ارزیابی و مقایسه تاثیر ضایعات کیسه پلیمری و تایر فرسوده بر خصوصیات مقاومتی ماسه رس‌دار تثبیت شده با سیمان

مقاله پژوهشی

حامد هادیزاده، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

مجتبی قاسمی*، استادیار، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghasemi.kgut@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰٤/۲۸- پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۵

صفحه ۹۲-٦۹

چکیده

در این تحقیق امکان استفاده از الیاف ضایعات کیسه‌های پلیمری، خرده لاستیک و همچنین الیاف ضایعاتی لاستیک (به تنهایی و در ترکیب با سیمان) به منظور تثبیت خاک ماسه رس‌دار ارزیابی شده است. برخی مشخصات اصلی نمونه‌های آزمایشگاهی با آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم پروکتور استاندارد و مقاومت فشاری تک محوری حاصل شده‌اند. مشخصات به دست آمده با خواص ماسه رس دار تثبیت نشده و تثبیت شده با سیمان مقایسه شده و نتایج مشاهده شده تشریح شده است. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های اصلاح شده با سیمان سبب کاهش قابل ملاحظه ای در دامنه خمیری خاک می‌شوند. نتایج تست تراکم نشان می‌دهد که مخلوط کردن ضایعات برای تثبیت خاک ماسه‌ای سبب کاهش مقدار رطوبت بهینه و نیز کاهش دانسیته خشک حداکثر شده است. از میان مواد ضایعاتی استفاده شده، الیاف کیسه پلیمری بیشترین تاثیر را بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر با کاهش ٤/۱ درصدی آن نشان داد. نتایج نشان می دهند که استفاده از ضایعات به تنهایی برای تثبیت ماسه سبب افزایش اندکی در مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها می‌شود؛ در حالی که ترکیب ضایعات و سیمان سبب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌ها در همان زمان عمل آوری شده است. همچنین نمونه‌های ساخته شده با الیاف کیسه پلیمری نسبت به سایر نمونه‌ها دارای بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری محدود نشده و جابجایی حداکثر به ترتیب برابر ۳۲ و ۵۸ درصد می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: ماسه رس دار، الیاف کیسه پلیمری، الیاف تایر فرسوده، خرده لاستیک، مقاومت فشاری تک محوری

۱-مقدمه

سیمان از جمله مصالحی می‌باشد که از دیرباز برای اصلاح و تثبیت خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه سیمان به عنوان یک تثبیت کننده شیمیایی، تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات مقاومتی خاک‌های ضعیف دارد اما استفاده از این تثبیت کننده، رفتار شکل پذیری مصالح تثبیت شده با سیمان را کاهش می دهد. از سوی دیگر فرآیند تولید افزودنی‌های رایج مانند سیمان، تاثیرات مخربی بر روی محیط زیست دارد. در تمام مراحل تولید سیمان مواد آلاینده مختلف انتشار می‌یابند که مهمترین آنها SO_2 و CO_2 هستند (مدرس و ایار، ۱۳۹٤). سیمان دارای مواد پوزولانی بوده و ترکیبات موجود در سیمان پرتلند، با اضافه‌کردن آب تغییر شکل داده و تبدیل به ماده چسباننده‌ای شده و دانه‌های خاک را به هم پیوند می‌دهند. با این حال استفاده از سیمان برای تثبیت خاک های ریزدانه با دامنه خمیری زیاد توصیه نمی‌شود (طاهرخانی و سلامی، ۱۳۹۲). سیمان پرتلند یک ماده ناهمگن بوده که حاوی تری کلسیم سیلیکات (Ca_3S)، دی کلسیم سیلیکات(Ca_2S)، تری کلسیم آلومینات (Ca_3A) و تترا کلسیم آلومینو فریت (Ca_4AF) می‌باشد. واکنش هیدراتاسیون سیمان باعث بوجود آمدن ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته، کلسیم آلومینات هیدراته و آهک هیدراته می‌شود. محصولات هیدراتاسیون

ناشی از سیمانتاسیون سیمان و خاک وقتی بوجود می‌آیند که درصد سیمان به اندازه کافی بالا باشد. علاوه بر واکنش‌های اولیه، واکنش های ثانویه ای بین هیدروکسید کلسیم آزاد و آلومینا و سیلیکای خاک رس می‌تواند منجر به تشکیل اضافی کلسیم سیلیکات و کلسیم آلومینات هیدراته شود(کروفت، ۱۹٦۷; راواس و همکاران،۲۰۰۲). هنگامی که سیمان با خاک مخلوط می‌شود، باعث کاهش حد روانی، حد خمیری و پتانسیل تغییر حجمی خاک شده (بل، ۱۹۸۸) اما سبب افزایش حد انقباض و مقاومت برشی می‌شود. این افزایش مقاومت خاک اصلاح شده با سیمان به علت واکنش های سیمانتاسیون اولیه و ثانویه در خاک می باشد (چن و وونگ، ۲۰۰٦).

سراید و همکاران (۲۰۱۳) برای تثبیت خاک آلی از سیمان و آهک استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش سیمان و آهک بود. آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز کاهش می‌یابد، که این کاهش می تواند به دلیل کاهش pH در طی عمل‌آوری و تشکیل اسید کلسیم معدنی، وقتی که کلسیم موجود در تثبیت کننده با اسید هومیک موجود در خاک واکنش می‌دهد باشد. ضایعات لاستیک حاصل از تایرهای کهنه و فرسوده وسایل نقلیه از جمله مشکلات زیست محیطی بسیاری از کشورها محسوب می‌شود. به بیان دیگر هر لاستیکی که دور انداخته می‌شود، یک تهدید برای سلامتی جامعه و محیط زیست به شمار می‌آید. حجم بالای تولید لاستیک‌های فرسوده و نیاز به انبار کردن آن سبب مشکلات عمده‌ای از جمله بیماری، آتش سوزی و آلودگی آب‌های زیر زمینی می‌شود (مولایی و منصوریان، ۱۳۹٤؛ فخری و همکاران، ۱۳۹۵؛ طائریان و همکاران، ۱۳۹٤). از آنجا که این مواد برای از بین رفتن در طبیعت به زمانی در حدود ٦۰۰۰ سال احتیاج دارند و باتوجه به ممنوعیت ریختن این تایرها در محل های دفن زباله، همچنین برنامه مدیریتی مناسب در این زمینه سبب افزایش بازیافت این مواد ضایعاتی در تعدادی کشورها شده است. در حال حاضر، میزان بازیافت این تایرها حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد در آمریکا، ژاپن و اتحادیه اروپا افزایش یافته است. از این رو، تایرهای فرسوده به مواد خام ثانویه مهم و قابل دسترسی تبدیل شدند که می توانند به طور مؤثر در مهندسی عمران استفاده شوند. خواص منحصر به فرد تایرهای فرسوده که برای مهندسی عمران مفید بوده شامل چگالی پایین، عایق حرارتی خوب، قابلیت زهکشی مناسب، دوام طولانی مدت و تراکم پذیری می باشند. با وجود این خواص تایرهای فرسوده، تنها حدود ۷/٤ درصد این تایرها در اروپا در سال ۲۰۱۰، و حدود ۷/۸ درصد از آنها در آمریکا در سال ۲۰۱۱، در مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفتند (ماشیری و همکاران، ۲۰۱۵؛ طائریان و همکاران، ۱۳۹٤). از نتایج مشاهده شده از مخلوط ماسه و لاستیک فرسوده می‌توان به شکل پذیری قابل توجه، مدول برشی پایین، نسبت میرایی بالا، پتانسیل روانگرایی کم، میرایی قابل توجه و جداساز لرزه‌ای مناسب اشاره کرد (آناستاسیادیس و همکاران، ۲۰۱۲; کانکو و همکاران، ۲۰۱۳). هامبیرا و راکارادی (۲۰۱٤) از تراشه‌های تایر فرسوده برای اصلاح دو نوع خاک متفاوت تثبیت شده با سیمان در دوره‌های عمل‌آوری ٤، ۷ و ۱٤ روزه استفاده کردند. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا با افزایش سیمان و دوره عمل‌آوری و همچنین افزایش درصد لاستیک تا میزان ۵ درصد بود. سیگنس و همکاران (۲۰۱٦) خاک متورم شونده را با ٦ درصد متفاوت خرده لاستیک بدست آمده از تایرهای فرسوده مخلوط کردند. نتایج نشان داد که افزودن خرده لاستیک تا مقدار ۱۵ درصد سبب کاهش وزن و پتانسیل تورم شد. علاوه بر این مقدار بهینه خرده لاستیک به منظور جلوگیری از تورم ۳ درصد تخمین زده شد. همچنین تا مقدار ۲/۵ درصد خرده لاستیک مقاومت فشاری تا مقدار ٤۳۰ کیلوپاسکال افزایش داشت. در نهایت آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن بیش از ۵ درصد وزنی خرده لاستیک، مقاومت برشی زهکشی نشده را کاهش می‌دهد. استفاده از مواد الیافی جهت‌دار مانند خانواده ژئوسنتتیک‌ها باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های ساخته شده با الیاف شده و همچنین به مصالح اجازه خواهد داد تا انرژی بیشتری را قبل از بروز شکست تحمل کنند. استفاده از الیاف برای مسلح‌سازی به دهه ۱۹۵۰ میلادی باز می‌گردد (طاهر خانی و کاظمی، ۱۳۹٤). مطالعات نشان می‌دهد که خصوصیات تنش- کرنش و مقاومت خاک‌های تسلیح شده با الیاف تابعی از میزان الیاف، نسبت طول به عرض الیاف، سطح اصطکاک الیاف در امتداد خاک و خصوصیات مقاومتی الیاف می‌باشد (توفیق و محمدی، ۱۳۹۵). کیسه‌های پلیمری بافته شده از الیاف پلی پروپیلن به طور گسترده‌ای در صنایع بسته بندی از جمله بسته‌بندی سیمان، گچ و کودهای شیمیایی به علت هزینه اقتصادی پایین و کاربردی بودن استفاده می‌شوند. به هر حال این کیسه‌ها بعد از دور ریخته شدن به محل دفن زباله‌ها انتقال می‌یابند. تخمین زده شده است که در کشور چین هر ساله بیش از ۳ میلیون تن از این کیسه‌ها دور انداخته می‌شود. در حالت ایده آل واکنش‌های

