی شفته آهک بدون ماده افزودنی است که گواه شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌های حاوی پودر لاستیک است. هم چنین با افزایش زمان عمل‌آوری در تمام نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک، کرنش شکست کاهش پیدا کرد. نکته دیگر اینکه با افزایش زمان عمل‌آوری از ۳ به ۷ روز، کرنش شکست ۵٪ الی ۱۰٪ کاهش پیدا کرد، در حالی که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز کرنش

شکست در حدود ۱۰٪ الی ۲۰٪ کاهش را نشان داد. در مورد تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک به شفته آهک، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش درصد پودر لاستیک، کرنش شکست نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری یکسان بیشتر می‌شود. به عنوان مثال کرنش شکست نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز حدود ۱/۳۹٪ است در حالی که کرنش شکست نمونه حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک در زمان عمل‌آوری مشابه، حدود ۱/۹۹٪ گزارش شده است.

شکل (۷) تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول سکانت شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. براساس نتایج مدول سکانت نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک در تمام زمان‌های عمل‌آوری کمتر از مدول سکانت نمونه شفته آهک در زمان‌های عمل‌آوری مشابه است. نکته دیگر اینکه افزایش درصد پودر لاستیک در تمام زمان‌های عمل‌آوری باعث کاهش مدول سکانت می‌شود. هر چند افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مدول سکانت در درصد‌های مختلف می‌شود. بیشترین مقدار مدول سکانت برای نمونه ی حاوی ۴٪ پودر لاستیک در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز به دست آمد که حدود ۱۲/۲۷ MPa است که در مقایسه با نمونه شفته آهک در زمان عمل‌آوری مشابه حدود ۱/۱۶٪ کاهش را نشان داد.

شکل (۸) تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول برجه‌دگی شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله، مدول برجه‌دگی نمونه‌های شفته آهک حاوی پودر لاستیک ۱-۶٪ کمتر از مدول برجه‌دگی نمونه شفته آهک بدون ماده افزودنی در تمام زمان‌های عمل‌آوری است که نشان از تاثیر نه چندان زیاد پودر لاستیک بر مدول برجه‌دگی شفته آهک داشت. همانطور که در نمودار مشخص است مدول برجه‌دگی در درصد‌های مختلف پودر لاستیک با افزایش زمان عمل‌آوری با شیب تقریباً ملایم و یکسانی افزایش می‌یابد. هم چنین مدول برجه‌دگی با افزایش درصد پودر لاستیک و در زمان عمل‌آوری یکسان، کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول برجه‌دگی مربوط به نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک و زمان عمل‌آوری ۹۰ روز گزارش می‌شود.

شکل (۹): تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول برشی شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. در این نمودار نشان داده شده است که افزودن پودر لاستیک به شفته آهک موجب کاهش مدول برشی می‌شود. همان گونه که در شکل (۹) مشخص است، کمترین میزان مدول برشی در تمام زمان‌های عمل‌آوری مربوط به آهک حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک است و بیشترین مربوط به نمونه حاوی ۴٪ پودر پلاستیک است. بنابراین پر واضح است که افزایش درصد پودر لاستیک باعث کاهش مدول برشی می‌شود و تفاوت مدول برشی در دو درصد مختلف ۴٪ و ۳۰٪ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف حدود ۴۰٪ می‌باشد. هم چنین با توجه به نمودار افزایش زمان عمل‌آوری در تمام درصد‌ها موجب افزایش مدول برشی می‌شود. این نکته قابل توجه است که با افزایش درصد پلاستیک از ۸٪ تا ۳۰٪ نرخ افزایش مدول برجه‌دگی در بازه ی ۲۸-۹۰ روز، نسبت به افزایش درصد پودر پلاستیک از ۴٪ تا ۸٪ کمتر است.

شکل (۱۰) تاثیر افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول حجمی شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج مدول حجمی نمونه‌های حاوی ماده افزودنی پودر لاستیک کمتر از نمونه شفته آهک عاری از پودر پلاستیک است. همانگونه که در شکل مشخص است، با افزایش درصد پلاستیک از ۴٪ تا ۳۰٪ مدول حجمی در ابتدا با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و به تدریج این شیب کاهش می‌یابد. هم چنین کمترین و بیشترین مدول حجمی در تمام زمان‌های عمل‌آوری مربوط به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴٪ پودر لاستیک می‌شود. با این حال مقدار مدول حجمی با افزایش زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف پودر پلاستیک افزایش می‌یابد.

در توجیه فرایند فوق می‌توان گفت که پودر لاستیک ساختاری انعطاف‌پذیر و غیرچسبنده دارد که نمی‌تواند به خوبی با اجزاء آهک پیوند مکانیکی یا شیمیایی قوی ایجاد کند. این امر منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود. همچنین افزودن مقادیر بالاتر پودر لاستیک باعث کاهش تراکم‌پذیری و افزایش فضای خالی در مخلوط می‌شود که پیوندهای ایجاد شده بین ذرات آهک و خاک را تضعیف می‌کند. همچنین پودر لاستیک از نظر شیمیایی غیر فعال است و در واکنش‌های پوزولانی یا هیدراتاسیون آهک شرکت نمی‌کند. از طرفی لاستیک ماده‌ای نرم و انعطاف‌پذیر است و افزودن آن باعث کاهش سختی کلی مخلوط می‌شود. با افزایش درصد پودر لاستیک، چسبندگی آهک و خاک کاهش یافته و خصوصیات الاستیک (مانند مدول‌های مختلف) تضعیف می‌شود. بعلاوه ذرات لاستیک به عنوان فاز ثانویه غیرچسبنده عمل کرده و باعث کاهش تماس مؤثر بین ذرات خاک و آهک می‌شوند.

