مطالعات علوم کاربردی در مهندسی
Online ISSN: ٢٤٧٦-٤٥٠٧
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲
Print ISSN: ٢٥٣٨-٢٠٥٥
صفحات ۱۹۷-۱۷۴
www.irijournals.com

تأثیر خرده لاستیک و الیاف بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبیت‌شده با آهک

مظاهر روزبهانی[۱]، سید حامد حسینی[۲]

[۱]هیئت‌علمی دانشگاه آزاد اسلامی

[۲]کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر

چکیده

در احداث پروژه‌ها، به‌طور معمول خاک محل پروژه ازنظر مهندسی ژئوتکنیک، ایده آل نمی‌باشد. در این موارد مهندسین سعی می‌کنند تا حد امکان از خاک مسئله‌دار اجتناب کرده و در صورت امکان محل دیگری را برای پروژه انتخاب نمایند و یا خاک نامرغوب را با خاک مناسب‌تر، جایگزین نمایند. در دهه‌های اخیر با توسعه شهرها و صنعت با توجه به محدودیت در مکان و نیز بهینه‌سازی در هزینه‌های سازه‌های عمرانی، نیاز به احداث شالوده‌ها و یا راه‌ها بر روی بسترهای مرغوب و با نامرغوب زمین شدیداً احساس می‌شود. ازاین‌رو مهندسین علم ژئوتکنیک همواره سعی به اصلاح و یا بهبود مشخصات خاک موجود برای رسیدن به مشخصات خاک مطلوب‌تر در محل پروژه‌ها، دارند. از راهکارهای پیشنهاد شده می‌توان به جایگزینی خاک با مشخصات مناسب‌تر با خاک نامرغوب، طراحی شالوده‌های عمیق و با استفاده از تکنیک‌های تثبیت و بهبود مشخصات خاک موجود، اشاره کرد پیشرفت صنعت و گسترش آن در زمینه‌های مختلف، اگرچه مزیت‌های متعددی داشته لیکن مشکلاتی را نیز به همراه داشته است، که از آن جمله می‌توان به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از زباله‌های صنعتی و کشاورزی اشاره کرد. در میان این زباله‌ها، لاستیک‌های فرسوده سهم به سزایی ایفا می‌کنند، این امر ناشی از افزایش روزافزون وسایل نقلیه مختلف و همچنین عمر کم آن‌ها می‌باشد. لذا این حجم بالای لاستیک باید به نحو مناسبی مورد استفاده مجدد قرار گیرد. در این مقاله ما به دنبال تأثیر خرده لاستیک و الیاف بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبیت‌شده با آهک هستیم.

کلمات کلیدی: تأثیر خرده لاستیک، خصوصیات ژئوتکنیکی، الیاف، خاک تثبیت‌شده با آهک

مقدمه

خاک طبیعی موجود در محل پروژه‌ها، همواره برای استفاده مناسب نمی‌باشد و ممکن است در اثر اعمال بار نشست‌های قابل توجهی در خاک نامرغوب بوجود آید، فرار از این فرایند به دلیل فضای محدود برای ساخت و ساز و یا شرایط ویژه، اجتناب ناپذیر به نظر می رسد. از سال های بسیار دور، بشر تلاش فراوانی در مقابله با مشکلات ناشی از بسترهای خاکی در ساخت و سازها به کار گمارده است. از جمله قدیمی ترین این روش ها، می‌توان به استفاده از آهک و کاه در تثبیت و تسلیح خاک های توسط ایرانیان از سالیان بسیار دور و حتی از دوران باستان اشاره نمود.

کیسه های پلیمری بافته شده به‌طور گسترده ای در صنایع بسته بندی مانند تولیدات صنعتی و کشاورزی از جمله بسته بندی آهک، سیمان، گچ و کود های شیمیایی استفاده می شوند، مقدار زیادی از این ماده هرساله دور ریخته میشوند. در چین هر ساله سه میلیون تن ار کیسه های پلیمری دور ریخته می شوند [۹]. بازیافت و استفاده مجدد از این مواد ضایعاتی در صنایع مختلف به تنهایی میسر نبوده و هزینه‌های جانبی فراوانی را به دنبال دارد. افزایش مقدار مواد ضایعاتی، کمبود مکآن‌های دفن زباله اهمیت روش های جدید برای استفاده مجدد از این مصالح را دوچندان می کند.

به گفته مدیر کل دفتر امور اقتصاد و سیاست های تجاری وزارت صنعت معدن در سال ۹۳ حدود ۲۴۵ هزار و ۸۴۰ تن لاستیک (حدود ۱۷ میلیون حلقه) تولید شده است. هر ساله بیش از ۲۵۰ میلیون لاستیک دور انداخته می شوند [۲]. در سال ۲۰۳۰، تعداد لاستیک‌های دورانداخته شده در جهان سالانه ۱۲۰۰ میلیون لاستیک خواهد رسید [۳]. مهمترین خطری که دوریختن و انباشتگی کنترل نشده لاستیک ایجاد می کند، قابلیت آتش گیری آن‌ها است که برای محیط زیست بسیار زیان آور است. گاهی ماه ها طول می کشد تا تمامی لاستیک ها بسوزد و این امر دودهای غلیظ و مایعات سمی تولید می کند که می‌تواند آب های زیرزمینی و سطحی محل را آلوده کند. لاستیک‌های فرسوده محیط خوبی را برای رشد و تولید مثل پشه، انواع جوندگان، مارها و فراهم می آورند. برای مثال آب جمع شده در درون لاستیک‌های ضایعاتی به عنوان بستری مناسب برای تولید مثل پشه ها، که خود منشأ بسیاری از بیماری ها هستند، محسوب می‌شود [۳-۶].

علاوه بر این پس از سوزاندن لاستیک، پودر باقیمانده باعث آلودگی خاک می‌شود [۵] ازاین‌رو استفاده از لاستیک‌های فرسوده در اصلاح رفتار مکانیکی خاک های در پروژه‌های عمرانی به عنوان یک گزینه برای استفاده مجدد از آن‌ها مطرح است.

با توجه به رشد روزافزون قیمت مواد افزودنی، همچنین در نظر گرفتن صرفه اقتصادی پروژه‌ها، محققان همواره به دنبال ماده ارزان و در دسترس برای بهبود خواص مهندسی خاک هستند. از جمله مواد مذکور می‌توان به ضایعات کشاورزی اشاره کرد. یکی از فراوان ترین گیاهان در سراسر دنیا درخت خرما با صد میلیون اصله در سی کشور می‌باشد. الیاف خرما بیشترین محصول زیر کشت در جنوب ایران با مساحت ۱۸۳ هزار هکتار است که تقریبا هفده درصد کشت کل دنیا را به خود اختصاص داده است [۷]. الیاف خرما که محصولی جانبی از این درخت است که دارای ویژگی های خاص مانند قیمت ارزان، فراوانی در مناطق بومی، سبکی، دوام و مقاومت نسبی است [۸]. هنگام هرس کردن درختان نخل الیاف آن که در گفتار محلی به آن «سیسی» گفته می‌شود، به عنوان یک ماده ضایعاتی بر روی زمین می ریزد. استفاره از این ماده هم به‌طور مستقیم و هم به صورت خاکستر که با سوزاندن الیاف حاصل می‌شود امکان پذیر است.

کیسه های پلیمری بافته شده به‌طور گسترده ای در صنایع بسته بندی مانند تولیدات صنعتی و کشاورزی از جمله بسته بندی آهک، سیمان، گچ و کود های شیمیایی استفاده می شوند، مقدار زیادی از این ماده هرساله دور ریخته میشوند. در چین هر ساله سه میلیون تن ار کیسه های پلیمری دور ریخته می شوند [۹]. بازیافت و استفاده مجدد از این مواد ضایعاتی در صنایع مختلف به

تنهایی میسر نبوده و هزینه‌های جانبی فراوانی را به دنبال دارد. افزایش مقدار مواد ضایعاتی، کمبود مکآن‌های دفن زباله اهمیت روش های جدید برای استفاده مجدد از این مصالح را دوچندان می کند.

با توجه به آمارها و مطالب فوق در پژوهش حاضر از ضایعات لاستیک فرسوده به دو شکل خرده لاستیک و الیاف لاستیک، الیاف درخت نخل، خاکستر الیاف نخل، الیاف پلی پروپیلن و کیسه پلیمری ضایعاتی برای تسلیح خاک استفاده شده است. همچنین آهک به عنوان تثبیت کننده در کنار المان تسلیح مورد استفاده قرار گرفته است.

تاریخچه استفاده از الیاف برای تسلیح خاک

حضور ریشه های گیاهان در خاک، مانند حضور الیاف طبیعی در خاک است، این الیاف گیاهی موجب افزایش مقاومت خاک و پایداری شیب ها می‌شود [۲۴-۲۰]؛ بنابراین، مفهوم مسلح سازی خاک با الیاف، در بیش از ۵۰۰۰ سال قبل درک شده است. برای مثال معماران قدیمی برای مسلح کردن خشت و بلوکهای کلی از حصیر و علوفه خشک استفاده می کردند. چندین مثال در مورد کاربرد خاک مسلح وجود دارد، مانند دیوار بزرگ چین (استفاده از شاخه درختان به عنوان المآن‌های کششی) بابیلون و... [۲۵].