شیمیایی ممکن است تا حدی باعث استفاده مجدد از این کیسه‌ها شود. اما به ناچار مقدار قابل توجهی وارد محل‌های دفن زباله می‌شوند. اگرچه استفاده مجدد از این ضایعات در صنایع شیمیایی و نفتی به تنهایی میسر نبوده ولی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود درنتیجه استفاده از آنها به صورت فیزیکی مانند استفاده برای اصلاح خاک، اقتصادی‌تر خواهد بود (چن و شن، ۲۰۱۵). چن و شن (۲۰۱۵) خاک رس ناحیه‌ی شانگ‌های تثبیت شده با سیمان را با استفاده از الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی پروپیلن بافته شده در کیسه‌های پلیمری مسلح کردند. نتایج حاکی از آن بود که افزودن هر دو نوع الیاف به مقدار ۰/۵ درصد، سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان شد. اگرچه الیاف پلی پروپیلن بیشتر از الیاف بافته شده در کیسه‌های پلیمری مؤثر واقع شد اما تفاوت بین آنها تنها ۵ درصد بود. همچنین آنها با افزایش طول الیاف‌ها شاهد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها بودند. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی تاثیر خرده لاستیک و الیاف‌های تایر فرسوده و کیسه پلیمری بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی خاک تثبیت شده با سیمان است؛ که در واقع بتوان با افزودن این مواد ضایعاتی به خاک تثبیت شده با سیمان، شکل پذیری سیمان را افزایش داده و با جایگزینی بخشی از سیمان با این مواد ضایعاتی که از لحاظ زیست محیطی و هزینه تهیه آن برتری قابل توجهی نسبت به سیمان دارند مقاومتی برابر با حالت استفاده از سیمان تنها گرفت و استفاده از تثبیت کننده‌های شیمیایی همچون سیمان را کاهش داد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محدود نشده می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- نمونه خاک

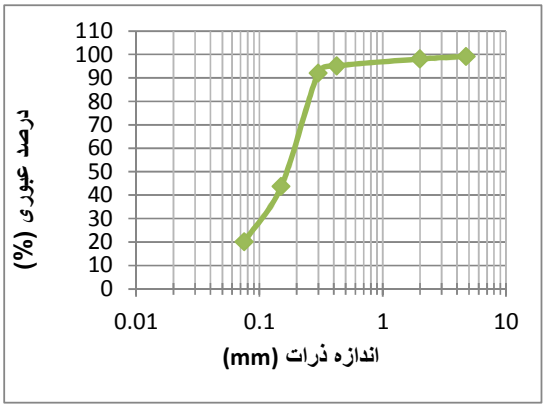
خاک مورد استفاده در این پژوهش، از نوع خاک ماسه رس دار می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مشخصات فیزیکی و شناسایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است. برای تعیین نمودار دانه‌بندی و طبقه بندی خاک مورد نظر، آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D 422 انجام شد. نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.

۲-۱-۲- سیمان پرتلند

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید شده در کارخانه سیمان کرمان می‌باشد. مشخصات شیمیایی این نوع سیمان در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

ویژگی ها	مقدار	استاندارد
نوع خاک	SC	ASTM D 422
حد روانی (LL)	۳۵	ASTM D 4318
حد خمیری (PL)	۲۰	ASTM D 4318
نشانه خمیری (PI)	۱۵	ASTM D 4318



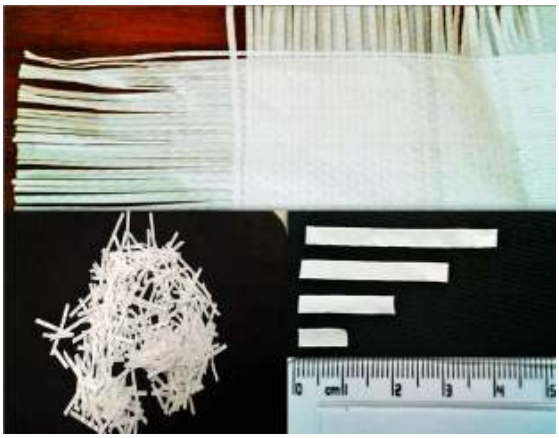
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده

ترکیبات	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	L.O.I	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
درصد	۲۱/۷٤	٥	٤	٦۳	۲	۲/۳	۱/۳	٤٥/٥	۲۸	٦/٥	۱۲

۲-۱-۳- الیاف بافته شده در کیسه‌های پلیمری دور ریز

این نوع الیاف که از جنس پلی پروپیلن می‌باشد از جدا کردن الیاف بافته شده در کیسه‌های پلیمری دور ریز تهیه شد. برای این کار ابتدا کیسه‌های پلیمری به تکه‌های مربعی به ابعاد ۱۰،۲۰،۳۰ و ٤۰ میلیمتر بریده شدند. سپس الیاف به طول‌های ۱۰،۲۰،۳۰ و ٤۰ میلیمتر از این قطعات مربعی جدا شدند (چن و شن، ۲۰۱۵). مشخصات الیاف کیسه پلیمری استفاده شده در جدول (۳) آورده شده است. مقدار استفاده شده از این الیاف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزن خشک خاک می‌باشد. در شکل (۲) تصویری از این نوع الیاف آورده شده است.



شکل۲. الیاف کیسه پلیمری استفاده شده

جدول ۳. مشخصات الیاف کیسه پلیمری استفاده شده

مشخصات	*مقادیر*
جنس الیاف	پلی پروپیلن
ضخامت (میلی‌متر)	۰/۰۳۵
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰/۸۵
عرض (میلی‌متر)	۳/۵
مقاومت کششی حداکثر (MPa)	۹۲
مقاومت در برابر اسیدها و بازها	بالا
جذب آب	صفر

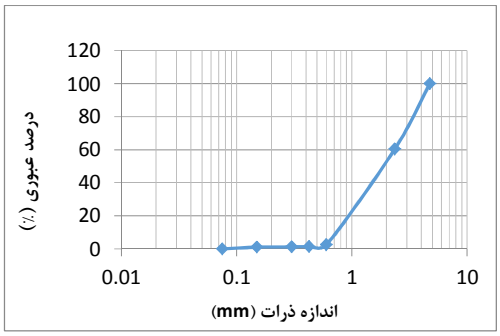
۲-۱-٤- الیاف تایر فرسوده

در این تحقیق از الیاف تایر فرسوده به مقدار ۰/۵، ۱، ۱/۵و ۲/۵ درصد وزن خشک خاک استفاده شد. این الیاف از کارخانه بازیافت تایر فرسوده کرمان تهیه شده است و از جداکردن قسمت‌های پرز مانند محصولات حاصل از بازیافت به دست می‌آید. در شکل (۳) تصویری از الیاف تایر فرسوده استفاده شده در این تحقیق آورده شده است.

۲-۱-۵- خرده لاستیک

خرده لاستیک استفاده شده در این تحقیق دارای قطر ۱ تا ٤ میلیمتر بوده که نمودار دانه بندی آن در شکل (٤) آورده شده است. این خرده لاستیک، حاصل بازیافت تایر فرسوده خودرو می باشد که تحت شرایط کنترل شده دمایی، از خرد کردن لاستیک تایرها پس از جدا کردن قسمت مفتولی تایر به دست می‌آید و عاری از بو، خاکستر و سیم می‌باشد. این خرده لاستیک از نوع دانه‌ای و از کارخانه بازیافت لاستیک‌های فرسوده آذرسام قزوین تهیه شد. ساختار عمده این ماده نایلون می‌باشد. مقاومت بالا در برابر حرارت، خستگی، ضربه، نور خورشید و دوام بالای آن از ویژگی‌های عمده این ماده می‌باشد. در شکل (۵) تصویری از خرده لاستیک استفاده شده در این تحقیق آورده شده است. همچنین جدول (۳) مشخصات خرده لاستیک و الیاف تایر فرسوده استفاده شده را نشان می‌دهد.

شکل۳. الیاف تایر فرسوده استفاده شده



شکل ٤. نمودار دانه بندی خرده لاستیک استفاده شده

شکل ۵. خرده لاستیک استفاده شده

جدول٤. مشخصات ضایعات تایر فرسوده

نوع ماده ضایعاتی	شکل	رنگ	ابعاد (mm)	وزن مخصوص (gr/cm^3)
خرده لاستیک	دانه ای	مشکی	۱- ٤	۰/۹۸
الیاف تایر فرسوده	پرز مانند	خاکستری تیره	___	۰/۸۸

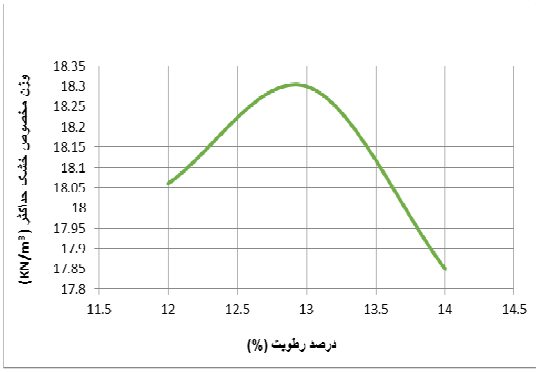
۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

۲-۲-۱- آزمایش حدود اتربرگ

برای تعیین حد روانی و حد خمیری خاک، آزمایش حدود اتربرگ برای ترکیب خاک و مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد سیمان، طبق استاندارد ASTM D 4318 انجام شد.