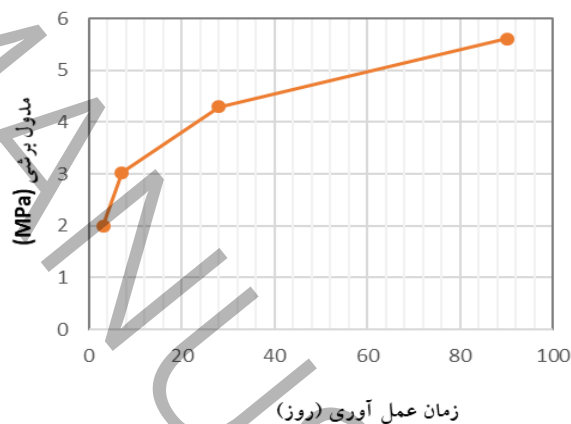
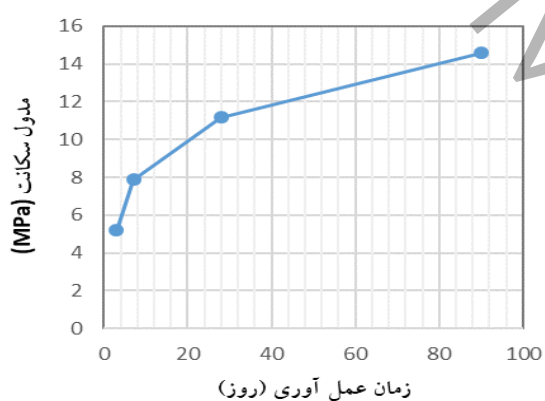
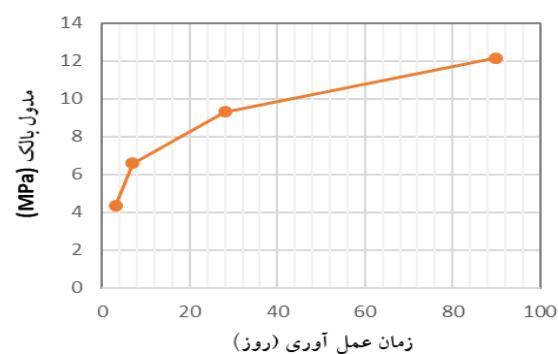
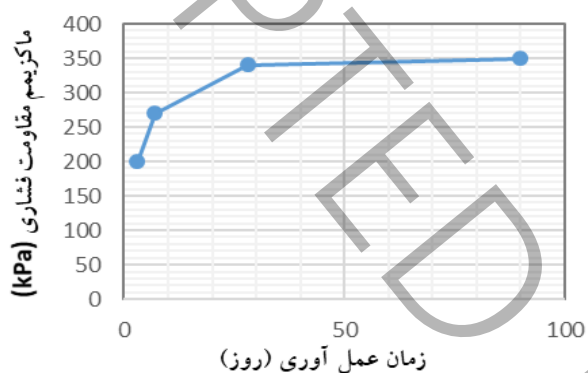
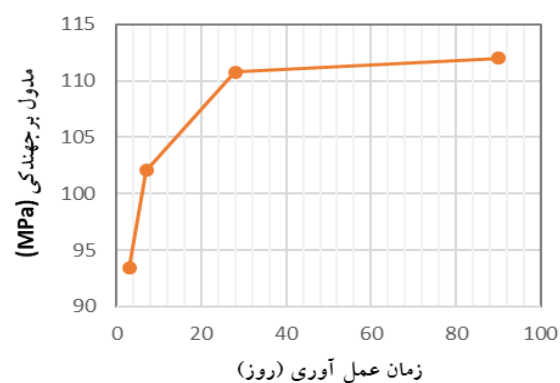
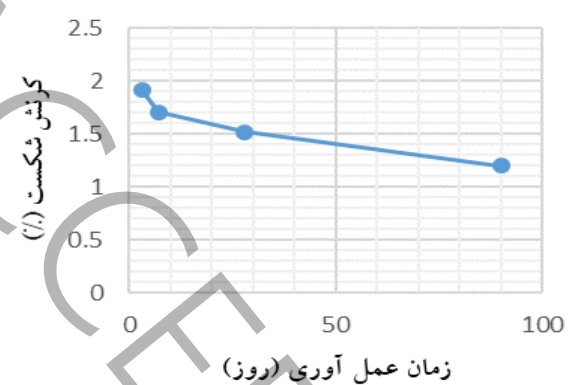
۳-۱-۳- شفته آهکی حاوی الیاف لاستیک

از شکل (۱۱) نتیجه می‌شود که افزودن الیاف لاستیک موجب افزایش نسبتاً زیاد مقاومت فشاری بیشینه در مقایسه با نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک می‌شود. افزودن ۵/۰٪ و ۱٪ الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان، موجب افزایش مقاومت می‌شود و بعد از آن با افزودن مقادیر بیشتر الیاف لاستیک مقاومت فشاری کاهش یافت. این نتایج به دلیل این است که الیاف لاستیک به عنوان یک ماده ارتجاعی در مخلوط عمل می‌کنند و می‌توانند انرژی وارده ناشی از تنش‌های خارجی را جذب کرده و توزیع یکنواخت‌تری از تنش فراهم کنند. از طرفی با ایجاد اثر زنجیره‌ای (chain effect)، ذرات لاستیکی در مخلوط به صورت مؤثر در انتقال تنش‌ها از یک ذره به ذره دیگر نقش ایفا می‌کنند، که می‌تواند موجب افزایش مقاومت کلی مخلوط شود.

بر اساس شکل (۱۲) کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های ساخته شده ی دیگر است که حاکی از کاهش شکنندگی نمونه‌ها و افزایش شکل‌پذیری آن‌هاست. افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری ثابت و افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف یکسان به ترتیب موجب کاهش و افزایش کرنش شکست می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به ماهیت الاستیکی پودر لاستیک ربط داد که به مخلوط شفته آهک خاصیت انعطاف‌پذیری می‌دهند که باعث افزایش توانایی مخلوط در جذب کرنش بدون شکست می‌شود. همچنین وجود ذرات لاستیک در مخلوط باعث توزیع تنش‌های اعمالی به صورت یکنواخت‌تر می‌شود که منجر به افزایش کرنش شکست می‌گردد و شکست ناگهانی را به تعویق می‌اندازند.

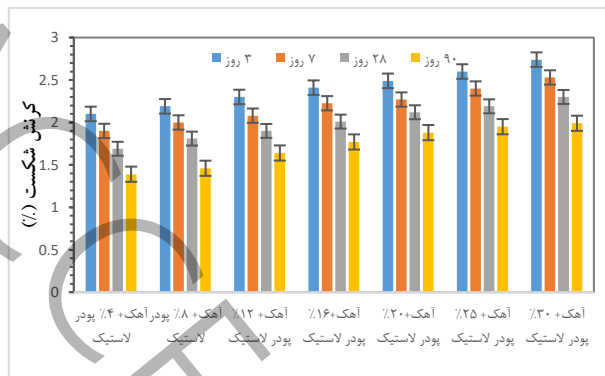
شکل (۱۳) نشان می‌دهد که مدول سکانت نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول سکانت می‌شود. همچنین یر مبنای نتایج شکل (۱۴) مدول برجهندگی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان موجب افزایش و کاهش مدول برجهندگی می‌شود.

بر اساس شکل (۱۵) مدول برشی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می‌شود. شکل (۱۶) نشان می‌دهد که مدول حجمی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می‌شود. افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل‌آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش مدول حجمی می‌شود. علاوه وجود الیاف لاستیک موجب افزایش ظرفیت تحمل نیروی مخلوط شده و مدول‌های مکانیکی مانند مدول سکانت و مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد. همچنین در برابر بارگذاری چرخه‌ای مقاومت کرده و رفتار کشسانی-پلاستیکی بهتری نشان می‌دهند. در نهایت نیز می‌توان بیان کرد که وجود الیاف لاستیک باعث کاهش انقباض و تغییر حجم می‌شود که به مخلوط خاصیت پایداری حجمی بیشتری می‌بخشد.