مفهوم و اصول تسلیح خاک ابتدا توسط ویدال[1] تعریف شد. وی نشان داد که المآن‌های مسلح کشنده در خاک، موجب افزایش مقاومت برشی متوسط خاک می‌شود [۲۶ و ۲۷] بدین ترتیب، استفاده از مصالح الیافی به شکل سابق آغاز شد. از تاریخ اختراع ویدال در سال ۱۹۶۶ تا به حال نزدیک به ۴۰۰۰ سازه در بیش از ۳۷ کشور با استفاده از مفهوم خاک مسلح ساخته شده اند [۲۸ و ۲۹] در ابتداالیاف پلی استر تحت نام تجاری تکسول[2] به جامعه مهندسی ژئوتکنیک معرفی شد. این محصول در دیوارهای حائل و پایدارسازی شیروانی ها مورد استفاده قرار گرفت. با این حال خاک های مسلح شده با الیاف، به عنوان ترکیب خاک و الیاف گیاه به به خاطر مسائل علمی و زیست‌محیطی بلکه بیشتر بخاطر مسائل اجرایی، استفاده روزافزون داشته است [۳۰].

تاریخچه استفاده از لاستیک فرسوده

هامفری[3] در سال ۱۹۹۹ در مقاله ارائه شده با عنوان «خرده لاستیک در ساخت و سازهای عمرانی» ذکر می کند. استفاده از لاستیک ضایعاتی با توجه به چگالی پایین، عایق حرارتی مناسب، دوام بالا و کاهش هزینه ها در مقایسه با دیگر مصالح، برای اصلاح خاک مناسب می‌باشد [۳۳].

بوون و همکاران[4] در سال ۲۰۰۴ در مقاله ای تحت عنوان "ظرفیت باربری و نشست ماسه تسلیح شده با لاستیک" ذکر می کند؛ ظرفیت باربری ماسه مسلح بیشتر از دو برابر حالت غیر مسلح افزایش داشته است. همچنین در عمق مدفون ۰/۴ برابر عرض پی تأثیر محسوس تری مشاهده شده است، همچنین با توجه به نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در حضور لاستیک نشست خاک کاهش داشته است [۳۴].

تاریخچه استفاده از الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن یکی از کاربردی ترین و متفاوت ترین نوع الیاف پلیمری (مصنوعی) در تسلیح خاک به شمار می آید که از دهه ۸۰ میلادی تاکنون در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه این بخش، به بررسی چندین مطالعه در سال های اخیر در این مورد پرداخته می‌شود.

بنیموگلو و سلیس[5] در سال ۲۰۰۲، مقاومت برشی ماسه ی مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن را با استفاده از آزمایش برش مستقیم

[1]- Vidal
[2]- Texsol
[3]- Humphrey. D N. and et al.
[4]- Yoon, Y. W and et al
[5]- Yetimoglu, T. & Salbas, O.

مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این نوشتار را می‌توان بدین صورت بیان نمود که افزودن الیاف به خاک ماسه ای، باعث افزایش مقاومت برشی ماسه شده است. همچنین افزودن الیاف، موجب افزایش تغییر مکان نمونه می خاک در جعبه برش شده و رفتار شکننده خاک را بهبود بخشیده است [۴۱].

تاریخچه استفاده از درخت نخل برای تسلیح خاک

یکی از فراوان ترین گیاهان در سراسر دنیا درخت خرما با صد میلیون اصله در سی کشور می‌باشد. الیاف خرما بیشترین محصول زیر کشت در جنوب ایران با مساحت ۱۸۳ هزار هکتار است که تقریبا هفده درصد گشت کل دنیا را به خود اختصاص داده است [۷]. الیاف خرما که محصولی جانبی از این درخت است دارای ویژگی های خاص مانند : قیمت ارزان، فراوانی در مناطق بومی، سبکی، دوام و مقاومت نسبی است [۸].

ماهر و گری[۶] در سال ۱۹۹۰، گزارش دادند که مقاومت ماسه مسلح با الیاف نخل با افزایش ابعاد الیاف، در صد الیاف و افزایش سطح اصطکاک الیاف با خاک افزایش می باید [۵۰].

مرندی و همکاران[۷] در سال ۲۰۰۸، به بررسی تأثیر توزیع تصادفی الیاف نخل خرما بر مقاومت و شکل پذیری ماسه سیلتی پرداختند. طبق نتایج اعلام شده، با افزودن الیاف نخل وزن مخصوص حداکثر کاهش و رطوبت بهینه افزایش می یابد. با افزودن ۰/۲۵ تا ۲/۵ درصد الیاف نخل، طبق آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، شاهد افزایش مقاومت با افزایش درصد الیاف نخل بودند [۷].

احمد و همکاران[۸] در سال ۲۰۱۰، آزمایش فشاری تک محوری برای بررسی الیاف نخل خرما در خاک ماسه سیلتی استفاده کردند. آن‌ها در سال ۲۰۱۰، نمونه های زهکشی شده و نشده را با مقدار ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف و در طول های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ میلی متر مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که الیاف های پوشش داده شده مقاومت برشی را نسبت به الیاف های فاقد پوشش، بیشتر افزایش دادند. آن‌ها مشاهده کردند که ماسه مسلح با ۰/۵ در صد الیاف پوشش داده شده در طول ۳۰ میلیمتر، باعث افزایش ۲۵ درصدی زاویه اصطکاک و افزایش ۳۵ درصدی چسبندگی در مقابل ماسه مسلح نشده شد [۵۱].

اتوکو و همکاران[۹] در سال ۲۰۱۴، الیاف نخل خرما را به خاک رسی اضافه کردند. آن‌ها با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مشاهده کردند که با افزایش در صد الیاف، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش نهایی افزایش می یابد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که تسلیح با الیاف نخل، بر ویژگی های تورمی خاک رس تاثیر منفی می گذارد (۵۲)

تثبیت خاک با آهک

سال ها است که از انواع مواد آهکی با درجات خلوص مختلف برای تثبیت خاک و مصالح شنی استفاده شده است. متداول ترین این مواد، آهک شکفته، آهک شکفته دولومیتی، آهک زنده و آهک زنده دولومیتی است. تثبیت خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی خاک و تسریع در انجام عملیات راهسازی می‌شود [۱۰۰] افزودن آهک به خاک های واکنش پذیر با آهک، تاثیر به سزایی بر خواص مهندسی و ژئوتکنیکی این خاک ها دارد از جمله کاهش دامنه ی خمیری، کاهش پتانسیل تورم، افزایش کارایی، افزایش مقاومت و سختی و افزایش دوام مصالح [۶۴].

میزان استفاده از آهک مقادیر متفاوتی دارد حداقل مقدار مصرف آهک با هدف خشک کردن و تثبیت موقت خاک به ویژه در تجهیز و آماده سازی کارگاه ها مورد استفاده قرار می گیرد، درجات بالاتر تثبیت همراه با طراحی، آزمایش و روش های مناسب اجرایی پشتیبانی شده و برای تثبیت دائمی ساختار خاک مورد استفاده قرار می گیرد [۶۴].

---

[6]- Maher and Gray
[7]- Marandi et al
[8]- Ahmad et al
[9]- Otoko et al

میزان آهک مصرفی در تثبیت خاک به عوامل متعددی از قبیل جنس خاک، جنس آهک، نحوه استفاده از مصالح، شرایط جوی منطقه، هدف از تثبیت خاک و هزینه ی انجام عملیات بستگی دارد و معمولا مقدار آن بین ۰/۵ تا ۸ درصد وزن خشک خاک متغیر است [۱۰۰].

واکنش های خاک با آهک

همانگونه که ذکر شد اختلاط آهک با خاک موجب افزایش مقاومت در اثر یک سری واکنش های شیمیایی انجام شده مابین مواد تشکیل دهنده خاک و آهک خواهد بود. عمل تثبیت موجب تغییرات قابل ملاحظه ای از لحاظ ساختاری و شیمیایی در خاک رس می گردد. شرح واکنش های انجام شده بین خاک و آهک به قرار زیر است.