۲-۲-۲- آزمایش تراکم

با توجه به تاثیر قابل توجه وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه بر روی خصوصیات مقاومتی خاک، آزمایش تراکم استاندارد با هدف تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک و همچنین ترکیب خاک و مواد افزودنی، طبق استاندارد ASTM D 698 انجام گرفت. این آزمایش برای خاک طبیعی، ترکیب خاک با سیمان، الیاف کیسه پلیمری، الیاف تایر فرسوده و خرده لاستیک انجام شد. منحنی تراکم خاک طبیعی در شکل (٦) آورده شده است. از این شکل ملاحظه می‌گردد که درصد رطوبت خاک ۱۳ درصد و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک، مقدار ۱۸/۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب می باشد.



شکل٦. منحنی تراکم خاک مورد مطالعه

۲-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

به منظور تعیین حداکثر مقاومت فشاری قابل تحمل نمونه‌های ساخته شده از خاک و مواد افزودنی، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D 2166 انجام شد. این آزمایش با شرایط کنترل کرنش و با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. در شکل (۷) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است.

شکل۷. دستگاه آزمایش فشاری تک محوری

۲-۳- تهیه و عمل آوری نمونه‌ها

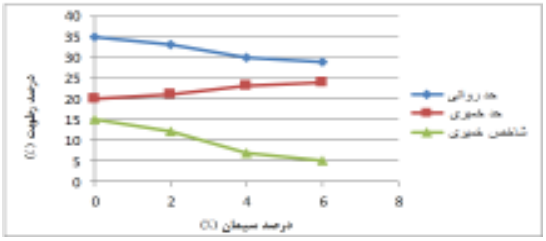
در ابتدا سیمان و مواد افزودنی با درصدهای مختلف به صورت خشک با خاک مخلوط شده و سپس رفته رفته تا میزان رطوبت بهینه مورد نظر، به آنها آب اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه به خوبی مخلوط شدند تا مخلوط همگنی شکل گیرد. سپس مخلوط‌های ساخته شده داخل قالبی به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در سه لایه و هر لایه با ٤ ضربه چکش متراکم شدند. چکش استفاده شده به وزن ٤/٥ کیلوگرم بوده و برای تراکم هر لایه از ارتفاع ۳۰ سانتیمتر رها شد. در انتها، نمونه‌های ساخته شده داخل نایلون و در دمای آزمایشگاه به مدت‌های ۷، ١٤، ۲۸ و ٥٦ روز عمل آوری شدند. شکل (۸) نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمایش فشاری تک محوری را نشان می‌دهد.

شکل ۸ نمونه‌های عمل آوری شده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش حدود اتربرگ خاک و سیمان

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که حد خمیری خاک، با افزودن سیمان افزایش یافته است. درصورتی که حد روانی و شاخص خمیری کاهش پیدا کرده‌اند. از دلایل افزایش حد خمیری خاک با افزودن سیمان می‌توان به این نکته اشاره کرد که با افزودن سیمان بخشی از رطوبت صرف واکنش هیدراتاسیون سیمان شده و در نتیجه با افزایش مقدار سیمان، میزان رطوبت مود نیاز برای رسیدن خاک به حالت خمیری افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن سیمان چون توانایی مصالح به جذب آب اضافی افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه مقدار حد روانی کاهش می‌یابد.



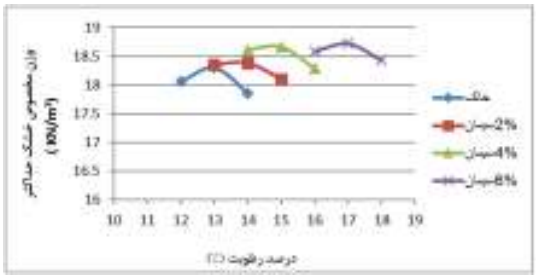
شکل۹. تغییرات حدود اتربرگ با افزودن سیمان به خاک

۳-۲- نتایج آزمایش تراکم

۳-۲-۱- نتایج آزمایش تراکم خاک و سیمان

با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن ٦ درصد سیمان به خاک، از مقدار ۱۸/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب تا مقدار ۱۸/۷۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب افزایش داشته است. همچنین درصد رطوبت بهینه خاک با افزودن ٦ درصد سیمان، از ۱۳ درصد به ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش رطوبت بهینه خاک

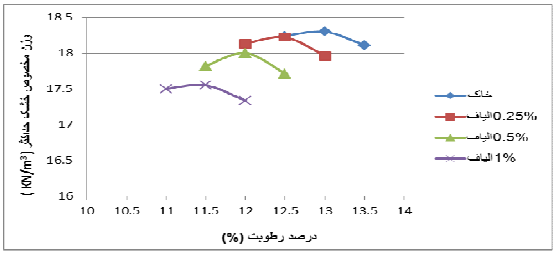
می‌توان به این نتیجه رسید که، به علت واکنش هیدراتاسیون سیمان، با افزایش درصد سیمان نیاز به رطوبت بیشتری بوده و رطوبت بهینه با افزودن سیمان به خاک افزایش می‌یابد. همچنین تفاوت اندازه ذرات سیمان و خاک و بیشتر بودن چگالی سیمان نسبت به خاک، می‌تواند دلیل افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن سیمان به خاک باشد.



شکل ۱۰. تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن سیمان

۳-۲-۲- نتایج آزمایش تراکم خاک و الیاف کیسه پلیمری

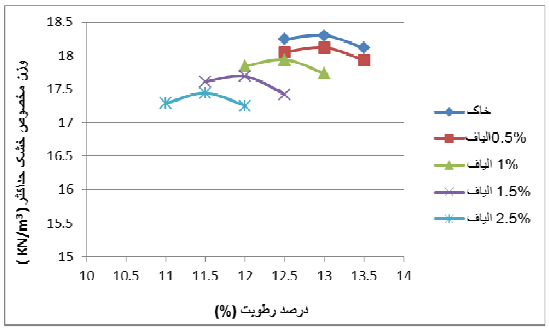
با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با افزودن این الیاف تا مقدار ۱ درصد، وزن خشک حداکثر از مقدار ۱۸/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب به مقدار ۱۷/۵۵ کیلونیوتن برمتر مکعب رسیده است که دلیل آن را می‌توان جایگزین کردن ذرات جامد خاک با درصدی از الیاف، که وزن مخصوص کمتری نسبت به دانه های خاک دارد، دانست. از سوی دیگر الیاف کیسه پلیمری خاصیت جذب آب نداشته و جایگزینی آن با ذرات خاکی که قابلیت جذب آب دارند، سبب کاهش رطوبت بهینه از مقدار ۱۳ به ۱۱/۵ درصد شده است.



شکل ۱۱. تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن الیاف کیسه پلیمری

۳-۲-۳- نتایج آزمایش تراکم خاک و الیاف تایر فرسوده

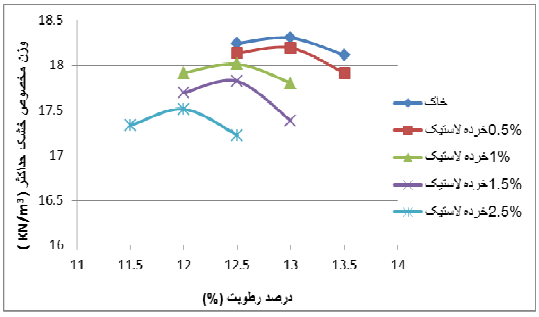
با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که الیاف تایر فرسوده سبب کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک از ۱۸/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب تا ۱۷/٤٤ کیلونیوتن بر متر مکعب شده است که دلیل آن می‌توان چگالی پایین این الیاف نسبت به خاک باشد. همچنین رطوبت بهینه خاک از ۱۳ درصد به ۱۱/۵ درصد کاهش پیدا کرده است که می‌تواند به دلیل خاصیت جذب آب کم این الیاف نسبت به دانه‌های خاک باشد.



شکل۱۲. تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن الیاف تایر فرسوده

۳-۲-٤- نتایج آزمایش تراکم خاک و خرده لاستیک

نتایج آزمایش تراکم بین خاک و مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲/۵ درصد خرده لاستیک در شکل (۱۳) آورده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزودن خرده لاستیک تا مقدار ۲/۵ درصد وزن خشک خاک، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک به میزان ۰/۷۹ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش می یابد که دلیل آن می‌تواند چگالی پایین خرده لاستیک نسبت به خاک باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در درصدهای پایین تر خرده لاستیک در مقابل درصدهای بالاتر آن، میزان کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر کمتر است. همچنین افزودن این مقدار خرده لاستیک سبب کاهش رطوبت بهینه خاک از مقدار ۱۳ درصد به ۱۲ درصد شده است که می‌تواند به دلیل کاهش تمایل لاستیک به جذب آب و عدم واکنش لاستیک با آب باشد.