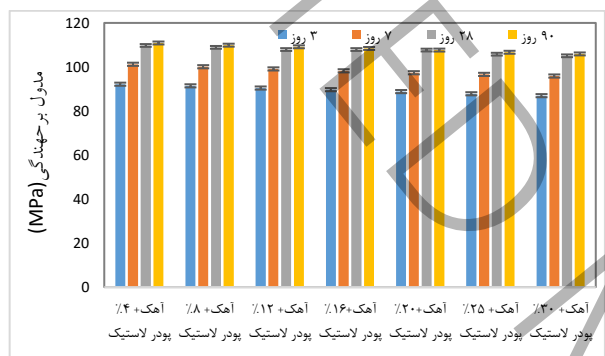
شکل (۴): پارمترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری متفاوت

Figure 4. Mechanical parameters of lime concrete samples at the different curing times



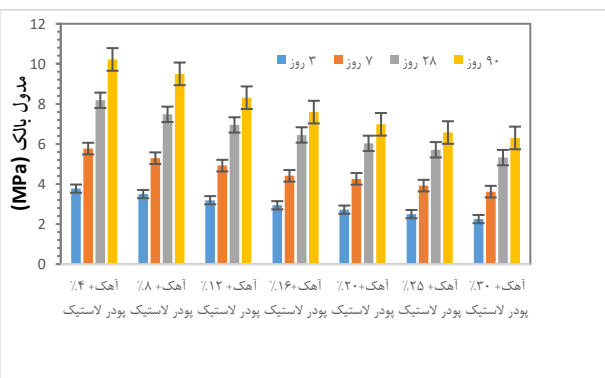
شکل (۶): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر کرنش شکست نمونه های شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری

Figure 6. Effects of the rubber powder on the failure strain of lime concrete samples at the curing times



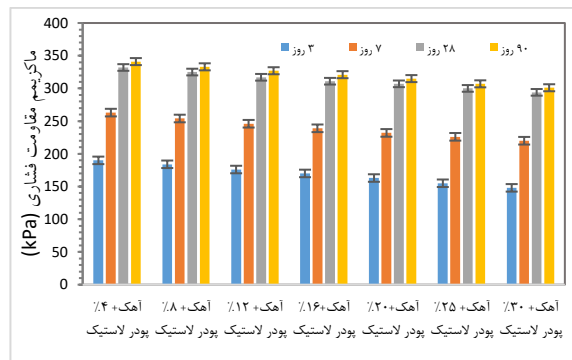
شکل (۸): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مدول برجهنگی نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Figure 8. Effects of the rubber powder on the resilient modulus of lime concrete samples at the curing times



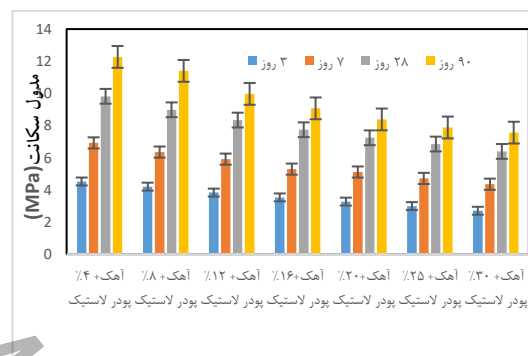
شکل (۱۰): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مدول حجمی نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری متفاوت

Figure 7. Effects of the rubber powder on the bulk modulus of lime concrete samples at the curing times



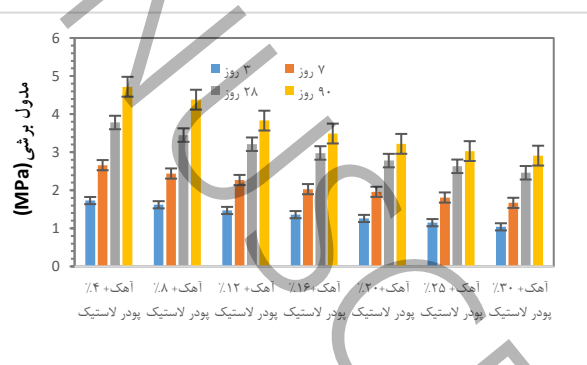
شکل (۵): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مقاومت فشاری بیشینه نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Figure 5. Effects of the rubber powder on the maximum compressive strength of lime concrete samples



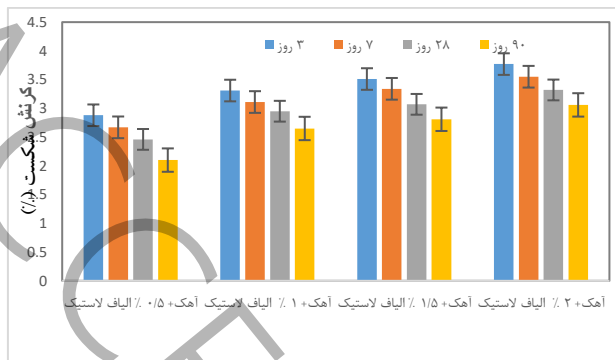
شکل (۷): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مدول سکانت شفته آهک در زمان های عمل آوری متفاوت

Figure 7. Effects of the rubber powder on the secant modulus of lime concrete samples at the curing times



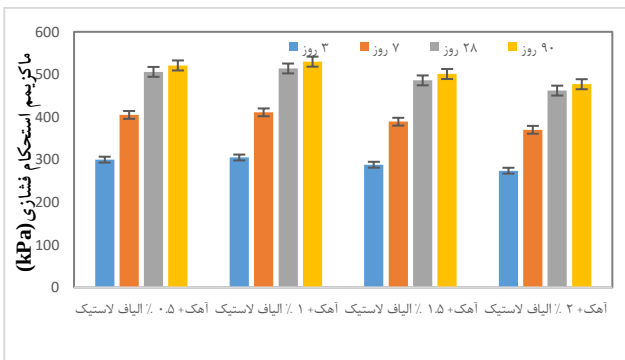
شکل (۹): تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مدول برشی نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Figure 6. Effects of the rubber powder on the shear modulus of lime concrete at the curing times



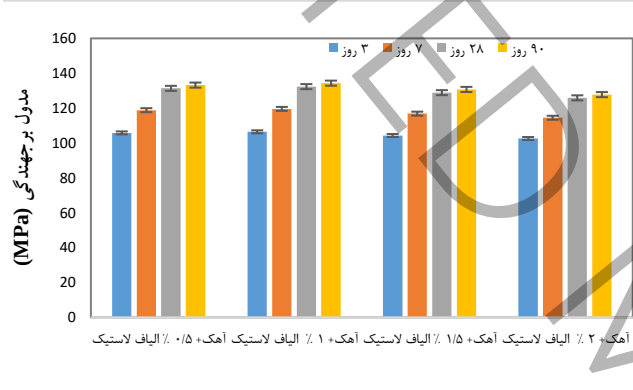
شکل (۱۲): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Figure 9. Effects of tire fiber on the failure strain of lime concrete samples at the curing times