افزودن آهک به خاک به‌طور کلی موجب واکنش های متعدد زیر می گردد [۱۱]:

۱. واکنش های پوزولانی

۲. واکنش های کربوناسیون

۳. واکنش همراه با تبادلات کاتیونی

واکنش پوزولانی

می‌توان گفت که واکنش پوزولانی مهمترین فرایندی است که در افزایش مقاومت و بهبود شرایط فیزیکی شیمیایی ترکیب خاک و آهک تاثیر به سزایی از خود نشان می دهد. با افزودن مقدار بهینه آهک به خاک و افزایش pH مخلوط، موجب حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک رس فراهم می گردد. ترکیب واحدهای سیلیکات و آلومینات با آهک موجب شده تا سیلیکات با آلومینات کلسیم هیدرات تشکیل گردد. این مواد پوزولانی بلوری شکل بوده و شبیه ترکیبات واکنش سیمانتاسیون می‌باشد. واکنش های پوزولانی تابع زمان و تولید حرارت می‌باشد و تا هنگامی که ترکیبات هیدرات کلسیم و سیلیکات موجود باشند، این فرایند گیرش ادامه خواهد یافت. پس از افزوده شدن آهک Ca (OH) و رطوبت به خاک و اختلاط آن‌ها با یکدیگر بون های کلسیم "C و هیدروکسید 2OH آزاد خواهد شد. pH خاک وابسته به میزان OH^+ داشته پس هرچه میزان آهک افزایش یابد OH^- نیز بیشتر شده و در نتیجه pH خاک نیز افزایش می یابد. زمانی که pH خاک به حدود ۱۲ برسد سیلیکات و الومینات خاک حل شده و یون های Si و له در ترکیب با یون های OH^- تولید و $Al(OH)_3$ و $Si(OH)_2$ می کند. با ترکیب هیدروکسیدها و یون های Ca^{++} تشکیل سیلیکات کلسیم و یا آلومینات کلسیم هیدراته (مواد پوزولانی) را خواهیم داشت.

همان گونه که ذکر شد واکنش پوزولانی علاوه بر زمان تابع دما و رطوبت نیز می‌باشد. در دمای کمتر از ۱۵ درجه سانتیگراد واکنش پوزولانی و گیرش ماده بسیار کند شده و در دماهای بالاتر به سرعت واکنش و گیرش آن افزوده می گردد. وجود کانی های دیگری از قبیل گوار نو، فلدسپات و میگا به غیر از کانی های رس جز منابع سیلیس و آلومین در خاک می‌باشد. از طرفی واکنش پوزولانی در همه خاک های رسی جزء منابع سپلیس و آلومین در خاک می‌باشد. از طرفی واکنش پوزولانی در همه خاک های رسی به وجود نمی آید و وابسته به نوع خاک مورد استفاده می‌باشد. خاکی را بتواند با آهک در مدت ۲۸ روز در دمای اتاق اضافه قدرت فشاری ۳۵۰ کیلوپاسکالی را تولید کند، به عنوان خاک فعال در تثبیت با اهک می دانند [۶۵ و ۶۶].

عوامل زیادی همچون وجود اکسید آهن، ترکیبات ارگانیک، عدم وجود سیلیس و آلومینای کافی و سایر عوامل بازدارنده واکنش پوزولانی موجب شده تا خاک در واکنش با آهک غیر فعال بوده و جهت رفع این نقیصه می‌توان در بعضی از موارد خاکستر صنعتی را به عنوان منبع سیلیس و آلومین به خاک اضافه نمود. افزایش مقاومت برای بعضی خاک ها تابیش از ده سال ادامه یافته و می‌توان این افزایش مقاومت خاک رس را در تشابه با افزایش مقاومت ترکیب خاک سیمان دانست [۶۹-۶۷].

از عوامل مهمی و فعال در واکنش های پوزولانی می‌توان به وجود مقدار کافی یون سدیم فعال در واکنش، میزان و درصد کربن مواد آلی موجود در خاک، ساختار و نوع کانی های رسی، وجود کربنات ها، pH خاک، شرایط زهکشی، درجه هوازدگی، آهک قابل

ترکیب و نسبت سیلیس به آلومینیوم خاک اشاره داشت [۷۰ و ۷۱]. مشخصات و خصوصیات خاک از اساسی ترین عواملی موثر بر واکنش پوزولانی و تشکیل مواد سیمانی هستند و در صورتیکه خاک در واکنش با آهک از نوع غیر فعال باشد، صرف نظر از جنس، میزان آهک مصرف شده و نحوه عمل آوری مخلوط واکنش پوزولانی بطور کامل انجام نشده و در نتیجه افزایش مقاومت قابل توجهی بدست نخواهد آمد [۶۸]. تغییرات به وجود آمده در اثر واکنش پوزولانی عبارتند از:

۱. افزایش قابل توجه مقاومت برشی و سختی توده خاک
۲. بهبود کارایی خاک و کاهش حد خمیری آن
۳.کاهش پتانسیل تورمی
۴. بهبود چشمگیر مشخصات ارتجاعی خاک

الیاف و رشته ها

این عناصر می‌توانند شامل انواع الیاف طبیعی یا مصنوعی و یا رشته های حاصل از خرد کردن یا برش دادن مواد طبیعی (نظیر اجزای گیاهان)، مواد مصنوعی (مانند انواع پلیمرها) و یا مواد ضایعاتی (نظیر پاکت زباله، ضایعات کارخانه ها نساجی یا موکت سازی) باشد. الیاف و رشته ها به سادگی با خاک مخلوط شده و ماده ی مرکب حاصل را خاک مسلح به الیاف با توزیع تصادفی می نامند. در الیاف با آرایش تصادفی چون عناصر تسلیح با خاک مخلوط می گردند، احتمال حضور الیاف در هر راستایی در داخل خاک مسلح وجود دارد؛ بنابراین بر خلاف المآن‌های ممتد در راستاهای خاص و مکآن‌هایی مشخص در بین لایه های خاک قرار می گیرند و خاک را در همان جهت و همان صفحه تقویت می‌کنند. همچنین الیاف با توزیع تصادفی، خواص خاک را در همه ی جهات بهبود می بخشند [۱۰۲].

اشنایی با مواد پلیمری

واژه پلیمر (Polynner) از ترکیب دو واژه یونانی "Poly" به معنای بسیار و "Meros" به معنای اجزای گرفته شده است؛ بنابراین واژه پلیمر به معنای وموادی است که از اجزای بسیار تشکیل شده اند. این اجزا در کنار یکدیگر قرار گرفته و تشکیل ماده ای واحد را می دهند. به هر بخش با واحد سازنده هر پلیمر، مونومر (Monommer) اطلاق می‌شود. مونومرها واحد های مولکولی هستند که برای تولید پلیمر ها وجود آن‌ها الزامی است. البته لازم است میان مونومرها و مولکول های تکراری که در سایر مواد مشاهده می گردند، تفاوت گذاشت. عمده تفاوت مونومرها و مولکول های تکراری در سایر مواد ناشی از فرایند پلیمریزاسیون (Polynnerization) در پلیمرها است. طول و نوع هر مولکول پلیمرها با توجه به خواص مونومر تشکیل دهنده آن ازنظر اتصال ما بین مونومرها تعیین می‌شود. وزن مولکولی هر پلیمر نیز از حاصل ضرب درجه پلیمریزاسیون در وزن مولکولی هر واحد تکرار شونده بدست می آید. یکی از خواص بسیار مهم مواد پلیمری وزن مولکولی متوسط و توزیع آماری آن می‌باشد؛ به عبارت دیگر خواص رفتاری هر پلیمر به وزن مولکولی متوسط و توزیع آماری مولکول های آن بستگی دارد. با افزایش وزن مولکولی متوسط خواص زیر در پلیمر تغییر می کند [۱۰۳].

۱. افزایش مقاومت تنیدگی
۲. افزایش ازدیاد طول و کشش پذیری
۳. افزایش مقاومت در برابر ضربه
۴. افزایش مقاومت گرمایی ماده
۵. افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی
۶. کاهش رفتار جاری شدن یا به عبارت دیگر نرم شدگی
۷. کاهش فرایند پذیری

با محدود کردن توزیع وزن مولکولی پلیمرها خوای زیر را می‌توان به شکل مطلوب تغییر داد

۱. افزایش مقاومت در برابر ضربه

۲. مقاومت در برابر ترک خوردگی

۳. کاهش نرم شدگی

۴. کاهش فرایند پذیری

اغلب پلیمر هایی که در ساخت ژئوسنتنیک ها به کار می روند از یک نوع مونومر ساخته شده اند. ازاین‌رو هموپلیمر (Honopolynner) نامیده می شوند. چنان چه در واحد ساختمانی یک پلیمر دو نوع مونومر به کار رفته باشند یا به عبارت دیگر واحدهای تکراری در یک پلیمر از دو نوع متمایز باشند، اصطلاحا کوپلیمر (Copolymer) خوانده می شوند. عامل مهم در خواص این نوع کوپلیمرها نحوه اتصال و پیوستن واحدهای تکرار شونده به یکدیگر است. این نوع اتصالات می‌توانند به شکل های تصادفی، متناوب، بسته و یا به صورت پیوند شاخه ای باشند. این چنین کوپلیمریزاسیون ویژگی های ساختاری پلیمری دست آمده را کاملا تحت تاثیر قرار می دهد علاوه بر حالت تکرار دو نوع واحد ساختاری این امکان وجود دارد که به واحد سازنده در یک زنجیره پلیمر به صورت تکراری در کنار هم قرار گیرند. به این حالت تریپلیمر می گویند.

بنابراین به راحتی دیده می‌شود که انتخاب نوع و تکرار موتورها در مواد پلیمری تقریبا نامحدود است و به همین علت در حال حاضر تقریبا در حدود ۵۰ هزار پلیمر تجاری در جهان وجود دارد. این شاخه از علم مهندسی شیمی در حال حاضر به سرعت در حال پیشرفت و گسترش است و به نظر میرسد در آینده ای نه چندان دور تقریبا تمام مواد اطراف ما را که انسان به نحوی در ساخت آن‌ها دخالت دارد را در بر خواهد گرفت.