شکل۱۳. تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن الیاف لاستیک

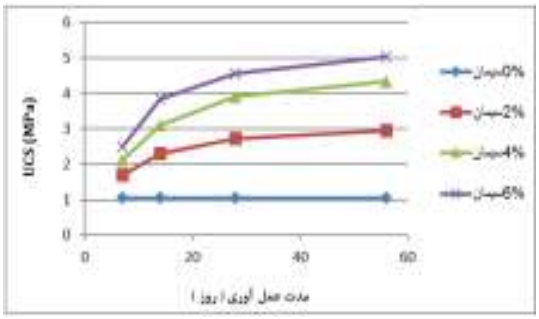
۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۳-۳-۱-نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های خاک و سیمان

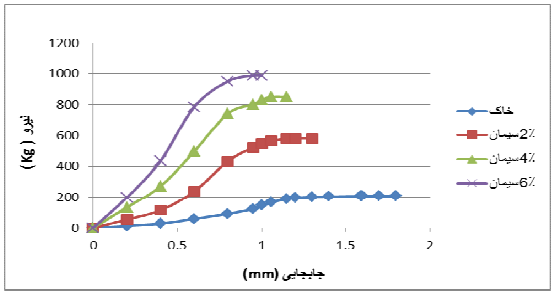
برای ارزیابی تاثیر سیمان بر افزایش مقاومت خاک مورد استفاده در این تحقیق، نمونه‌هایی با مقادیر مختلف سیمان ساخته شدند و پس از دوره‌های ۷، ١٤، ۲۸ و ٥٦ روز عمل-آوری آزمایش فشاری تک محوری بر روی آنها انجام شد که در شکل (١٤) نتایج این آزمایش‌ها آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود هم درصد سیمان و هم مدت عمل آوری تاثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت فشاری خاک داشته‌اند. به طوریکه با افزودن ٦ درصد سیمان در مدت عمل آوری ٥٦ روز، مقاومت از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به ۵/۰۳ مگاپاسکال رسیده است. از دلایل افزایش مقاومت خاک با افزودن سیمان می توان به این نکته اشاره کرد که با افزودن سیمان به خاک و انجام واکنش هیدراتاسیون سیمان، ابتدا آهک موجود در سیمان با آب واکنش داده و سبب تولید کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) شده که در پی آن pH افزایش پیدا کرده و سیلیکات موجود در سیمان با کلسیم اکسید (Cao) واکنش داده و ترکیب سیمانی کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) تولید شده و با افزایش چسبندگی بین ذرات خاک مقاومت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این با افزایش مدت عمل آوری واکنش

هیدراتاسیون تکمیل تر شده و مقاومت افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در دوره‌های اولیه عمل آوری، شیب نمودار تغییرات مقاومت بیشتر بوده و افزایش مقاومت با شدت بیشتری همراه است و با افزایش زمان عمل آوری از شدت این شیب کاسته می‌شود. دلیل این افزایش مقاومت بیشتر در دوره‌های اولیه می‌تواند سرعت بیشتر واکنش هیدراتاسیون در دوره‌های اولیه عمل‌آوری باشد.

شکل (۱۵) نشان دهنده‌ی نمودار نیرو جابجایی خاک تثبیت شده با سیمان در مدت عمل آوری ۵۶ روز می‌باشد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان، نیروی فشاری قابل تحمل نمونه افزایش یافته و از میزان جابجایی کاسته می‌شود که می‌تواند بیانگر کاهش شکل پذیری با افزایش درصد سیمان باشد.



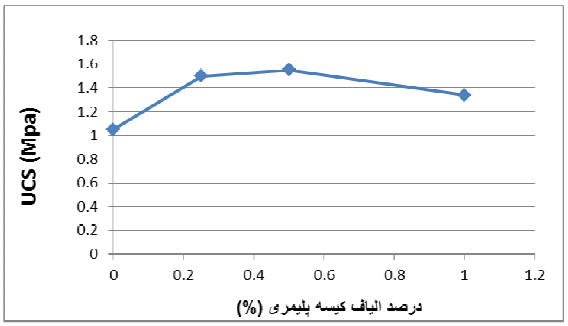
شکل ۱۴. تاثیر سیمان بر مقاومت فشاری خاک



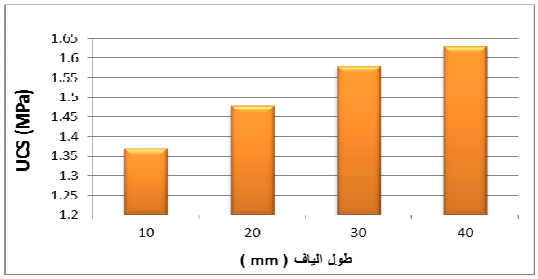
شکل ۱۵. تغییرات نیرو در برابر جابجایی در خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۵۶ روز

۳-۳-۲- نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های تثبیت نشده خاک و الیاف کیسه پلیمری

در این آزمایش نمونه‌هایی از ترکیب خاک و مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف کیسه پلیمری ساخته شدند. نتایج این آزمایش در شکل (۱۶) آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف کیسه پلیمری تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی آن، مقاومت فشاری خاک از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به مقدار ۱/۵۵ رسیده است. سپس با افزودن این الیاف تا مقدار ۱ درصد، مقاومت از ۱/۵۵ مگاپاسکال تا ۱/۳۴ مگاپاسکال کاهش پیدا کرده است. در واقع با افزودن این الیاف تا میزان ۰/۵ درصد، پخش الیاف در مخلوط در تمامی جهات و به صورت منظم شکل گرفته و پس از تراکم، اصطکاک و گیرداری خوبی بین دانه‌های خاک و سطح این الیاف ایجاد شده و به علت خاصیت کششی بالای این الیاف، افزایش مقاومت فشاری را در پی داشته است. اما با افزایش بیش از حد الیاف، پخش الیاف در مخلوط به شکل منظمی صورت نگرفته و سبب تجمع الیاف شده است که در نتیجه این الیاف با دانه‌های خاکی که قابلیت تراکم بهتری دارند جایگزین می شود و مانع از انجام عمل تراکم مناسب شده که در نتیجه کاهش مقاومت فشاری را در پی داشته است. در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که با افزایش طول الیاف کیسه پلیمری، مقاومت فشاری خاک افزایش می‌یابد. از دلایل این تغییرات می‌توان به این نکته اشاره کرد که، با توجه به درصد یکسان استفاده شده از الیاف، هرچقدر طول الیاف به کار رفته بیشتر باشد از تعداد این الیاف‌ها کاسته شده و بنابراین الیاف‌ها با تعداد کمتر بهتر در مخلوط پخش می‌شوند. همچنین الیاف با طول بیشتر سطح تماس بیشتری با ذرات خاک داشته و در نتیجه با توجه به دلایل بیان شده مقاومت بالاتری را سبب می‌شوند.



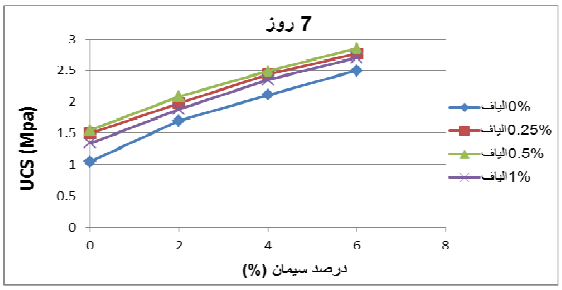
شکل ١٦. تاثیر الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده



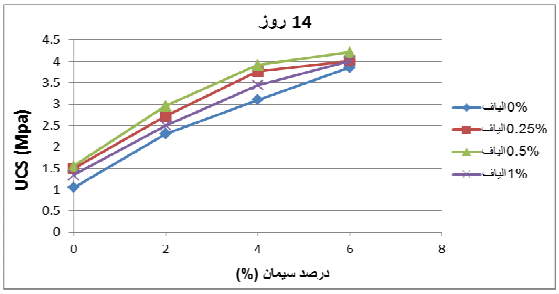
شکل۱۷. تاثیر طول الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده در مقدار ۰/۵ الیاف

۳-۳-۳- نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های تثبیت شده خاک و الیاف کیسه پلیمری

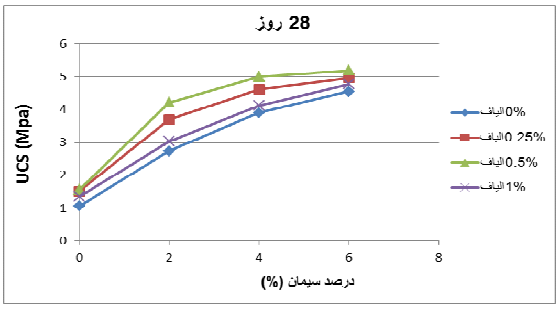
در این آزمایش نمونه‌هایی با ترکیب خاک و مقادیر ۲، ٤و ٦ درصد سیمان همراه با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف کیسه پلیمری ساخته و در مدت های ۷، ١٤، ۲۸ و ٥٦ روز عمل آوری شدند و تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند که نتایج آنها در شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که افزودن الیاف کیسه پلیمری تا مقدار ۰/۵ درصد سبب بهبود مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان می‌شود؛ که می‌تواند به این دلیل باشد که تا این مقدار الیاف، سیمان باعث چسبندگی ذرات خاک با این الیاف شده و با توجه به مقاومت کششی بالای الیاف، مقاومت فشاری را افزایش می دهد. در حالیکه افزایش بیش از این مقدار الیاف سبب تمرکز بیش از حد الیاف شده و باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. حداکثر مقاومت بدست آمده از ترکیب این الیاف همراه با سیمان در خاک، می‌توان به مقاومت نمونه شامل ٦ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف در مدت ٥٦ روز اشاره کرد که حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۵/۷۷ مگاپاسکال را در پی داشته است که بیانگر افزایش ۸۱ درصدی مقاومت خاک طبیعی می‌باشد. از نکات قابل اهمیت استفاده از این الیاف امکان جایگزینی بخشی از سیمان با این ماده ضایعاتی و بدست آوردن مقاومتی برابر و حتی بیشتر از سیمان تنها می‌باشد که درنتیجه می‌توان مصرف سیمان را کاهش داد. با بررسی دقیق شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که در مدت عمل آوری ۲۸ روز استفاده از ٦ درصد سیمان مقاومتی برابر با ٤/٥٥ مگاپاسکال می‌دهد. در حالی که با کاهش درصد سیمان به ٤ درصد و افزودن ۰/۲۵ درصد از الیاف کیسه پلیمری مقاومتی برابر با ٤/٦١ مگاپاسکال بدست می‌آید. و حتی با افزودن ۰/۵ درصد از این الیاف با ٤ درصد سیمان به خاک، مقاومتی برابر با ۵ مگاپاسکال را نتیجه می‌دهد. همچنین در شکل (۲۱) می‌توان مشاهده کرد که در مدت عمل آوری ٥٦ روز استفاده از ٦ درصد سیمان مقاومت را به ۵/۰۳ مگاپاسکال می‌رساند که با کم کردن درصد سیمان تا ٤ درصد و افزودن ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد از الیاف، مقاومت‌هایی برابر با ۵/۱۲ و ۵/٦٤ مگاپاسکال به دست می‌آید. علاوه بر این، ٤ درصد سیمان مقاومتی برابر با ٤/۳۳ مگاپاسکال را می‌دهد که با کاهش درصد سیمان به ۲ درصد و افزودن ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف، مقاومت هایی برابر با ٤/۳۸ و ۵/۱ مگاپاسکال مشاهده می‌شوند که همگی نشان دهنده‌ی نتایج مطلوبی از جایگزین کردن بخشی از سیمان مصرفی با الیاف ضایعاتی می‌باشند.