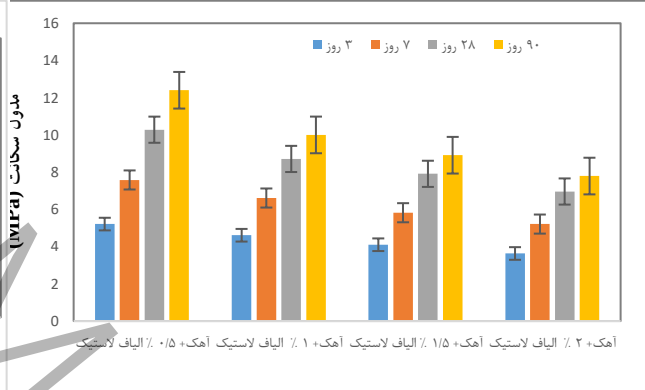
شکل (۱۱): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مقاومت فشاری بیشینه نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل آوری

Figure 8. Effects of tire fibres on the maximum compressive strength of lime concrete samples at the curing times



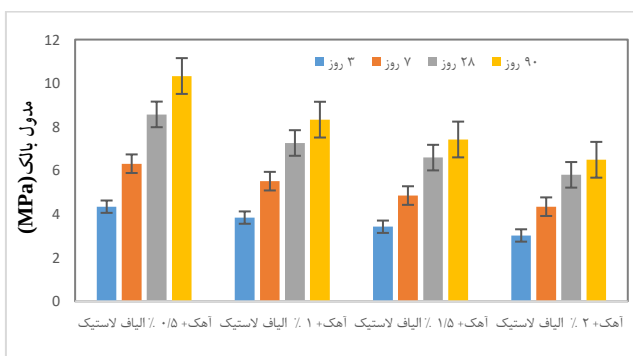
شکل (۱۴): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مدول برجهنگی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Figure 14. Effects of the tire fibres on the resilient modulus of lime concrete samples at the curing times



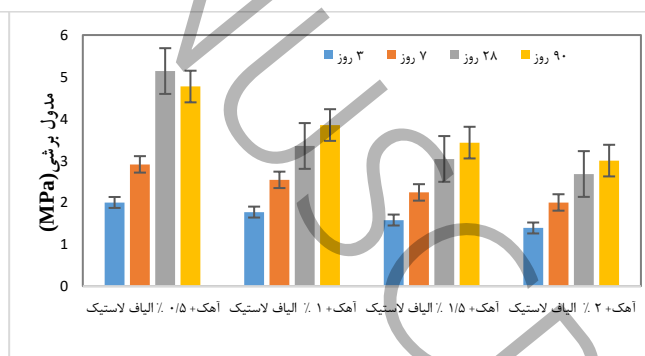
شکل (۱۳): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مدول سکانت نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Figure 13. Effects of the tire fiber on the secant modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل (۱۶): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مدول حجمی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Figure 16. Effects of rubber fibre on the bulk modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل (۱۵): تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مدول برشی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Figure 15. Effects of rubber fibres on the shear modulus of lime concrete samples at the curing times

جدول (۷): پارامترهای مکانیکی شفته آهک - خاکستر بادی با و بدون پودر لاستیک افزودنی

Table 4: geotechnical parameters of mixture of lime and fly- ash samples with different percentages of rubber powder

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل آوری (روز)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهندگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک + خاکستر بادی	۳	۲۶۱	۲/۳۰	۵/۶۷	۱۰۰/۹۶	۲/۱۸	۴/۷۲
		۷	۴۳۲	۲/۰۴	۱۰/۵۹	۱۲۲/۱۶۹	۴/۰۷	۸/۸۲
		۲۸	۶۷۹	۱/۸۳	۱۸/۵۵	۱۵۲/۸۰	۷/۱۳	۱۵/۴۵
		۹۰	۶۹۸	۱/۴۷	۲۳/۷۴	۱۵۵/۱۵	۹/۱۳	۱۹/۷۸
	آهک + خاکستر بادی + ۴٪ پودر لاستیک	۳	۲۴۹	۲/۵۲	۴/۹۴	۹۹/۴۸	۱/۹۰	۴/۱
		۷	۴۲۲	۲/۲۷	۹/۲۹	۱۲۰/۹۳	۳/۵۷	۷/۷۴
		۲۸	۶۶۰	۲/۰۳	۱۶/۲۵	۱۵۰/۴۴	۶/۲۵	۱۳/۵۴
		۹۰	۶۸۴	۱/۶۶	۲۰/۶۰	۱۵۳/۴۲	۷/۹۲	۱۷/۱۷
	آهک + خاکستر بادی + ۸٪ پودر لاستیک	۳	۲۴۰	۲/۵۸	۴/۶۵	۹۶/۸۷	۱/۷۹	۳/۸۸
		۷	۴۰۳	۲/۳۹	۸/۴۳	۱۱۸/۵۷	۳/۲۴	۷/۰۲
		۲۸	۶۴۵	۲/۱۶	۱۴/۹۳	۱۴۸/۵۸	۵/۷۴	۱۲/۴۴
		۹۰	۶۸۲	۱/۷۷	۱۹/۲۶	۱۵۳/۱۷	۷/۴۱	۱۶/۰۵
	آهک + خاکستر بادی + ۱۲٪ پودر لاستیک	۳	۲۲۸	۲/۷۷	۴/۱۱	۹۶/۸۷	۱/۵۸	۳/۴۲
		۷	۳۹۱	۲/۴۸	۷/۸۸	۱۱۷/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۷
		۲۸	۶۳۴	۲/۲۹	۱۳/۸۴	۱۴۷/۲۲	۵/۳۲	۱۱/۵۳
		۹۰	۸۲۰	۱/۹۳	۲۱/۲۴	۱۷۰/۲۸	۸/۱۷	۱۷/۷۰
۲	آهک + خاکستر بادی + ۱۶٪ پودر لاستیک	۳	۲۱۹	۲/۸۷	۳/۸۱	۹۵/۷۶	۱/۴۶	۳/۱۷
		۷	۳۷۹	۲/۷۱	۶/۹۹	۱۱۵/۶۰	۲/۶۹	۵/۸۲
		۲۸	۶۲۲	۲/۴۴	۱۲/۷۴	۱۴۵/۷۳	۴/۸۹	۱۰/۶۷
		۹۰	۸۰۰	۲/۱۱	۱۸/۹۶	۱۶۷/۸	۷/۲۹	۱۵/۸۰
	آهک + خاکستر بادی + ۲۰٪ پودر لاستیک	۳	۲۱۲	۲/۹۹	۳/۵۴	۹۴/۸۹	۱/۳۶	۲/۹۵
		۷	۳۷۳	۲/۷۱	۶/۸۸	۱۱۴/۸۵	۲/۶۴	۵/۷۳
		۲۸	۶۱۵	۲/۵۵	۱۲/۰۶	۱۴۴/۸۶	۴/۶۴	۱۰/۰۵
		۹۰	۷۸۷	۲/۲۰	۱۷/۸۹	۱۶۶/۱۹	۶/۸۹	۱۴/۹۰
	آهک + خاکستر بادی + ۲۵٪ پودر لاستیک	۳	۲۰۰	۳/۱۰	۳/۲۲	۹۳/۴۰	۱/۲۴	۲/۶۸
		۷	۳۶۰	۲/۸۵	۶/۳۱	۱۱۳/۲۴	۲/۴۳	۵/۲۶
		۲۸	۶۰۳	۲/۶۱	۱۱/۵۵	۱۴۳/۳۷	۴/۴۴	۹/۶۲
		۹۰	۷۶۶	۲/۳۴	۱۶/۳۷	۱۶۳/۵۸	۶/۳۰	۱۳/۶۴
	آهک + خاکستر بادی + ۳۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۹۷	۳/۲۶	۳/۰۲	۹۳/۰۳	۱/۱۶	۲/۵۲
		۷	۳۵۵	۳/۰۲	۵/۸۸	۱۱۲/۶۲	۲/۲۶	۴/۹۰
		۲۸	۵۸۷	۲/۷۶	۱۰/۶۳	۱۴۱/۳۹	۴/۰۹	۸/۸۶
		۹۰	۷۵۲	۲/۳۷	۱۵/۸۶	۱۶۱/۸۵	۶/۱۰	۱۳/۲۲