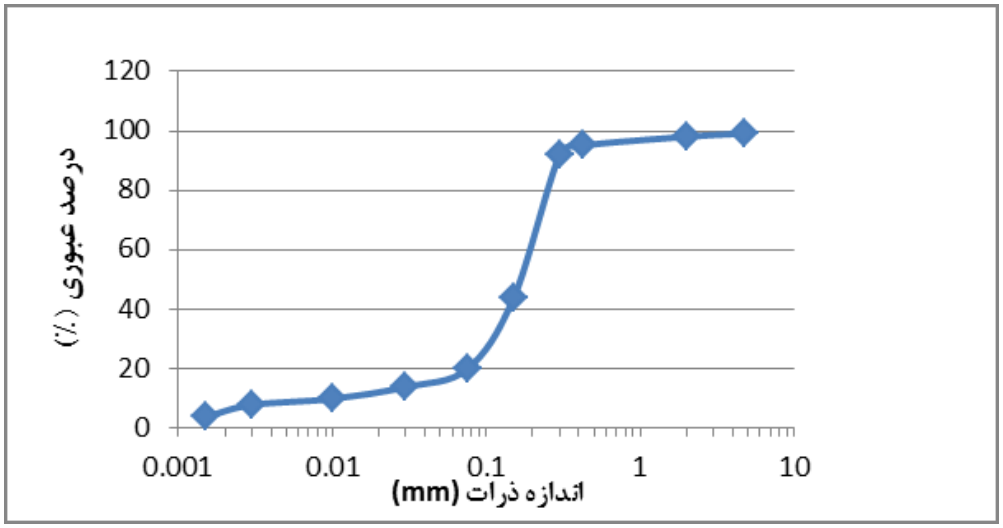
با این توضیح کوتاه شاید به نظر آید آگاهی یافتن از خواص تمام این مواد و به کار گیری آن در امور مربوط به تقویت و تسلیح خاک ها امری بسیار مشکل باشد؛ اما خوشبختانه باید گفت فقط تعداد کمی از پلیمرهای مصنوعی از اهمیت ویژه ای در صنعت ساخت ژئوسنتتیک ها برخوردار اند [۱۰۳].

مصالح مصرفی

خاک

برای تهیه خاک مورد استفاده در این نوشتار، ابتدا خاک ماسه بادی از اتوبان هفت باغ علوی کرمان در عرض و طول جغرافیایی به ترتیب N ″۲۱. ۱۱ ′۷ °۳۰ و E ″۶۵. ۱۷ ′۱۰ °۵۷ و خاک رس از عمق ۱۰ متری یک پروژه عمرانی واقع در بلوار هوانیروز شهر کرمان در عرض و طول جغرافیایی به ترتیب N ″۴۱. ۴ ′۱۷ °۳۰ و E ″۱۶. ۴۰ ′۵۹ °۵۶ برداشت شدند. سپس بعد از خرد کردن کلوخه خاک های تهیه شده به منظور بدست آورن یک دانه بندی یکنواخت، خاک ماسه بادی از الک شماره ۴ و رس برداشت شده از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و به صورت ترکیب دستی شامل ۸۰ درصد ماسه بادی و ۲۰ درصد رس تهیه شدند. برای تعیین طبقه بندی آن آزمایش دانه بندی طبق استاندارد (ASTM D 422) [۷۵] انجام شد.

با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش دانه بندی و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، خاک موردنظر در ردیف SC قرار می گیرد و نمودار دانه بندی آن مطابق شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱ نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه

سایر مشخصات خاک و استانداردهای مربوطه در جدول زیر 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
وزن مخصوص خشک حداکثر (KN/m^3)	۱۸/۳	ASTM D 698
درصد رطوبت بهینه (٪)	۱۳	ASTM D 698

آهک

در این نوشتار از آهک هیدراته برای تثبیت نمونه ها استفاده شده است. به‌طور معمول در عملیات تثبیت از دو نوع آهک زنده و آهک هیدراته استفاده می‌شود. آهک زنده در مقایسه با آهک هیدراته (شکفته)، تغییر حجم بیشتری دارد اما جهت عملیات تثبیت می‌تواند موثرتر از آهک هیدراته عمل نماید. با این وجود به دلیل تغییر حجم کمتر آهک هیدراته نسبت به آهک زنده و در جهت از بین بردن عواملی همچون پدیده جمع شدگی و خزش، می‌توان از آهک شکفته جهت انجام عملیات تثبیت استفاده نمود. مشخصات شیمیایی آهک استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ خصوصیات شیمیایی آهک استفاده شده در این تحقیق

ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی
CaO	۸۵
CO_2	۶
MgO	۵
مواد غیر محلول	۳
SiO_2	قابل چشم پوشی

دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات ۱۹۷-۱۷۴

خرده لاستیک

خرده لاستیک استفاده شده در این نوشتار از کارخانه بازیافت لاستیک آذرسام قزوین تهیه شده، دارای قطر ۱ تا ۴ میلیمتر و چگالی gr/cm^3 ۰/۹۸ می‌باشد. در شکل ۲ تصویری از خرده لاستیک استفاده شده نشان داده شده است. این خرده لاستیک حاصل از بازیافت لاستیک فرسوده خودرو می‌باشد. در هنگام بازیافت لاستیک فرسوده پس از خارج کردن طوقه لاستیک توسط دستگاه های مخصوص، سیم های فلزی و الیاف نیز جدا سازی شده و در نهایت لاستیک باقی مانده وارد آسیاب های نهایی شده و به صورت خرده لاستیک خارج می‌شود. مقاومت بالا در برابر حرارت، خستگی، ضربه، نور خورشید از ویژگی های عمده این ماده می‌باشد.

شکل ۲ خرده لاستیک استفاده شده

الیاف لاستیک فرسوده

الیاف لاستیک فرسوده استفاده شده در این نوشتار تهیه شده از کارخانه بازیافت لاستیک کرمان می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده الیاف لاستیک استفاده شده در پژوهش است. این الیاف ها، در واقع نخ های بکار رفته برای ساخت لاستیکها می باشند که هنگام بازیافت لاستیک فرسوده، پس از جدا سازی سیم فلزی از بافت لاستیک، به صورت پرز مانند به وسیله ی سرند جدا سازی شده و دارای چگالی gr/cm^3 ۰/۸۸ می‌باشد.

شکل ۳ الیاف لاستیک فرسوده استفاده شده

الیاف پلی پروپیلن

پلی پروپیلن در بارسین پروپیلن در شرایط دما و فشار نسبتا ملایم، در حضور کاتالیزر زیگلر - ناتا تولید می‌شود و فرمول شیمیایی آن $-n[CH2-CH(CH3)]-$ می‌باشد. در این نوشتار از الیاف پلی پروپیلن ۱۲ میلیمتری، تهیه شده از شرکت بارسین

سازه کرمان به مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن خشک خاک استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۳ آورده شده است. تاکنون از الیاف پلی پروپیلن به عنوان افزودنی، برای مسلح نمودن انواع بتن و مخلوط های سیمانی و گچی استفاده گردیده است. الیاف پلی پروپیلن با قابلیت نگهداری طولانی آب، دچار زنگ زدگی و خوردگی نشده و در برابر بسیاری از مواد خورنده مانند اسیدها و بازها مقاوم بوده و تخریب نمی‌شود. همچنین افزایش مقاومت، کاهش شکنندگی، افزایش دوام و مقاومت در برابر یخ زدگی از دیگر ویژگی های این الیاف می‌باشد [۴۵ و ۴۶]. در شکل ۴ تصویری از الیاف پلی پروپیلن استفاده شده در این نوشتار آورده شده است.