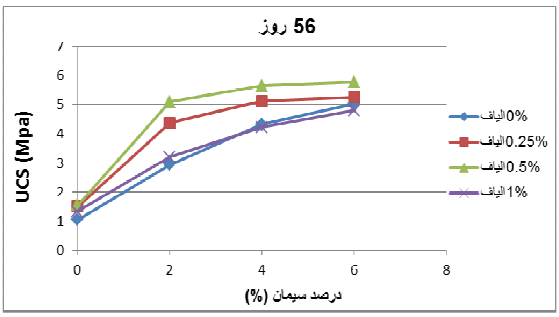
شکل ۱۸. تاثیر الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۷ روز



شکل ۱۹. تاثیر الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۱٤ روز

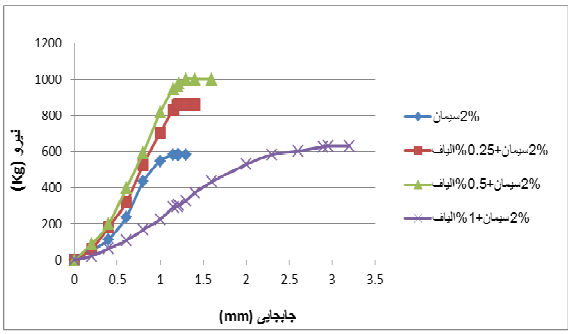


شکل ۲۰. تاثیر الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۲۸ روز

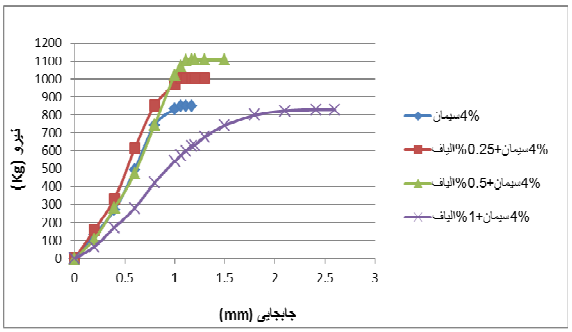


شکل ۲۱. تاثیر الیاف کیسه پلیمری بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ٥٦ روز

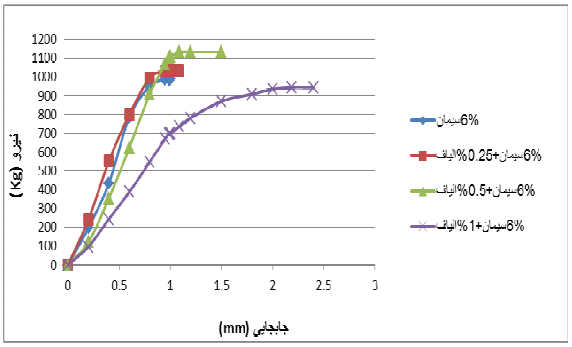
نمودارهای نیرو در برابر جابجایی در خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ٥٦ روز در اثر افزودن الیاف کیسه پلیمری در شکل‌های (۲۲) تا (۲٤) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد الیاف کیسه پلیمری به خاک تثبیت شده با سیمان، به علت خاصیت کششی این الیاف، مقدار جابجایی حداکثر افزایش یافته و از طرفی مطابق شکل (۲۵) عرض ترک‌ها کمتر و تعداد آنها بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش شکل پذیری می‌شود.



شکل ۲۲. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف کیسه پلیمری در خاک تثبیت شده با ۲٪ سیمان در مدت ۵۶ روز



شکل ۲۳. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف کیسه پلیمری در خاک تثبیت شده با ٤٪ سیمان در مدت ۵۶ روز

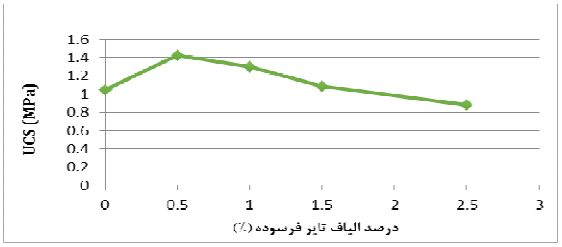


شکل ٢٤. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف کیسه پلیمری در خاک تثبیت شده با ٦٪ سیمان در مدت ۵۶ روز

شکل ۲۵. نمونه‌های تثبیت شده با ٦ درصد سیمان، بدون الیاف(الف)، ۰/۲۵٪ الیاف کیسه پلیمری(ب)، ۰/۵٪ الیاف کیسه پلیمری(پ) و ۱درصد الیاف کیسه پلیمری(ت)

۳-۳-٤- نتایج آزمایش تک محوری نمونه های تثبیت نشده خاک و الیاف تایر فرسوده

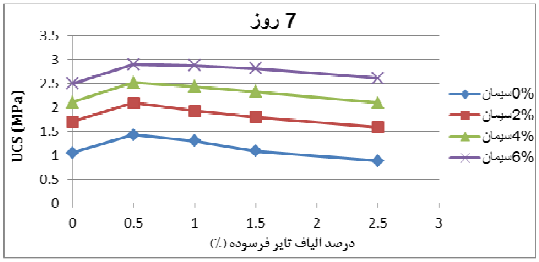
در این آزمایش نمونه‌هایی از ترکیب خاک و مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵و ۲/۵ درصد الیاف تایر فرسوده ساخته شدند. نتایج این آزمایش در شکل (۲٦) آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزودن این الیاف تا مقدار ۰/۵ درصد وزن خشک خاک، مقاومت فشاری از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به مقدار ۱/٤۳ مگاپاسکال رسیده است. پس از آن با افزایش بیشتر الیاف، مقاومت فشاری کاهش یافته است. از دلایل این افزایش مقاومت می‌توان به این نکته اشاره کرد که تا مقدار ۰/۵ درصد از این الیاف، فضای خالی بین دانه‌های خاک پر شده و انرژی تراکم نیز سبب متراکم‌شدن بیشتر توده خاک می‌شود و درنتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. ولی افزودن مقدار بیشتر از این الیاف، سبب مستهلک شدن انرژی تراکم شده که در پی آن مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. در واقع به دلیل آنکه این الیاف قابلیت تراکم کمتری نسبت به دانه های خاک دارد باعث می شود که افزایش بیش از ۰/۵ درصد الیاف، تراکم کمتری اتفاق افتاده و مقاومت فشاری کاهش یابد.



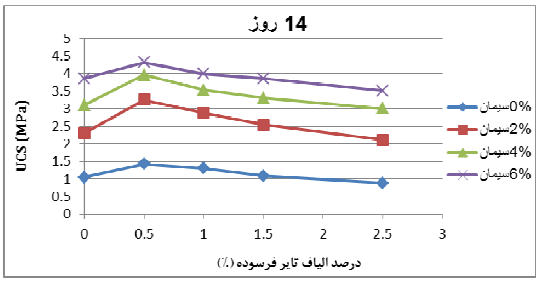
شکل ۲٦. تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده

۳-۳-۵- نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های تثبیت شده خاک و الیاف تایر فرسوده

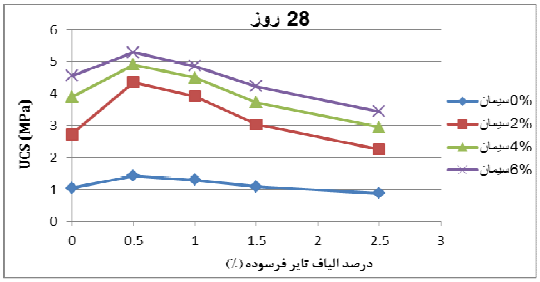
در این آزمایش نمونه هایی با ترکیب خاک و مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد سیمان همراه با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲/۵ درصد الیاف تایر فرسوده ساخته و در مدت های ۷، ۱٤، ۲۸ و ٥٦ روز عمل آوری شدند و تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند که نتایج آنها در شکل های (۲۷) تا (۳۰) آورده شده است. چنین برداشت می‌شود که الیاف تایر فرسوده سبب بهبود مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی الیاف می شود. در واقع تثبیت خاک با سیمان باعث بهبود قابل توجه مقاومت فشاری و افزودن الیاف تایر فرسوده سبب شکل پذیری بیشتر و شکست نرم تر نمونه‌ها می‌شود. با بررسی نتایج می توان دریافت که حداکثر مقاومت به دست آمده از این الیاف در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در دوره ٥٦ روزه برابر با ٥/٦٨ مگاپاسکال می باشد که برابر با افزایش ۸۱ درصدی مقاومت خاک طبیعی است. با گذشت زمان عمل آوری، شیب نمودارها افزایش پیدا کرده است که بیانگر افزایش تاثیر الیاف تایر فرسوده بر خاک تثبیت شده با سیمان با گذشت زمان عمل آوری می‌باشد. همچنین در هریک از دوره‌های عمل آوری مشاهده می‌شود که شیب نمودار مربوط به مقدار ۲ درصد سیمان بیشتر از شیب نمودار مربوط به مقادیر ٤ و ٦ درصد سیمان می‌باشد که بیانگر این موضوع می‌باشد که در مقادیر کمتر سیمان، تاثیر این الیاف بر مقاومت فشاری بیشتر می‌باشد. به طوریکه بیشترین تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، در مدت عمل آوری ٥٦ روز و در نمونه‌های تثبیت شده با ۲ درصد سیمان می باشد که افزودن ۰/۵ درصد از این الیاف سبب افزایش ٤۱ درصدی مقاومت فشاری شده است.