جدول (۸): پارامترهای مکانیکی شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون الیاف لاستیک افزودنی

Table 5: geotechnical parameters of mixture of lime and fly- ash samples with different percentages of rubber fibers

مدول حجمی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول برجهندگی (MPa)	مدول سکانت (MPa)	کرنش شکست (%)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	زمان عمل آوری (روز)	ماده افزودنی	نمونه اختلاط
۴/۷۲	۲/۱۸	۱۰۰/۹۶	۵/۶۷	۲/۳۰	۲۶۱	۳	آهک + خاکستر بادی	۱
۸/۸۲	۴/۰۷	۱۲۲/۱۶۹	۱۰/۵۹	۲/۰۴	۴۳۲	۷	آهک + خاکستر بادی	
۱۵/۴۵	۷/۱۳	۱۵۲/۸۰	۱۸/۵۵	۱/۸۳	۶۷۹	۲۸	آهک + خاکستر بادی	
۱۹/۷۸	۹/۱۳	۱۵۵/۱۵	۲۳/۷۴	۱/۴۷	۶۹۸	۹۰	آهک + خاکستر بادی	
۴/۷۷	۲/۲۰	۱۱۶/۸۷	۵/۷۲	۳/۴۰	۳۸۹	۳	آهک + خاکستر بادی + ۰/۵٪ الیاف لاستیک	۲
۸/۴۵	۳/۹۰	۱۴۸/۸۳	۱۰/۱۴	۳/۱۹	۶۴۷	۷	آهک + خاکستر بادی + ۰/۵٪ الیاف لاستیک	
۱۴/۰۲	۶/۴۷	۱۹۳/۴۷	۱۶/۸۳	۲/۹۹	۱۰۰۷	۲۸	آهک + خاکستر بادی + ۰/۵٪ الیاف لاستیک	
۲۱/۳۳	۹/۸۵	۲۲۸/۵۶	۲۵/۶۰	۲/۵۲	۱۲۹۰	۹۰	آهک + خاکستر بادی + ۰/۵٪ الیاف لاستیک	
۴/۱۷	۱/۹۲	۱۱۷/۵۸	۵/۰۰	۳/۹۵	۳۹۵	۳	آهک + خاکستر بادی + ۱٪ الیاف لاستیک	۳
۷/۳۵	۳/۴۰	۱۵۰/۱۹	۸/۸۲	۳/۷۳	۶۵۸	۷	آهک + خاکستر بادی + ۱٪ الیاف لاستیک	
۱۲/۱۹	۵/۶۳	۱۹۵/۵۸	۱۴/۶۳	۳/۵۰	۱۰۲۴	۲۸	آهک + خاکستر بادی + ۱٪ الیاف لاستیک	
۱۵/۵۴	۷/۱۷	۲۱۴/۸۰	۱۸/۶۵	۳/۱۶	۱۱۷۹	۹۰	آهک + خاکستر بادی + ۱٪ الیاف لاستیک	
۳/۷۷	۱/۷۴	۱۱۴/۹۷	۴/۵۳	۴/۱۳	۳۷۴	۳	آهک + خاکستر بادی + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	
۶/۴۷	۲/۹۹	۱۴۵/۴۸	۷/۷۷	۳/۹۹	۶۲۰	۷	آهک + خاکستر بادی + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	
۱۰/۹۷	۵/۰۶	۱۸۹/۰۰	۱۳/۱۶	۳/۶۹	۹۷۱	۲۸	آهک + خاکستر بادی + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	
۱۵/۲۶	۷/۰۴	۲۲۳/۴۸	۱۸/۳۱	۲/۴۱	۱۲۴۹	۹۰	آهک + خاکستر بادی + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	
۳/۲۹	۱/۵۱	۱۱۲/۷۴	۳/۹۵	۴/۵۰	۳۵۶	۳	آهک + خاکستر بادی + ۲٪ الیاف لاستیک	
۵/۷۷	۲/۶۸	۱۴۲/۱۳	۶/۹۶	۴/۲۶	۵۹۳	۷	آهک + خاکستر بادی + ۲٪ الیاف لاستیک	
۶/۲۱	۲/۸۷	۱۸۲/۶۹	۷/۴۵	۳/۹۸	۹۲۰	۲۸	آهک + خاکستر بادی + ۲٪ الیاف لاستیک	
۱۳/۶۷	۶/۳۱	۲۱۶/۲۸	۱۶/۴۰	۳/۶۳	۱۱۹۱	۹۰	آهک + خاکستر بادی + ۲٪ الیاف لاستیک	