جدول ۳ مشخصات الیاف پلی پروپیلن استفاده شده

مشخصات	مقادیر
چگالی (gr_f/cm^3)	۰/۹۱
دمای ذوب (°C)	۱۶۵
ازدیاد طول (٪)	≤۸۰
استحکام کششی (MPa)	≥ ۳۴۵
مدول الاستیسیته (GPa)	≥ ۳/۵
طول الیاف (mm)	۱۲
قطر الیاف (Microns)	۳۵

شکل ۴ الیاف پلی پروپیلن استفاده شده

الیاف بافته شده در کیسه پلیمری

الیاف موجود در کیسه های پلیمری به صورت بافته شده می‌باشد. برای استفاده از این الیاف ابتدا بافت الیاف ها از یکدیگر جدا شدند، سپس الیاف های نواری تهیه شده به طول های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلیمتر بریده شده و مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۴- ۸ الیاف کیسه پلیمری استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می دهد. از این الیاف به مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن خشک خاک برای ساخت نمونه ها استفاده شد. این الیاف از جنس پلی پروپیلن بوده و دارای خواصی نزدیک به خواص الیاف پلی پروپیلن می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ مشخصات الیاف کیسه پلیمری استفاده شده

مشخصات	مقادیر
جنس الیاف	پلی پروپیلن
ضخامت (mm)	۰/۰۳۵
وزن مخصوص (gr_f/cm^3)	۰/۸۵
عرض (mm)	۳/۵
مقاومت کششی حداکثر (MPa)	۹۲
جذب آب	صفر

شکل ۵ الیاف بریده شده از کیسه پلیمری دور ریز

الیاف درخت خرما

الیاف خرما بیشترین محصول زیر کشت در جنوب ایران با مساحت ۱۸۳ هزار هکتار است که تقریبا هفده درصد کشت کل دنیا را به خود اختصاص داده است [۷]. الیاف خرما که محصولی جانبی از این درخت است که دارای ویژگی های خاص مانند قیمت ارزان، فراوانی در مناطق بومی، سبکی، دوام و مقاومت نسبی است [۸]. هنگام هرس کردن درختان نخل الیاف آن که در گفتار محلی به آن "سیسی" گفته می‌شود، به عنوان یک ماده ضایعاتی بر روی زمین می ریزد. این الیاف به صورت طبیعی بافتی پارچه مانند دارند و دارای رشته های تار و پودی هستند در این نوشتار بعد از جدا سازی این الیاف های رشته ای از ضایعات تهیه شده از درختان نخل خرما شهرستان بم، به طول های ۲۰ و ۴۰ میلیمتر بریده شده و به مقادیر ۰/۵ و ۱ ۱/۵ درصد وزن خشک خاک مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات این الیاف در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ مشخصات الیاف نخل خرما استفاده شده

مشخصات	مقادیر
جذب آب در ۲۴ ساعت	٪۱۷۸
افزایش مقطع عرضی (۲۴ ساعت)	٪۲/۵۱
افزایش طول (۲۴ ساعت)	٪۱۱/۱۱

مقاومت کششی حداکثر (MPa)	٪۶۷/۴۶
وزن مخصوص (gr_f/cm^3)	۰/۹
مدول الاستیسیته	۶۰۰/۸
قطر متوسط (mm)	۰/۳۵

خاکستر نخل خرما

از احتراق ضایعات حاصل از هرس درختان نخل خرما شهرستان بم در دمای معین خاکستر نخل خرما با وزن مخصوص ۱/۷۳ گرم بر سانتیمتر مکعب تهیه و بعد از عبور از الک شماره ۲۰۰ به مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت؛ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به تجزیه پذیر بودن الیاف نخل خرما، هدف از استفاده از خاکستر نخل در این تحقیق، استفاده بهینه تر از ضایعات نخل خرما برای اصلاح خاک می‌باشد.

جدول ۶ مشخصات شیمیایی خاکستر نخل خرما استفاده شده

ترکیبات	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	CI (%)	LOI (%)
درصد وزنی	۶۹/۴۵	۵/۵۱	۳/۸۱	۰/۲۹	۵/۴۶	۵/۱۷	۹/۰۳	۰/۱۵۴	۱/۱۲

شکل ۶ الف- الیاف نخل ب- خاکستر نخل خرما استفاده شده

طرح اختلاط

برای رسیدن به هدف تحقیق که بررسی تأثیر حضور مواد ضایعاتی بر خواص رفتاری خاک طبیعی و خاک تثبیت‌شده با آهک می‌باشد، سعی شد تا طرح های اختلاط برای عملیات تثبیت که گونه ای انتخاب شوند تا روندهای رفتاری متفاوتی از مصالح تولید شده بدست آید و تأثیر تسلیح بر مصالح با رفتار متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. ازاین‌رو، طرح های اختلاط متفاوت برای هریک از دوره های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه، مطابق جدول ۷ انتخاب گردید. درصد های داده شده درصدهای وزنی می باشند.

دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات ۱۹۷-۱۷۴

جدول ۷ طرح اختلاط نمونه های ساخته شده برای هر دوره عمل آوری

ماده افزودنی	درصد آهک			
	۰	۲	۴	۶
درصد خرده لاستیک	۰	۰	۰	۰
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	۱	۱	۱	۱
	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
	۲	۲	۲	۲
درصد الیاف لاستیک	۰	۰	۰	۰
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	۱	۱	۱	۱
	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
	۲	۲	۲	۲
درصد الیاف نخل خرما	۰	۰	۰	۰
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	۱	۱	۱	۱
	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
درصد خاکستر نخل خرما	۰	۰	۰	۰
	۲	۲	۲	۲
	۴	۴	۴	۴
	۶	۶	۶	۶
درصد الیاف پلی پروپیلن	۰	۰	۰	۰
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	۱	۱	۱	۱
	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
درصد الیاف کسیه پلیمری	۰	۰	۰	۰
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	۱	۱	۱	۱
	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵

مقدار آب در هر طرح اختلاط، برابر با مقدار رطوبت بهینه می معادل با انرژی تراکمی مورد استفاده در ساخت نمونه ها انتخاب گردیده است.

تهیه و عمل آوری نمونه ها

پس از مشخص شدن طرح های اختلاط و درصد رطوبت بهینه ی مورد نظر برای انرژی تراکم مورد استفاده، نوبت به ساخت نمونه

های لازم برای انجام آزمایشات مورد نظر می رسد. به منظور تحقق معادل سازی انرژی از رابطه ی زیر استفاده شده است:

(تعداد ضربه ها برای هر لایه) (تعداد لایه ها) ارتفاع سقوط چکش) (وزن چکش)

= انرژی تراکم

حجم قالب

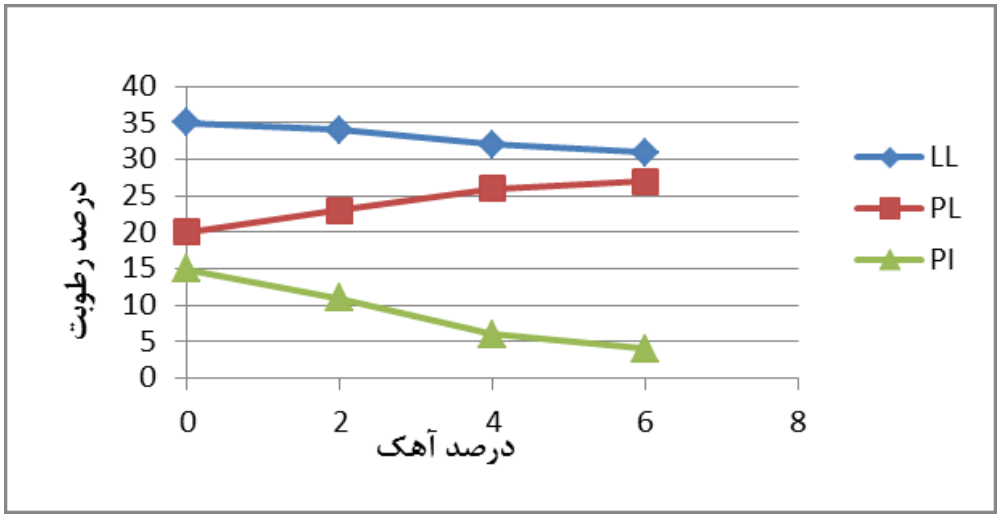
$$\text{انرژی تراکم} = \frac{\left(\text{تعداد ضربه ها برای هر لایه}\right)\left(\text{تعداد لایه ها}\right)\left(\text{ارتفاع سقوط چکش}\right)\left(\text{وزن چکش}\right)}{\text{حجم قالب}}$$

انرژی تراکم با توجه به آزمایش تراکم استاندارد برآورد شده است، با توجه به معلوم بودن وزن چکش و ارتفاع سقوط چکش و انتخاب ابعاد قالب سایر پارامترها محاسبه شده اند. برای انجام آزمایش فشاری تک محوری از هر طرح اختلاط سه نمونه استوانه ای با قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر در قالب های مورد نظر، در ۳ لایه و هر لایه با ۴ ضربه توسط چکش ۴/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۳۰ سانتیمتر متراکم گردیدند. پس از درآوردن نمونه ها از قالب، آن‌ها را زیر پوشش پلاستیکی در دمای آزمایشگاه قرار داده تا عملیات گیرش به صورت مشابه در تمام نمونه ها روی دهد و نمونه رطوبت کافی را برای عمل آوری حفظ کند، شکل ۴-۷ نمونه های ساخته شده را نشان می دهد. عمر گیرش نمونه ها برای انجام آزمایش، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه تعیین گردید. نمونه ها از لحاظ مقدار خواص فیزیکی مورد نظر تقریبا تشابه خوبی با هم داشته و تفاوت رفتاری آن‌ها در هنگام آزمایش مرتبط با نحوه و میزان انجام واکنش پوزولانی آهک، تغییر درصد مواد افزودنی، تغییر طول الیاف افزودنی و دوره گیرش خواهد بود.