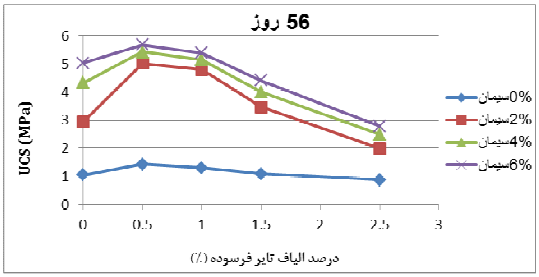
شکل ۲۷. تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۷ روز



شکل ۲۸. تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ١٤ روز

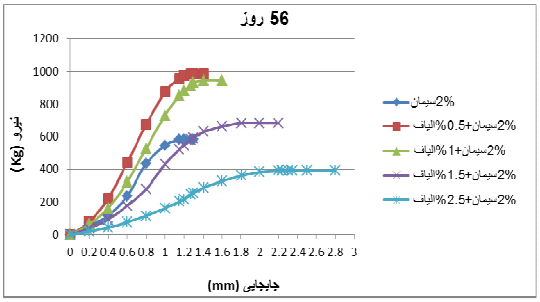


شکل ۲۹. تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۲۸ روز

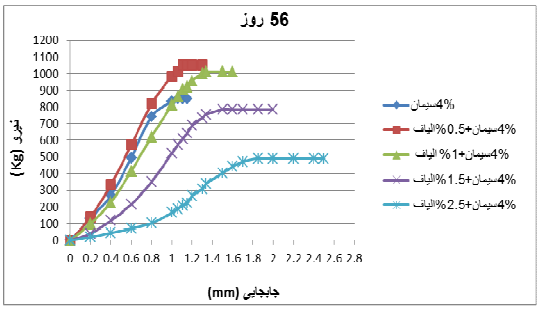


شکل ۳۰. تاثیر الیاف تایر فرسوده بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ٥٦ روز

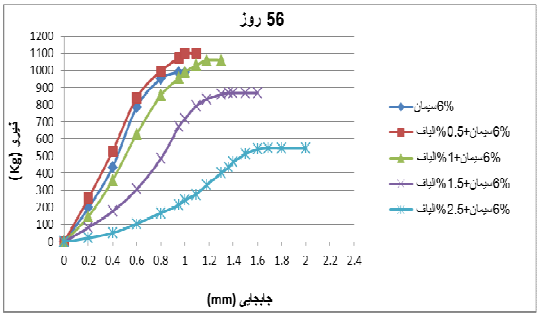
شکل‌های (۳۱) تا (۳۳) نمودارهای تغییرات نیرو در برابر جابجایی خاک تثبیت شده با سیمان، در مدت عمل‌آوری ٥٦ روز با افزودن الیاف تایر فرسوده را نشان داده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزودن الیاف لاستیک، میزان جابجایی افزایش پیدا کرده است و مطابق شکل (٣٤) طول و عرض ترک‌ها کمتر شده که بیانگر افزایش شکل پذیری و شکست نرم‌تر نمونه می‌باشد.



شکل ۳۱. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف تایر فرسوده در خاک تثبیت شده با ۲٪ سیمان در مدت ٥٦ روز



شکل ۳۲. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف تایر فرسوده در خاک تثبیت شده با ٤٪ سیمان در مدت ٥٦ روز



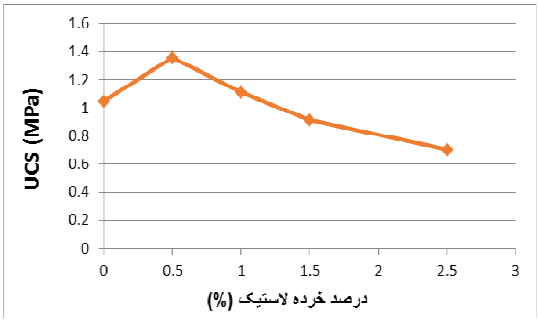
شکل ۳۳. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن الیاف تایر فرسوده در خاک تثبیت شده با ٦٪ سیمان در مدت ٥٦ روز

شکل ۳٤. نمونه های تثبیت شده با ٦ درصد سیمان، بدون الیاف تایر(الف)، ۰/۵٪ الیاف تایر (ب)، ۱٪ الیاف تایر (پ)، ۱/۵٪ الیاف تایر (ت) و ۲/۵٪ الیاف تایر (ث)

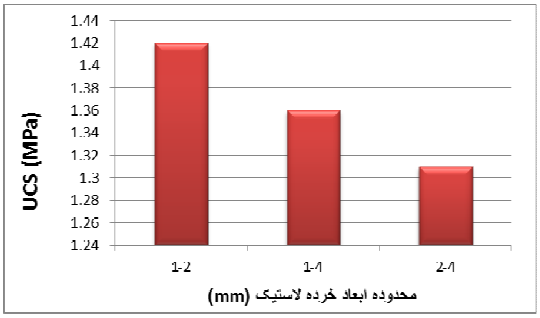
۳-۳-٦- نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های تثبیت نشده خاک و خرده لاستیک

در این آزمایش نمونه‌هایی از ترکیب خاک و مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۵/ ۱و ۲/۵ درصد خرده لاستیک ساخته شدند. نتایج این آزمایش در شکل (۳۵) آورده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می شود که با افزودن خرده لاستیک تا مقدار ۰/۵ درصد، مقاومت فشاری از مقدار ۱/۰۵ تا مقدار ۱/۳٦ مگاپاسکال افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. از دلایل افزایش مقاومت تا مقدار ۰/۵ درصد خرده لاستیک می‌توان به این نکته اشاره کرد که تا این مقدار خرده لاستیک، به علت خاصیت ارتجاعی لاستیک و مدول الاستیسیته پایین تر آن نسبت به خاک، انرژی تراکم سبب فشرده شدن دانه‌های لاستیک در بین دانه‌های خاک شده و حفره‌های خالی بین دانه‌های خاک را پر می کنند و علاوه بر این با فشرده شدن دانه‌های لاستیک در بین دانه‌های خاک تماس بین ذرات خاک و لاستیک بیشتر شده و باعث قفل و بست دانه‌های خاک در لاستیک می‌شود و مقاومت را بالا می‌برند. درحالیکه با افزایش بیش از حد خرده لاستیک، سطح تماس لاستیک با دانه‌های خاک کاهش می یابد و اصطکاک بین دانه ها کم شده که این روند باعث کاهش مقاومت می‌شود.

با توجه به شکل (۳٦) مشاهده می شود که با استفاده از درصد وزنی یکسان خرده لاستیک، کاهش ابعاد آن به ۱ تا ۲ میلیمتر، سبب افزایش مقاومت فشاری تا مقدار ۱/٤۲ مگاپاسکال شده است. اما به هر حال اختلاف بدست آمده کمتر از ۵ درصد می باشد. در حقیقت با کاهش ابعاد خرده لاستیک، با توجه به اینکه از درصد وزنی یکسانی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است، مساحت جانبی دانه‌های لاستیک بیشتر بوده و دانه‌های لاستیک فضای بیشتری را میان دانه‌های خاک پر می‌کنند که در نتیجه سطح تماس لاستیک با دانه‌های خاک بیشتر شده و سبب افزایش مقاومت می‌شود.



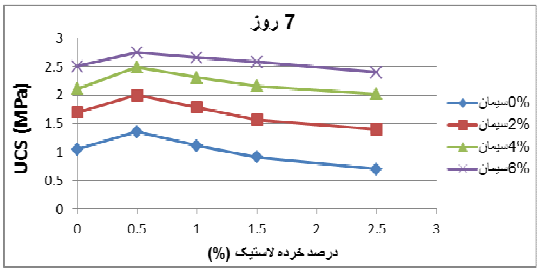
شکل ۳۵. تاثیرخرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده



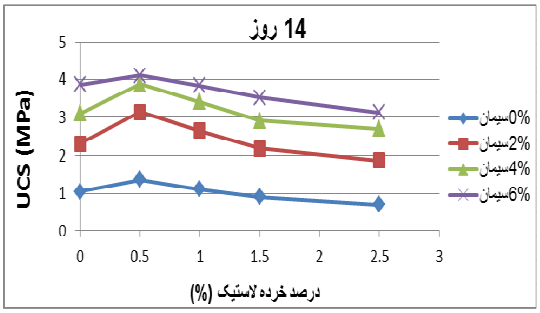
شکل ۳۶. تاثیر ابعاد خرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده در مقدار ۰/۵ درصد خرده لاستیک

۳-۳-۷. نتایج آزمایش تک محوری نمونه های تثبیت شده خاک و خرده لاستیک

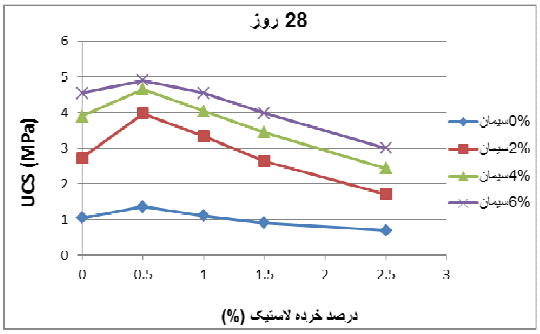
در این آزمایش نمونه هایی با ترکیب خاک و مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد سیمان همراه با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲/۵ درصد خرده لاستیک ساخته و در مدت‌های ۷، ١٤، ۲۸ و ٥٦ روز عمل آوری شدند و تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند که نتایج آنها در شکل‌های (۳۷) تا (٤۰) آورده شده است. می‌توان دریافت که افزایش خرده لاستیک تا مقدار ۰/۵ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نیز می‌شود. همچنین افزایش مدت زمان عمل آوری نیز به دلیل تکمیل واکنش هیدراتاسیون سیمان سبب افزایش مقاومت شده است به طوری که حداکثر مقاومت در مقدار ۰/۵ درصد خرده لاستیک و ٦ درصد سیمان و در مدت ٥٦ روز به دست آمده است که برابر با ۵/۲٦ مگاپاسکال می‌باشد. به این ترتیب نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و خرده لاستیک در مقادیر بهینه آنها و در مدت ٥٦ روز سبب افزایش ۸۰ درصدی مقاومت خاک تثبیت نشده شده‌اند. از طرف دیگر با گذشت زمان عمل آوری از ۷ روز تا ٥٦ روز، نمودارهای مربوط به درصد های مختلف سیمان به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری به دلیل آنکه از سرعت واکنش هیدراتاسیون سیمان کمتر می‌شود، تاثیر درصدهای مختلف سیمان کمتر شده و نمودار آنها به هم نزدیک‌تر می‌شوند. یا به عبارتی چون واکنش هیدراتاسیون سیمان در دوره‌های اولیه عمل آوری سرعت بیشتری دارد و سیمان مقاومت بیشتری را در دوره‌های اولیه خود ایجاد می‌کند، پس در دوره های اولیه عمل‌آوری تاثیر درصدهای مختلف سیمان بیشتر می باشد و به مرور زمان این تاثیر کاهش می‌یابد.