۳-۲- خواص مکانیکی شفته خاکستر بادی- آهکی با و بدون افزودنی

در جدول (۷) پارامترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون مواد افزودنی خلاصه شده‌اند. نتایج مربوط به کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک- خاکستر بادی حدوداً ۲۰٪ بیشتر از نمونه‌های شفته آهک است. که نشان از افزایش پلاستیسیته و شکل پذیری نمونه‌های شفته آهک- خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های شفته آهک دارد. در مورد دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی، مدول سکانت، برجهندگی، برشی و حجمی شفته آهک- خاکستر بادی در تمامی زمان‌های عمل‌آوری بیشتر از شفته آهک است. روند تغییر این مدول ها با افزایش زمان عمل‌آوری مشابه نمونه شفته آهک است. با مقایسه جداول (۵) و (۶) می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری بیشینه شفته آهک- خاکستر بادی نسبت به شفته آهک بیشتر است و در زمان‌های عمل‌آوری بیشتر ۲۸ و ۹۰ روز تقریباً دو برابر است. افزودن خاکستر بادی به شفته آهک باعث افزایش کرنش شکست و پلاستیسیته خاک می‌شود. دلیل این امر این است که خاکستر بادی شامل ذرات ریز و واکنش‌پذیر است که در ترکیب با آهک به فرآیند پوزولانی منجر می‌شود. این واکنش‌ها توده‌های سیمانی تولید می‌کنند که منجر به پیوند قوی‌تر بین ذرات خاک می‌شود. حضور این ژل‌ها باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود، زیرا در برابر تنش‌های بزرگ‌تر، خاک سیمانی شده مقاومت بیشتری نشان می‌دهد، در نتیجه شکل‌پذیری و کرنش شکست بیشتر در شفته آهک- خاکستر بادی نسبت به شفته آهک را در پی دارد. از طرف واکنش‌های شیمیایی بین آهک و خاکستر بادی (به‌ویژه در حضور سیلیکا و آلومینا در خاکستر بادی) منجر به تشکیل ترکیبات مقاوم‌تر (نظیر کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینات هیدرات) می‌شود. این ترکیبات باعث افزایش

سختی و مقاومت فشاری نمونه‌ها در طول زمان عمل‌آوری می‌گردند و در نتیجه مدول‌های برجهندگی، برشی و حجمی و همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی بیشتر می‌شود.

۱-۲-۳- شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون افزودنی حاوی پودر لاستیک

در مقایسه مقاومت فشاری بیشینه نمونه‌ها در درصدهای مختلف و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها تا افزودن ۱۲٪ پودر لاستیک روند افزایش داشته و پس از آن کاهش می‌یابد. با این حال افزودن پودر لاستیک بیشتر از ۸٪ به شفته آهک-خاکستر بادی موجب افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی بدون ماده افزودنی است. هم چنین افزایش زمان عمل‌آوری باعث کاهش کرنش شکست در تمامی درصدها می‌شود. با این حال، کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی در تمام درصدها و زمان‌های عمل‌آوری بیشتر از نمونه شفته آهک-خاکستر بادی بدون پودر لاستیک است.

پودر لاستیک به عنوان یک ماده انعطاف‌پذیر و با خاصیت پرکنندگی در منافذ خاک حاوی ماسه بادی عمل می‌کند. در درصدهای پایین تا متوسط، این ماده باعث کاهش تخلخل و بهبود توزیع تنش در ساختار خاک می‌شود و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری تا حد معین (۱۲٪) و سپس کاهش به دلیل اشباع بیش از حد ساختار با مواد غیرواکنشی می‌شود. بعلاوه به دلیل اینکه در طول زمان، واکنش‌های شیمیایی در ساختار خاک ادامه می‌یابد و ساختار سخت‌تر و شکننده‌تر می‌شود. پودر لاستیک، اگرچه کرنش شکست را در مراحل اولیه افزایش می‌دهد، اما با پیشرفت زمان این اثر تعدیل می‌شود و در نتیجه باعث کاهش کرنش شکست با گذشت زمان در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک می‌شود. بعلاوه حضور الیاف لاستیک باعث تقویت ساختار خاک و کاهش تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. این امر به افزایش مدول‌های برشی، برجهندگی، و حجمی منجر می‌گردد.

۲-۲-۳- شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون افزودنی حاوی الیاف لاستیک

افزودن الیاف لاستیک به شفته آهک-خاکستر بادی موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بیشینه و کرنش شکست در مقایسه با تمام نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش می‌شود. در برخی از درصدهای الیاف لاستیک، مقاومت فشاری بیشینه به بالاتر از ۱۰۰۰ kPa نیز رسید. افزایش زمان عمل‌آوری در درصد الیاف ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در در زمان عمل‌آوری ثابت به ترتیب موجب کاهش و افزایش کرنش شکست می‌شود.

مدول سکانت، برشی، برجهندگی و حجمی نمونه‌ها حاوی الیاف لاستیک بیشتر از سایر نمونه‌های این پژوهش گزارش شد و روند تغییر در روند آن‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری و درصد الیاف مشابه نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی حاوی پودر لاستیک است. هم چنین مقاومت فشاری بیشینه در ترکیب خاک-خاکستر بادی به تنهایی یا در ترکیب با آهک به صورت جزئی افزایش یافت و وقتی ماکزیمم ۴٪ خاکستر بادی استفاده می‌شود. مقاومت با افزودن ۶٪ و زمان عمل‌آوری ۹۰ روز بیشترین مقدار گزارش می‌شود. علت این رفتار را می‌توان چنین بیان نمود که خاکستر بادی در ترکیب با خاک و آهک بهینه‌ترین واکنش‌های پوزولانی را در محدوده خاصی از درصدهای افزودن خاکستر بادی ایجاد می‌کند و افزودن مقادیر بیشتر باعث تضعیف ساختار به دلیل کاهش پیوند مستقیم ذرات خاک شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر همزمان افزودنی‌های سنتی با ضایعات لاستیک‌های فرسوده و مواد پلیمری باز یافتی بر بهسازی خاک مورد بررسی قرار گرفت. به استناد آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه ای شفته آهک و شفته آهک-خاکستر بادی با مواد افزودنی، نتایج زیر حاصل شده است:

- افزودن آهک، خاکستر بادی، و ضایعات لاستیکی به صورت جداگانه و ترکیبی منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی خاک‌های ضعیف شد و این روش‌ها به عنوان جایگزین اقتصادی و زیست‌محیطی قابل استفاده هستند.
- نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۵٪ و ۱٪ الیاف لاستیکی بیشترین افزایش مقاومت فشاری را ایجاد کرده است، در حالی که افزایش بیش از این مقدار باعث کاهش مقاومت می‌شود.