شکل ۷ نمونه های عمل آوری شده

نتایج آزمایش حدود اتربرگ

شکل ۸ نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه ها با افزایش درصد آهک تا ۶ درصد را نشان میدهد. با توجه به شکل ۸، با افزودن آهک به خاک حد روانی (LL) و شاخص خمیری (PI) کاهش یافته و حد خمیری افزایش می یابد. با افزودن آهک بخشی از رطوبت صرف واکنش هیدراتاسیون شده و در نتیجه با افزایش درصد آهک میزان رطوبت مورد نیاز برای رسیدن خاک به حالت خمیری افزایش می یابد. همچنین به دلیل بالا بودن تمایل جذب آب در آهک، با افزایش درصد آهک مقدار حد روانی کاهش می یابد.



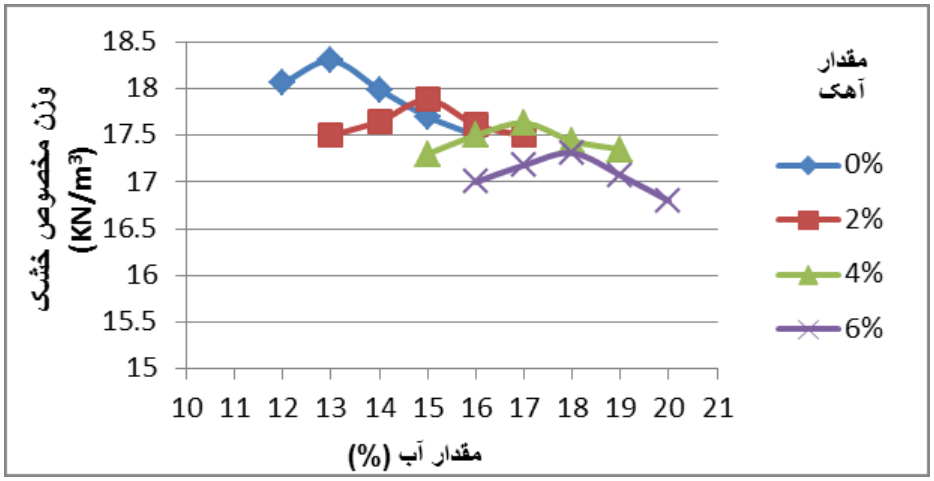
شکل ۸ تغییرات حدود اتربرگ با افزودن آهک به خاک

نتایج آزمایش تراکم استاندارد

با افزودن آهک و مواد ضایعاتی مقادیر درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک تغییر می نماید. نتایج حاصل از تراکم استاندارد به تفکیک برای هر ماده در زیر آورده شده است.

نتایج آزمایش تراکم استاندارد در حضور درصدهای مختلف آهک

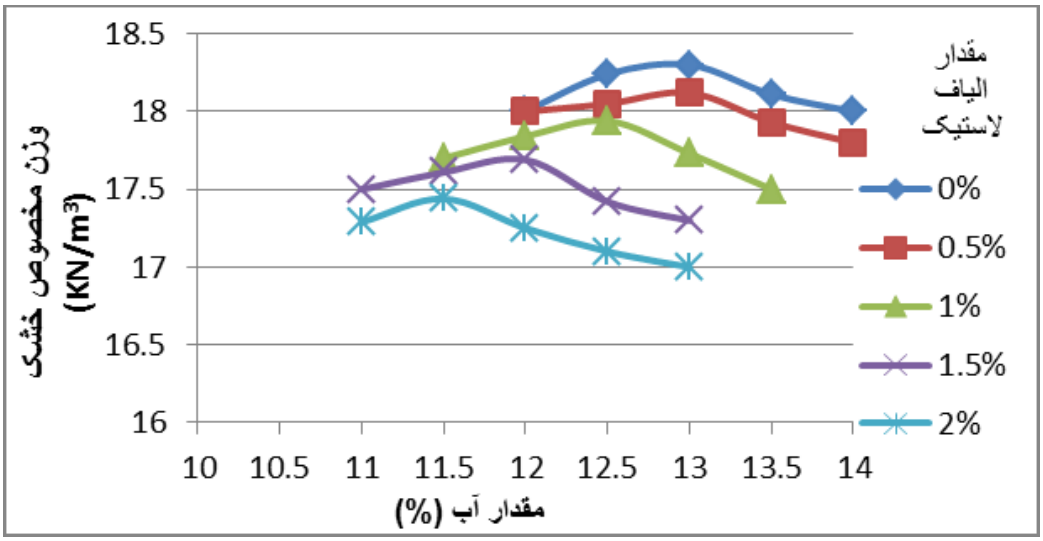
نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه های حاوی مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد آهک در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به شکل، با افزودن آهک میزان رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش یافته است. وزن مخصوص خشک خاک با افزودن ۶ درصد آهک به خاک، از مقدار ۳/۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب تا مقدار ۱۷/۳۱ کیلو نیوتن بر متر مکعب کاهش داشته است که دلیل این امر را می‌توان کم بودن چگالی آهک نسبت به خاک دانست. همچنین درصد رطوبت بهینه خاک با افزودن ۶ درصد آهک از ۱۳ درصد به ۱۸ درصد افزایش یافته است که با توجه به جذب آب بالای آهک نسبت به خاک قابل توجیه است.



شکل ۹ تغییرات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک با افزودن آهک

نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک با ضایعات لاستیک فرسوده

نتایج آزمایش تراکم برای خاک حاوی مقادیر ۰/۵، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف لاستیک فرسوده و خرده لاستیک به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. با توجه به شکل ها می‌توان دریافت، افزودن الیاف لاستیک و خرده لاستیک فرسوده موجب کاهش رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک می گردد. با افزودن الیاف لاستیک و خرده لاستیک فرسوده تا مقدار ۲ درصد وزنی، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک به ترتیب به میزان ۰/۸۶ و ۰/۷۹ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش می یابد که دلیل آن می‌تواند چگالی پایین لاستیک فرسوده نسبت به خاک باشد. افزودن این مقدار لاستیک سبب کاهش رطوبت بهینه خاک به ترتیب از مقدار ۱۳ درصد به ۱۱/۵ درصد و ۱۲ درصد شده است، این نکته با توجه به کاهش تمایل لاستیک به جذب آب نسبت به خاک قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۱۰ تغییرات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک با افزودن الیاف لاستیک فرسوده

آزمایش های انجام شده

برای تعیین خصوصیات خاک و مواد افزودنی همچنین تاثیر مصالح افزودنی استفاده شده بر روی خصوصیات خاک مورد نظر، آزمایشاتی انجام شد که در ادامه به شرح این آزمایشات پرداخته خواهد شد.

ازمایش حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ جهت بررسی رفتارشناسی مهندسی خاک هنگام مواجه با آب طبق روش توصیه شده در آیین نامه ASTM D4318 - انجام شده است [۹۵]. خاک های ریزدانه با فزایش مقدار آب جذب شده حالات مختلفی به خود می گیرند. افزایش آب باعث پوشیده شدن دانه ها با یک لایه آب جذب سطحی می‌شود. با افزایش آب، ضخامت لایه آب دور دانه ها اضافه و لغزش دانه ها بر روی یکدیگر راحت تر می‌شود؛ بنابراین رفتار خاک عملا به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد. در نتیجه حدود اتربرگ می‌تواند پایه خوبی برای طبقه بندی و نام گذاری خاک های ریزدانه باشد.

قبل از انجام آزمایش، طرح اختلاط خاک با درصدهای متفاوت آهک و خاک تثبیت نشده تهیه شده و از الک شماره ۴۰ عبور داده شده است. جهت انجام آزمایش حد خمیری، رطوبت به گونه ای به خاک اضافه شده تا هنگام ساخت فیتیله با قطر ۳/۲ میلیمتر شروع ایجاد ترک مشاهده گردد. سپس با توزین آن و قرار دادن بخشی از آن در آون (خشک کن) طی ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد مقدار رطوبت خاک اندازه گیری شده است. با میان گیری عددی و تکرار آزمایش مقدار دقیق آن برآورد شده است. در آزمایش حد روانی با استفاده از جام کاساگرانده که متشکل از یک فنجان برنجی، یک پایه پلاستیکی، سیستم شمارنده و یک

شیارزن می‌باشد، رطوبت مذکور برآورد شده است. در این آزمایش دو سوم جام (حدود ۶۶ درصد) از خاک مرطوب پر شده و سپس بر روی آن شیاری با عرض ۱۱ میلیمتر در بالا و ۲ میلیمتر در کف جام ایجاد شد. در صد رطوبتی که در آن طی ۲۵ ضربه، موجب بسته شدن شیار مذکور شود، برابر حد روانی می‌باشد. سپس به ازای رطوبت های مختلف نمودار لگاریتمی ترسیم و حد روانی تعیین گردید.