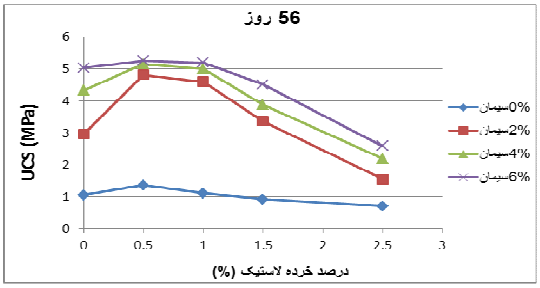
شکل ۳۷. تاثیر خرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۷ روز



شکل ۳۸. تاثیر خرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۱٤ روز

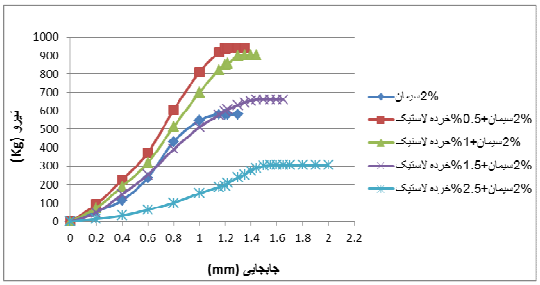


شکل ۳۹. تاثیر خرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ۲۸ روز

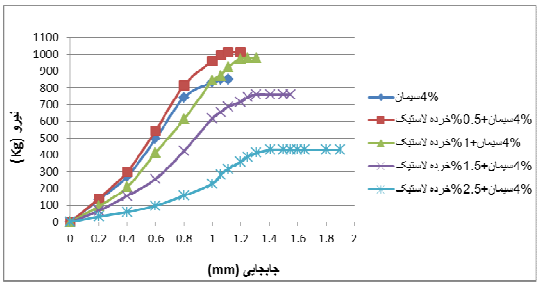


شکل ٤۰. تاثیر خرده لاستیک بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان در مدت ٥٦ روز

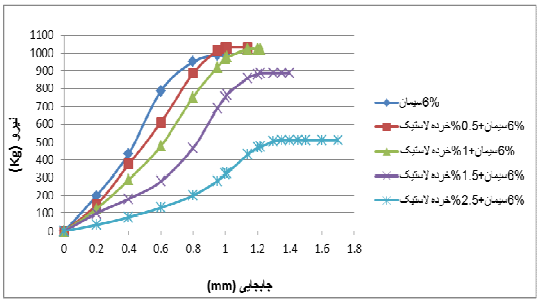
شکل‌های (٤۱) تا (٤۳) نمودارهای نیرو در برابر جابجایی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مدت ٥٦ روز با افزودن خرده لاستیک را نشان داده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خرده لاستیک مقدار جابجایی در برابر نیروی فشاری وارده به طور مرتب افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند خاصیت کششی بالای این الیاف باشد. در نتیجه مطابق شکل (٤٤) عرض ترک‌ها کمتر و تعداد آنها بیشتر می‌شود و شکست نمونه های تثبیت شده با سیمان نرم‌تر شده و شکل پذیری آنها افزایش می یابد.



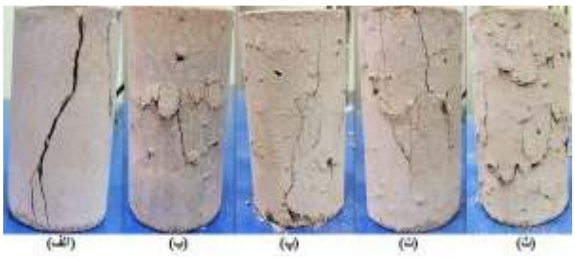
شکل ٤١. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن خرده لاستیک در خاک تثبیت شده با ٢٪ سیمان در مدت ٥٦ روز



شکل ٤٢. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن خرده لاستیک در خاک تثبیت شده با ٤٪ سیمان در مدت ٥٦ روز



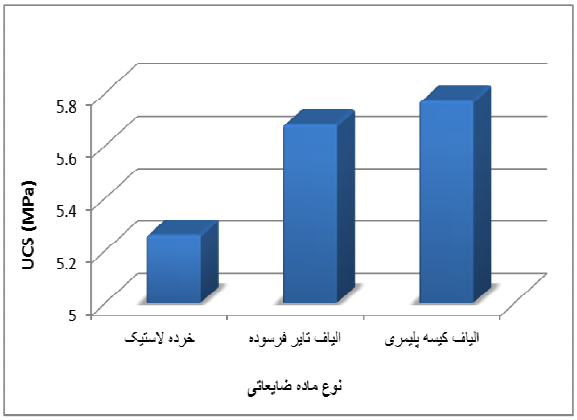
شکل ٤٣. تغییرات نیرو در برابر جابجایی با افزودن خرده لاستیک در خاک تثبیت شده با ٦٪ سیمان در مدت ٥٦ روز



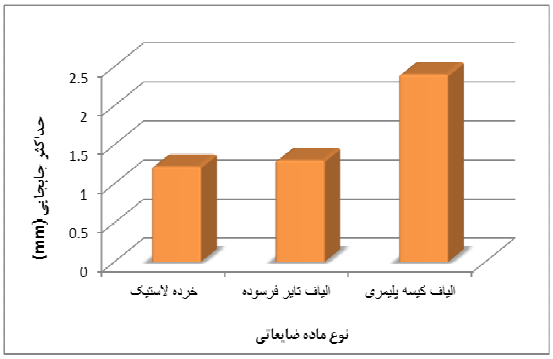
شکل ٤٤. نمونه های تثبیت شده با ٦ درصد سیمان، بدون خرده لاستیک(الف)، ٠/٥٪ خرده لاستیک (ب)، ١٪ خرده لاستیک (پ)، ١/٥٪ خرده لاستیک (ت) و ٢/٥٪ خرده لاستیک (ث)

در انتها برای مقایسه تاثیر مواد ضایعاتی استفاده شده در این تحقیق بر مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه، مطابق شکل (٤٥)، حداکثر مقاومت بدست آمده بر اثر ترکیب هر یک از مواد در مقدار بهینه آنها با خاک تثبیت شده با ٦ درصد سیمان در مدت زمان عمل آوری ٥٦ روز نشان داده شده است. با توجه به این شکل از بین این مواد، بیشترین تاثیر بر روی مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه، به ترتیب مربوط به الیاف کیسه پلیمری، الیاف تایر فرسوده و خرده لاستیک می‌باشد. همچنین اختلاف تاثیر هریک از مواد استفاده شده در این تحقیق بر روی حداکثر جابجایی، در شکل (٤٦) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود الیاف کیسه پلیمری بیشترین تاثیر را بر روی حداکثر جابجایی ایجاد شده در اثر

اعمال نیروی فشاری داشته است. بنابراین نمونه‌های ساخته شده با الیاف کیسه پلیمری نسبت به سایر نمونه‌ها شکست نرم‌تر و شکل پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. از دلایل برتری الیاف کیسه پلیمری نسبت به الیاف تایر فرسوده در نتایج مقاومت فشاری و نتایج نیرو در برابر جابجایی به این نکته می‌توان اشاره کرد که الیاف کیسه پلیمری در مقایسه با الیاف تایر فرسوده طول و عرض بیشتری داشته و این باعث افزایش بیشتر سطح تماس و گیرداری بین ذرات خاک و الیاف کیسه پلیمری در هنگام گسیختگی شده و در نتیجه باعث بیشتر شدن مقاومت و حداکثر جابجایی این الیاف نسبت به الیاف تایر فرسوده می‌شود. همچنین از دلایل دیگر می‌توان به کمتر بودن وزن مخصوص و درنتیجه حجم بیشتر الیاف کیسه پلیمری نسبت به الیاف تایر فرسوده در درصد یکسان و در نتیجه توزیع یکنواخت تر آن در مخلوط اشاره کرد.