- حضور الیاف لاستیک در ترکیب، کرنش شکست و شکل پذیری خاک را افزایش داده، که می تواند موجب افزایش انعطاف پذیری خاک در برابر تغییر شکل های ناگهانی شود.
- مدول سکانت، برجهندگی، و برشی در نمونه های حاوی الیاف لاستیک به طور قابل توجهی افزایش یافت، که نشان دهنده توانایی بالای این مواد در تحمل بارگذاری های سنگین است.
- با افزایش زمان عمل آوری تا ۹۰ روز، مقاومت فشاری و مدول های مکانیکی به دلیل تکمیل واکنش های پوزولانی بهبود قابل ملاحظه ای پیدا کردند.
- الیاف لاستیک با ایجاد خاصیت ارتجاعی و توزیع یکنواخت تنش ها، شکنندگی نمونه ها را کاهش داده و رفتار خاک را پایدارتر کرده است.
- افزودن مقادیر زیاد پودر لاستیک (بیش از ۴٪) باعث کاهش تدریجی خواص مقاومتی به دلیل کاهش تراکم و افزایش فضای خالی در مخلوط شد.
- استفاده از ضایعات لاستیکی و خاکستر بادی به عنوان جایگزین مواد سنتی به کاهش زباله های صنعتی و هزینه های ساخت و ساز کمک می کند.
- ترکیب خاکستر بادی و آهک در درصدهای بهینه، مقاومت فشاری و کرنش شکست نمونه ها را بهبود داده و تأثیرات بهتری نسبت به استفاده از این مواد به صورت مجزا داشت.
- تحلیل دقیق اثرات مواد افزودنی در این تحقیق می تواند راهنمایی برای طراحی مخلوط های بهینه در پروژه های ژئوتکنیکی با در نظر گرفتن شرایط محلی و محدودیت های اجرایی باشد.
- مقاومت فشاری نمونه ی شفته آهک-خاکستر بادی با افزودن الیاف لاستیک افزایش چشمگیری دارد و در زمان های عمل آوری ۹۰ روز در درصدهای مختلف به بالاتر از ۱۰۰۰ kPa می رسد.
- نمونه های شفته آهک-خاکستر بادی حاوی الیاف لاستیک بالاترین کرنش شکست را در تمام درصدها و زمان عمل آوری نسبت به سایر نمونه های این تحقیق دارد که حاکی از رفتار شکل پذیرتر آنهاست.

۵- مراجع:

- [۱] J. Mitchell, Soil improvement: state-of-the-art: Department of Civil Engineering, University of California, 1981.
- [۲] M.R. Malekpoor, M.M. Toufigh, Laboratory study of soft soil improvement using lime mortar-(well graded) soil columns, J Geotechnical Testing Journal. (۲۰۱۰) (۳) ۳۳
- [۳] M. Stefanidou, I. Papayianni, The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars, Cement Concrete Composites, 27(9-10) (2005) 914-919.
- [۴] M. Saberian, S. Jahandari, J. Li, F. Zivari, Effect of curing ,capillary action, and groundwater level increment on geotechnical properties of lime concrete: Experimental and prediction studies, Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering, 9(4) (2017) 638-647.
- [۵] S. Jahandari, M. Saberian, Z. Tao, S.F. Mojtahedi, J. Li, M. Ghasemi, S.S. Rezvani, W. Li, Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, J Cold Regions Science Technology. ۲۵۱-۲۴۲ (۲۰۱۹) ۱۶۰.

- [۶] P.V. Sivapullaiah, J. Prashanth, A. Sridharan, Optimization of lime content for fly ash, *Journal of testing and evaluation*, 23(3) (1995) 222-227.
- [۷] P. Mehrabi, M. Shariati, K. Kabirifar, M. Jarrah, H. Rasekh, N.T. Trung, A. Shariati, S. Jahandari, Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 287 (2021) 122652.
- [۸] F. Hanaei, M.S. Sarmadi, M. Rezaee, A. Rahmani, Experimental investigation of the effects of gas oil and benzene on the geotechnical properties of sandy soils, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2) (2021) 1-8.
- [۹] M. Rezania, H. Moradnezhad, M. Panahandeh, M.J.R. Kami, A. Rahmani, B.V. Hosseini, Effects of diethanolamine (DEA) and glass fibre reinforced polymer (GFRP) on setting time and mechanical properties of shotcrete, *Journal of Building Engineering*, 31 (2020) 101343.
- [۱۰] V. Farhangi, M. Karakouzian, Effect of fiber reinforced polymer tubes filled with recycled materials and concrete on structural capacity of pile foundations, *Applied Sciences*, 10(5) (2020) 1554.
- [۱۱] M.M. Roshani, S.H. Kargar, V. Farhangi, M. Karakouzian, Predicting the effect of fly ash on concrete's mechanical properties by ann, *Sustainability*, 13.۱۴۶۹ (۲۰۲۱) (۳)
- [۱۲] B. Mehdizadeh, S. Jahandari, K. Vessalas, H. Miraki, H. Rasekh, B. Samali, Fresh, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar incorporating alumina nanoparticles and rice husk ash, *Materials*, 14(22) (2021) 6778.
- [۱۳] S. Jahandari, M. Mohammadi, A. Rahmani, M. Abolhasani, H. Miraki, L. Mohammadifar, M. Kazemi, M. Saberian, M. Rashidi, Mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume and steel fibres, *Materials*, 14(22) (2021) 7065.
- [۱۴] L. Mohammadifar, H. Miraki, A. Rahmani, S. Jahandari, B. Mehdizadeh, H. Rasekh, P. Samadi, B. Samali, Properties of Lime-Cement Concrete Containing Various Amounts of Waste Tire Powder under Different Ground Moisture Conditions, *Polymers*, 14(3) (2022) 482.
- [۱۵] S. Jahandari, M. Mohammadi, A. Rahmani, M. Abolhasani, H. Miraki, L. Mohammadifar, M. Kazemi, M. Saberian, M. Rashidi, Mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume and steel fibres, *J Materials*. ۷.۶۵ (۲۰۲۱) (۲۲) ۱۴
- [۱۶] O. Azadegan, G.R. Pourebrahim, Effect of Geogrids on Compressive Strength and Elasticity Modulus of Lime/Cement Treated Soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 15(2010) (2010) 1571.
- [۱۷] V. Farhangi, M. Karakouzian, Effect of fiber reinforced polymer tubes filled with recycled materials and concrete on structural capacity of pile foundations, *J Applied Sciences*, 10(5) (2020) 1554.
- [۱۸] O. Azadegan, G.R. Pourebrahim, Effect of Geogrids on Compressive Strength and Elasticity Modulus of Lime/Cement Treated Soils, *J Electrical Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (2010) 1571-1580.
- [۱۹] S. Jahandari, J. Li, M. Saberian, M. Shahsavarigoughari, Experimental study of the effects of geogrids on elasticity modulus, brittleness, strength, and stress-strain behavior of lime stabilized kaolinitic clay, *GeoResJ*, 13 (2017) 49-58.
- [۲۰] S. Jahandari, S.F. Mojtahedi, F. Zivari, M. Jafari, M.R. Mahmoudi, A. Shokrgozar, S. Kharazmi, B. Vosough Hosseini, S. Rezvani, H. Jalalifar, The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils, *J Geomechanics Geoengineering*, 17(1) (2022) 269-281.
- [۲۱] S. Jahandari, Z. Tao, M.A. Alim, Effects of different integral hydrophobic admixtures on the properties of concrete, in: *Proceedings of the 30th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia*, Perth, Australia, 2021, pp. 5-8.