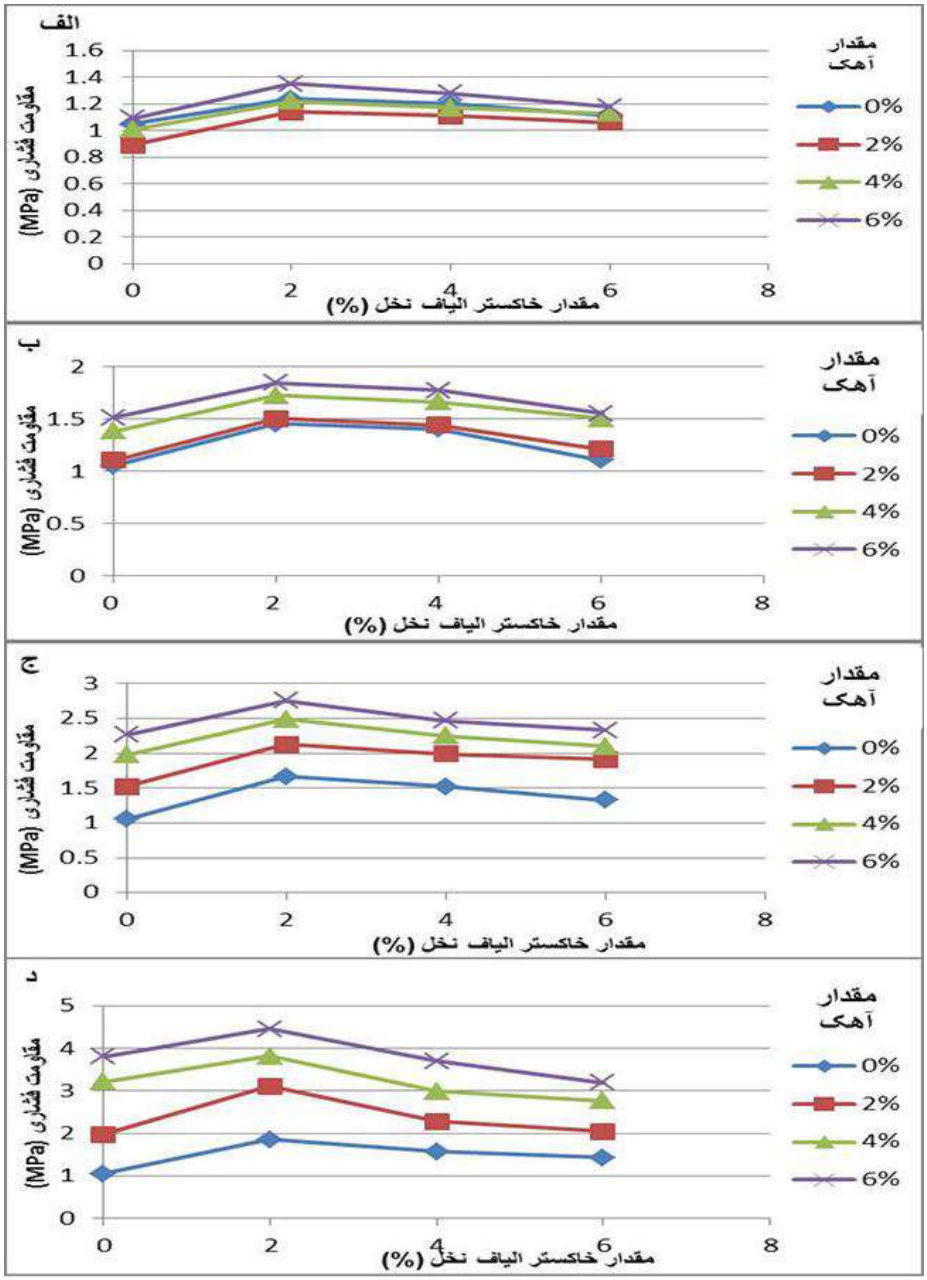
آزمایش تراکم

در عمل متراکم کردن، آب اضافه شده جایگزین هوایی می‌شود که در خلل و فرج خاک وجود دارد. ولی بعد از رسیدن به درصد بالایی از اشباع، آب فضاهایی را که می‌تواند توسط ذرات خاک پر شود، اشغال می کند و مقدار هوای محبوس شده در خاک اساسا ثابت می ماند [۹۶]. همچنین لازم به ذکر است که اگر میزان آب از حد معینی بیشتر شود، آب انرژی وارد شده را بدون تغییر شکل جذب می کند و مانع انتقال انرژی به ذرات خاک می‌شود [۱۰۴].

بنابراین، یک مقدار بهینه آب برای خاک مورد نظر و عمل تراکمی که بیشینه ی وزن مخصوص خاک را میدهد، وجود دارد. هدف از انجام آزمایش تراکم در آزمایشگاه، پیدا کردن این مقدار بهینه آب می‌باشد. در این نوشتار آزمایش تراکم روی نمونه ها طبق استاندارد (ASTM D 698) [۹۷]، صورت گرفت تا بتوان تاثیر مواد افزودنی را روی رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک معین کرد. به علاوه از آنجا که سایر آزمایش ها همانند مقاومت فشاری تک محوری نیازمند آماده سازی نمونه خاک با مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک می باشند، بنابراین انجام آزمایش تراکم ضروری است. برای انجام این آزمایش، مخلوط ساخته شده داخل قالب تراکم استاندارد به حجم۹۵/۶ سانتیمتر مکعب در سه لایه ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش از ارتفاع ۳۰ سانتیمتر متراکم گردید. در نهایت وزن مخصوص خشک خاک بدست آمد. در مرحله بعد با انجام چندین مرحله تکرار آزمایش تراکم استاندارد و با اضافه کردن مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد رطوبت به رطوبت پیش فرض مرحله اول آزمایش، وزن مخصوص در هر تکرار تعیین گردید و در انتها وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک اندازه گیری شد. همچنین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه مخلوط های خاک حاوی آهک و سایر مواد افزودنی استفاده شده در این نوشتار در درصد های مشخص آهک و مواد افزودنی نیز اندازه گیری شدند.

شکل ۵-۳۵ تأثیر افزودن خاکستر نخل را روی مقاومت فشاری تک محوری نمونه های تثبیت‌شده با آهک را نشان میدهد. مطابق با شکل، افزودن خاکستر نخل تا مقدار ۲ درصد، سبب افزایش مقاومت نمونه های تثبیت‌شده با آهک می‌شود و همچنین افزایش مدت زمان عمل آوری منجر به افزایش مقاومت شده است. بیشینه مقاومت در نمونه حاوی ۲ درصد خاکستر نخل و ۶ درصد آهک، در مدت زمان‌های عمل آوری ۵۶ برابر ۴/۴۶ مگاپاسکال بدست آمده است.

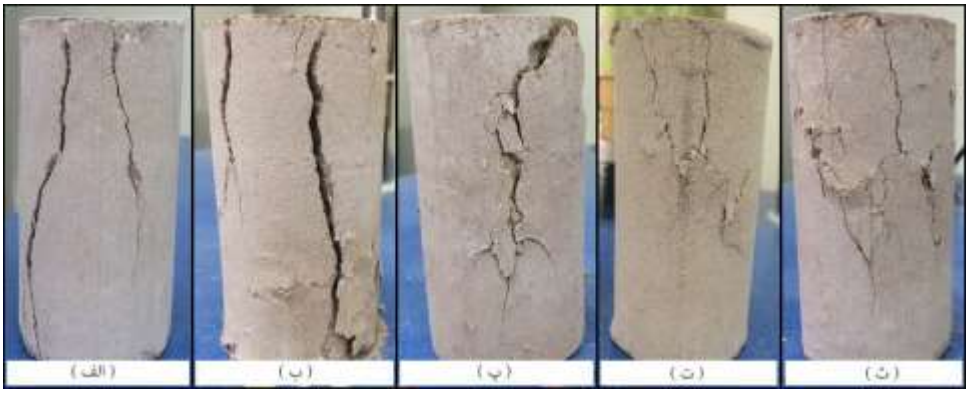
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات ۱۹۷-۱۷۴



شکل ۱۱ تاثیر خاکستر نخل خرما بر مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با آهک را بعد از دوره عمل آوری الف- لاروز - ب- ۱۴ روز. ج- ۲۸روز. د- ۵۶ روز

شکل ۱۲ نمونه های گسیخته شده پی آزمایش مقاومت فشاری تک محوره را نشان می دهد با افزودن خاکستر نخل نمونه تحت ترک های بیشتری نسبت به حالت تثبیت‌شده با آهک گسیخته شده است، این نکته بیانگر کاهش شکست ترد نمونه ها است.