شکل ٤٥. تاثیر مواد ضایعاتی استفاده شده در مقدار ۰/۵ درصد بر مقاومت فشاری خاک تثبیت با ٦ درصد سیمان در مدت عمل آوری ٥٦ روز



شکل ٤٦. تاثیر مواد ضایعاتی استفاده شده بر حداکثر جابجایی خاک تثبیت شده با ٦ درصد سیمان در مدت عمل آوری ٥٦ روز در مقدار ۱ درصد ماده ضایعاتی

٤- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به منظور مقایسه و تاثیر ضایعات کیسه پلیمری و تایر فرسوده بر خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک مورد مطالعه در حالت تثبیت نشده وتثبیت شده با سیمان، نمونه‌هایی با استفاده از این مواد ساخته و آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی آنها انجام شد. از آنجا که مواد ضایعاتی به راحتی قابل دسترس و هزینه تهیه آنها پایین بوده و به راحتی قابلیت ترکیب با خاک را دارند، بنابراین استفاده از این مواد در پروژه‌های عمرانی می‌تواند از هزینه‌های پروژه کاسته و همچنین از ورود این مواد به چرخه محیط زیست جلوگیری کرد. همچنین از نکات دارای اهمیت در فعالیت‌های ژئوتکنیکی، استفاده هرچه کمتر از مصالح تثبیت کننده شیمیایی مانند سیمان و جایگزینی بخشی از آنها با مصالح دیگر می‌باشد. در این تحقیق برای رسیدن به این منظور، از الیاف‌های کیسه پلیمری و ضایعات تایر فرسوده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به عنوان تثبیت کننده شیمیایی استفاده شد و نتایج قابل

قبولی بدست آمد. در ادامه نتایج این تحقیق به صورت خلاصه آمده است:

۱. افزودن سیمان به خاک مورد مطالعه باعث کاهش شاخص خمیری خاک به میزان ٦٦ درصد می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گیری کرد که سیمان با کاهش شاخص خمیری خاک باعث کاهش شکل پذیری و افزایش کارایی خاک می‌گردد.

۲. افزودن سیمان به خاک تا مقدار ٦ درصد، سبب افزایش ۲/۲ درصدی حداکثر وزن مخصوص خشک شده و همچنین به علت انجام واکنش هیدراتاسیون سیمان، سبب افزایش ٤ درصدی رطوبت بهینه می‌شود.

۳. افزودن الیاف تایر فرسوده و خرده لاستیک تا مقدار ۲/۵ درصد و الیاف کیسه پلیمری تا مقدار ۱ درصد، سبب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه ها به ترتیب به میزان ٤/۷، ٤/۳ و ٤/۱ درصد می شود. همچنین افزودن الیاف تایر فرسوده و کیسه پلیمری سبب کاهش ۱/۵ درصدی رطوبت بهینه ولی خرده لاستیک تا مقدار ۲/۵ درصد باعث کاهش ۱ درصدی آن می شود. علاوه بر این کاهش ابعاد خرده لاستیک به ۱ تا ۲ میلیمتر سبب افزایش ٤/۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به ابعاد ۱ تا ٤ میلیمتر شد.

٤. مقدار سیمان و نیز مدت زمان عمل آوری آن تاثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری خاک داشته اند. بطوریکه ٦ درصد سیمان در مدت ٥٦ روز باعث افزایش ۷۹ درصدی مقاومت خاک شده است. همچنین مشاهده می شود که افزایش مقاومت در درصد های پایین تر سیمان نسبت به درصدهای بالاتر آن با شدت بیشتری همراه است. به طوریکه در دوره ٥٦ روزه، افزودن ۲ درصد سیمان سبب افزایش ٦٤ درصدی مقاومت شده است. درحالیکه افزودن مقادیر ٤ و ٦ درصد سیمان به ترتیب سبب افزایش ۳۱ و ١٤ درصدی مقاومت شده اند. از طرف دیگر با افزایش درصد سیمان مقدار جابجایی حداکثر کاهش یافته که بیانگر کاهش شکل پذیری می باشد.

۵. در نمونه های تثبیت شده با ٦ درصد سیمان و درمدت عمل آوری ٥٦ روز، خرده لاستیک، الیاف تایر فرسوده و الیاف کیسه پلیمری تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی شان، مقاومت فشاری را به ترتیب به میزان ۸۰، ۸۱/۵ و ۸۱/۸ درصد نسبت به نمونه خاک طبیعی افزایش دادند. علاوه بر این با افزایش مقادیر این مواد ضایعاتی در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، شکست نمونه‌ها نرم تر و درنتیجه شکل پذیری افزایش یافت.

٦. با افزایش طول الیاف کیسه پلیمری از ۱۰ تا ٤۰ میلیمتر، مقاومت نمونه‌ها حدود ١٦ درصد افزایش داشت. همچنین اگر بجای استفاده از الیاف کیسه پلیمری با مخلوط طول‌های ۱۰ تا ٤۰ میلیمتر از این الیاف، از طول های یکنواخت ۳۰ و ٤۰ میلیمتر در درصدهای یکسان استفاده شود، مقاومت نمونه‌ها به ترتیب حدود ۲ و ۵ درصد افزایش می‌یابد.

۷. استفاده از الیاف ضایعاتی در بهسازی خاک و جایگزینی بخشی از سیمان با این مواد، می تواند مصرف سیمان را کاهش داده و درنتیجه علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از تولید سیمان، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد.

۵- مراجع

-طاهرخانی، ح. و کاظمی ثانی فریمانی، ب.، (١٣٩٤)، "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره ۱، پاییز ١٣٩٤، ص.۸۷- ۱۰۳.

-طائریان، ا. ابطحی، س. م.، کوشا، ب. و حجازی، س.م.، (١٣٩٤)، "بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره ۳، بهار، ص. ٤٧٩- ٤٩٢.

-طاهرخانی، ح. و سلامی، ح.، (١٣٩٢)، "یادداشت پژوهشی مقایسه تثبیت کننده‌های آهک، سیمان و CBR PLUS برای تثبیت خاک رس". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره ۲، زمستان، ص. ٢٦٣- ٢٧٤.

-فخری، م. حسنی، ا. و صابری کرهرودی، ف.، (١٣٩٥)، "تاثیر استفاده از خرده لاستیک بر خصوصیات روسازی بتن غلتکی"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال دوم، شماره ۲، تابستان، ص. ۳۷-۵۰.

-مدرس، ا. و ایار، پ.، (١٣٩٤)، "استفاده از پودر ضایعات زغال سنگ و آهک در مخلو طهای آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره ۱، پاییز، ص. ۱۲۱- ۱٤۰.

-محمدی، مسعود و توفیق، وحید. (١٣٩٥) " بررسی آزمایشگاهی تثبیت و تسلیح ماسه با استفاده از الیاف و اپوکسی رزین "، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال دوم، شماره ۱. بهار، ص. ۱۰۳- ۱۱۸.

-منصوریان، ا. و مولایی، م.، (۱۳۹٤) " ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگ دانه‌ای حاوی افزودنی‌های خرده لاستیک و شیشه ". مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره ۲. تابستان، ص. ۷۷- ۸٦.

-Anastasiadis, A., Senetakis, K. and Pilitakis, K., (2012), "Small-strain shear modulus and damping ratio of sand–rubber and gravel–rubber mixtures", Geotechnical and Geological Engineering. 30 (2), pp.363–382.

-Al-Rawas, A.A., Taha, R., Nelson, J.D., Al-Shab, T. and Al-Siyabi, H., (2002), "A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils". Geotechnical Testing Journal, 25 (2), pp.199-209.

-ASTM D422, (2007), "Standard test method for particle-size analysis of Soils", Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.

-ASTM D4318, (2010), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soil". Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. Vol. 04.08.

-ASTM D698, (2012), "Standard test method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort". Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.

ASTM D 2166, (1982), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil". West Conshohocken, Pennsylvania.

-Bell, F.G., (1988), "Stabilization and treatment of clay soils with lime", Journal of Ground Engineering, 21(1), pp. 10-15.

-Chen, H. and Wong, Q., (2006), "The behavior of soft soil stabilization using cement", Bulletin of Engineering Geology and the Environmental, pp.10-15.

-Croft, J.B., (1967), "The Influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization", Geotechnique, London, England, 17, pp.119-135.

-Chen, M. and Shen, Sh., (2015), "Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft Clay", Geotextiles and Geomembranes, pp.1-9.

-Hambirao, G.S. and Rakaraddi, P.G., (2014), "Soil Stabilization Using Waste Shredded Rubber Tyre Chips", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering 11(1), pp.20-27.

-Kaneko, K., Orense, R.P., Hyodo, M. and Yoshimoto, N., (2013), "Seismic response characteristics of saturated sand deposits mixed with tire chips". J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 139 (4), pp.633–643.

-Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Neaz Sheikh, M. and Tsang, H., (2015), "Shear strength and dilatancy behaviour of sand–tyre chip mixtures". Soils and Foundations, 55 (3), pp.517-528.

-Saride, S., Puppala, A. and Chikyala, S., (2013), "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays". Applied Clay Science, 85, pp.39–45.

-Signes, C.H., Garzón-Roca, J., Fernández, P.M., Torre, M.E. and Franco, R.I., (2016), "Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres", Applied Clay Science, 132, pp.768–773.

Investigation and Comparison the Effects of Waste Fiber Bundles and Waste Tire on the Strength Properties of Clayey Sand Stabilized with Cement

Hamed Hadizadeh, M.Sc., Grad., Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Survey Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
Mojtaba Ghasemi, Assistant Professor, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Survey Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

E-mail: ghasemi.kgut@gmail.com

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT
This study investigates the possible uses of fiber bundles, shredded tire and tire cord scrap (individually and in combination with cement) in clayey sand stabilization. Several basic characteristics of experimental specimens obtained with Atterberg limit, standard proctor compaction, and unconfined compression strength (UCS). These properties are compared with those of un-stabilized clayey sand and stabilized clayey sand with cement and the observed test results are then explained. Results of experimental study indicate that cement mixture treatments play a prominent role in reducing the soil plasticity index (PI). Furthermore, the results of the compaction test show that the utilization of waste in sandy soil stabilization decreases the optimum moisture content and also decreases the maximum dry density. Among the used waste materials, fiber bundles showed the greatest impact on maximum dry density with 1.4% reduction. The results show that using waste materials alone to stabilize clayey soil results in a slight increase in the UCS of the specimens, whereas combining waste with cement results in a sharp increase in the UCS of the samples in the same curing time. Additionally, the samples treated with fiber bundles have the most remarkable increase in UCS and maximum displacement compared to other samples, respectively 32 and 58 percent. The reason that fiber bundles becomes more efficient waste material is rooted from rising the contact area, plummeting the specific gravity and augmenting the uniform distribution in the clayey sandy soils.

Keywords: Clayey Sand, Fiber Bundles, Shredded Tire, Tire Cord Scrap, Unconfined Compression Strength