- [۲۲] L. Mohammadifar, H. Miraki, A. Rahmani, S. Jahandari, B. Mehdizadeh, H. Rasekh, P. Samadi, B. Samali, Properties of lime-cement concrete containing various amounts of waste tire powder under different ground moisture conditions, *Polymers*, 14(3) (2022) 482.
- [۲۳] B. Phani Kumar, R.S.J.J.o.G. Sharma, G. Engineering, Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, 13.۷۶۷-۷۶۴ (۲۰۰۴) (۷).
- [۲۴] P. Dahale, P. Nagarnaik, A. Gajbhiye, Effect OF flyash and lime on stabilization of expansive soil, *J Journal on Civil Engineering*, 6(2) (2016) 8.
- [۲۵] C.H. Signes, J. Garzón-Roca, P.M. Fernández, M.E.G. de la Torre, R.I. Franco, Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres, *Applied Clay Science*, 132 (2016) 768-773.
- [۲۶] D. Akbarimehr, E.J.C.E.J. Aflaki, An experimental study on the effect of tire powder on the geotechnical properties of clay soils, 4(3) (2018) 594-601.
- [۲۷] S. Ghareh, F. Akhlaghi, K.J.J.o.R.i.C.E. Yazdani, A Study on the Effects of Waste Rubber Tire Dimensions on Fine-Grained Soil Behavior, 8(3) (2020) 15-33.
- [۲۸] D. Akbarimehr, K.J.S.D. Fakharian, E. Engineering, Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus, 140 (2021) 106435.
- [۲۹] D. Akbarimehr, A. Rahai, A. Eslami, M.J.S. Karakouzian, Deformation characteristics of rubber waste powder–clay mixtures, 15(16) (2023) 12384.
- [۳۰] D. Czarna-Juszkiewicz, P. Kunecki, J. Cader, M.J.M. Wdowin, Review in waste tire management—potential applications in mitigating environmental pollution, 16(17) (2023) 5771.
- [۳۱] A. Eslami, D. Akbarimehr, A. Rahai, M.J.H. Karakouzian, Investigation of constitutive properties of high plasticity clay soils mixed with crushed rubber tire waste, 10(5.(۲۰۲۴)
- [۳۲] S. Gücek, C. Güreş, B. Žlender, M.V. Taciroğlu, B.E. Korkmaz, K. Gürkan, T. Bračko, B. Macuh, R. Varga, P.J.A.S. Jelušič, Use of Lignin, Waste Tire Rubber, and Waste Glass for Soil Stabilization, 14(17) (2024) 7532.
- [۳۳] M.R. Hassan, D.J.S. Rodrigue, Application of Waste Tire in Construction: A Road towards Sustainability and Circular Economy, 16(9) (2024) 3852.
- [۳۴] A. Hejna, P. Kosmela, A. Olszewski, Ł. Zedler, K. Formela, K. Skórczewska, A. Piasecki, M. Marć, R. Barczewski, M.J.E.S. Barczewski, P. Research, Management of ground tire rubber waste by incorporation into polyurethane-based composite foams, 31(12) (2024) 17591-17616.
- [۳۵] R. Showkat, B. Mir, K.S.J.G. Wani, Geoengineering, Experimental investigation on reuse of dredged soils improved using waste rubber tyre powder (WRTP) and cement as admixtures, (2024) 1-15.
- [۳۶] D. Akbarimehr, S.M.M.M.J.A.J.o.G. Hosseini, Elasto-plastic characteristics of the clay soil mixed with rubber waste using cyclic triaxial test results, 15(14) (2022) 1280.
- [۳۷] A. C25-19, Standard test methods for chemical analysis of limestone, quicklime, and hydrated lime, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2019.
- [۳۸] M. Kazemi, M. Hajforoush, P.K. Talebi, M. Daneshfar, A. Shokrgozar, S. Jahandari, M. Saberian, J. Li, In-situ strength estimation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and point load test, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(5) (2020) 289-306.
- [۳۹] A. Afshar, S. Jahandari, H. Rasekh, M. Shariati, A. Afshar, A. Shokrgozar, Corrosion resistance

evaluation of rebars with various primers and coatings in concrete modified with different additives, *Construction and Building Materials*, 262 (2020) 120034.

[۴۰] M. Saberian, M. Mehrinejad Khotbehsara, S. Jahandari, R. Vali, J. Li, Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(4) (2018) 347-356.

[۴۱] A. Toghroli, P. Mehrabi, M. Shariati, N.T. Trung, S. Jahandari, H. Rasekh, Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers, *Construction and Building Materials*, 252 (2020) 118997.

[۴۲] H. Rasekh, A. Joshaghani, S. Jahandari, F. Aslani, M. Ghodrat, Rheology and workability of SCC, in: *Self-compacting concrete: materials, properties and applications*, Elsevier, 2020, pp. 31-63.

[۴۳] R. Vali, E. Mehrinejad Khotbehsara, M. Saberian, J. Li, M. Mehrinejad, S. Jahandari, A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(3) (2019) 236-248.

[۴۴] A. Darvishi, H. Vosoughifar, S. Saeidijam, M. Torabi, A. Rahmani, An experimental and prediction study on the compaction and swell-expansion behavior of bentonite clay containing various percentages of two different synthetic fibers, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1) (2020) 1-15.

[۴۵] F. Sadeghian, S. Jahandari, A. Haddad, H. Rasekh, J. Li, Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2) (2022) 625-636.

[۴۶] P. Mehrabi, S. Honarbari, S. Rafiei, S. Jahandari, M. Alizadeh Bidgoli, Seismic response prediction of FRC rectangular columns using intelligent fuzzy-based hybrid metaheuristic techniques, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(11) (2021) 10105-10123.

[۴۷] M. Parsajoo, D.J. Armaghani, A.S. Mohammed, M. Khari, S. Jahandari, Tensile strength prediction of rock material using non-destructive tests: A comparative intelligent study, *Transportation Geotechnics*, 31 (2021) 100652.

[۴۸] S. Jahandari, Z. Tao, M. Saberian, M. Shariati, J. Li, M. Abolhasani, M. Kazemi, A. Rahmani, M. Rashidi, Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions, *Road Materials and Pavement Design*, 23(9) (2022) 2057-2075.

[۴۹] M. Kazemi, M. Daneshfar, Y. Zandi, A. Sadighi Agdas, N. Yousefieh, L. Mohammadifar, A. Rahmani, M. Saberian, A. Mamdouh, M.A. Khadimallah, Effects of the Concrete Strength and FRP Reinforcement Type on the Non-Linear Behavior of Concrete Deep Beams, *Sustainability*, ۱۳۶ (۲۰۲۲) (۷) ۱۴,

[۵۰] ASTM, 5102 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, in: *ASTM D*, 1996.

[۵۱] K.J.J.o.t. Fishman, Testing techniques for measurement of bulk modulus, *Journal of testing evaluation*, ۱۶۷-۱۶۱ (۱۹۹۴) (۲) ۲۲

[۵۲] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete, *Cement and Concrete Research*, 89 (2016) 249-256.

[۵۳] A. T307-99, Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, in: *American Association of State Highway and Transportation Officials ...*, 2017.