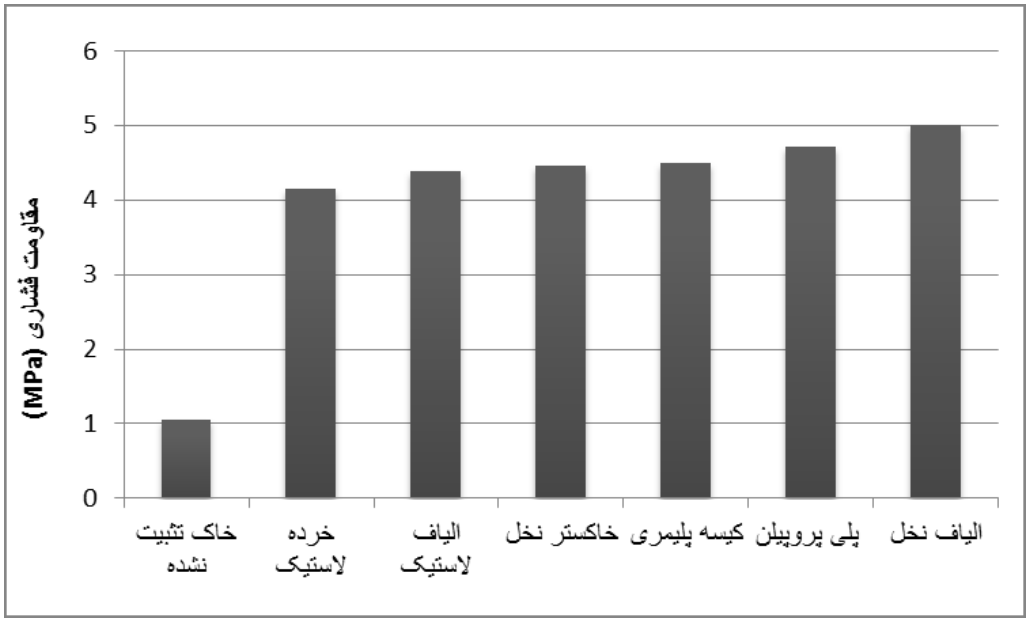
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات ۱۹۷-۱۷۴



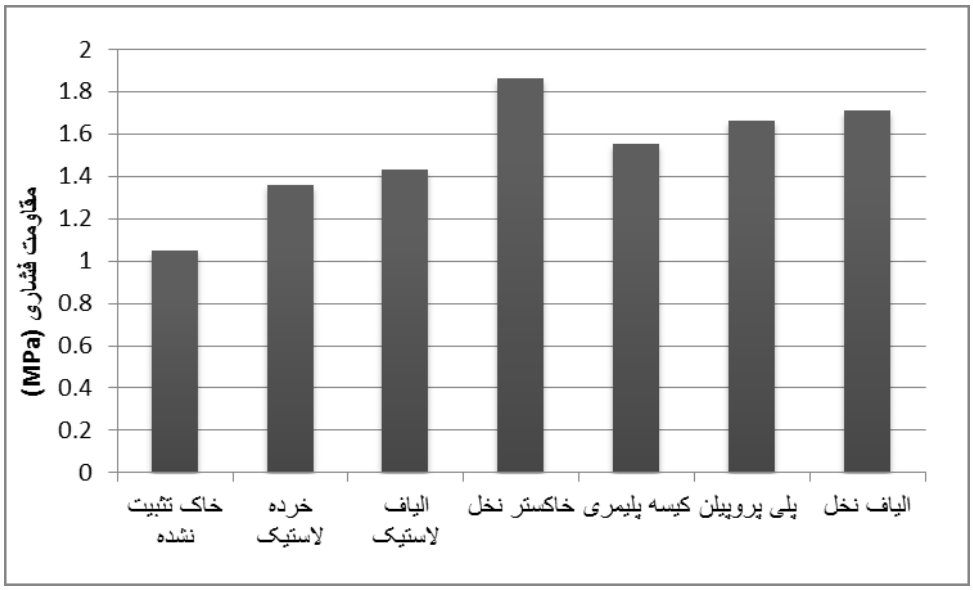
شکل ۱۲ نمونه های گسیخته شده پس از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری الف- خاک تثبیت نشده ب- خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک ب خاک حاوی ۶ درصد آهک و ۲ درصد خاکستر- خاک حاوی ۶ درصد آهک و ۴ درصد خاکستر خاک حاوی ۶ درصد آهک و ۶ درصد خاکستر

مقایسه تأثیر مواد افزودنی استفاده شده بر خصوصیات مقاومتی ماسه رس دار

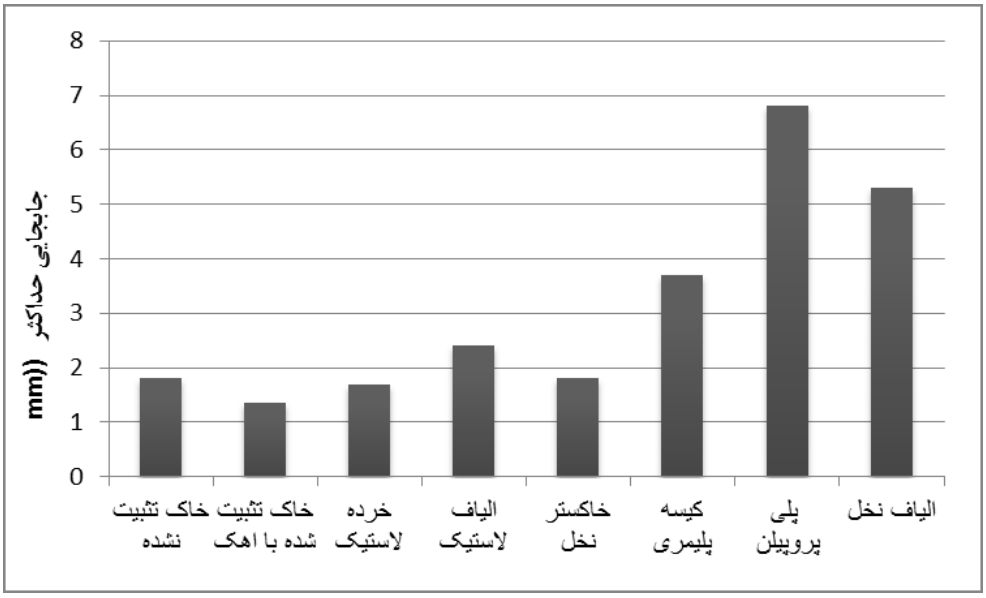
شکل ۱۳، ۱۴و ۱۵ تأثیر مواد افزودنی را به ترتیب بر مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک پس از ۵۶ روز و جابجایی حداکثر خاک تثبیت‌شده مورد مطالعه را نشان می دهند. بیشترین تاثیر بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک مورد مطالعه، مربوط به خاکستر الیاف نخل می‌باشد. مقاومت ترکیب خاکستر نخل با خاک وابسته به زمان بوده و با گذر زمان افزایش می یابد. به دلیل پودری بودن، این ماده بهتر از سایر الیاف با خاک ترکیب شده و باعث افزایش مقاومت خاک مورد مطالعه می‌شود. همچنین در نمونه های تثبیت‌شده با آهک الیاف نخل بهترین نتیجه را داشته است. الیاف نخل خرما با خاصیت جذب آب و توزیع مناسب و یکنواخت در خاک باعث افزایش اتصال ذرات خاک و الیاف شده و نمونه همگن مقاومت فشاری بیشتری خواهد داشت. الیاف پلی پروپیلن، الیاف نخل و الیاف کیسه پلیمری به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی جابجایی حداکثر در لحظه گسیختگی و شکست نمونه داشته اند، نمونه های تثبیت نشده با وقوع اولین ترک ها دچار شکست ترد شده و گسیخته می شوند، در حالیکه، با حضور الیاف، الیاف مانع از گسترش ترک شده و نمونه با ترک های بیشتر، تحت جابجایی بیشتر و دیرتر گسیخته می‌شود. الیاف پلی پروپیلن مقاومت کششی بیشتری نسبت به سایر الیاف داشته و تأثیر چشمگیرتری بر نحوه گسیختگی خاک داشته است.



شکل ۱۳ مقایسه تاثیر مواد ضایعاتی بر مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز



شکل ۱۴ مقایسه تأثیر مواد ضایعاتی بر مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه



شکل ۱۵ مقایسه تأثیر هر یک از مواد استفاده شده بر جابجایی حداکثر در درصد مشابه در خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک در مدت عمل آوری ۵۶ روز

کاهش درصد آهک و جایگزینی آن با مواد ضایعاتی

جدول ۸ اعداد حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در درصد بهینه مواد ضایعاتی و دوره عمل آوری ۵۶ روز را به ازای درصدهای مختلف آهک نشان می دهد. مطابق با جدول، مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک پس از ۵۶ روز برابر ۳/۸۱ مگاپاسکال می‌باشد، حال آنکه مقاومت خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد آهک و ۱/۵ درصد الیاف نخل برابر ۴/۶ مگاپاسکال می‌باشد. پیداست با کاهش درصد آهک و افزودن درصد مشخصی از الیاف های ضایعاتی به جز خرده لاستیک می‌توان به مقاومتی بیشتر از خاک تثبیت‌شده دست یافت.

جدول ۸ مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با درصدهای متفاوت آهک و مسلح با درصد بهینه ماده ضایعاتی پس از ۵۶ روز

	درصد آهک			
	٪۰	٪۲	٪۴	٪۶
خاک طبیعی	MPa ۱/۰۵	MPa ۱/۹۸	MPa ۳/۲۲	MPa ۳/۸۱
خاک حاوی ۰/۵ درصد خرده لاستیک	MPa ۱/۳۶	MPa ۲/۸	MPa ۳/۶۷	MPa ۴/۱۵
خاک حاوی ۰/۵ درصد الیاف لاستیک	MPa ۱/۴۳	MPa ۳	MPa ۳/۹۶	MPa ۴/۳۹
خاک حاوی ۲٪ خاکستر نخل	MPa ۱/۸۶	MPa ۳/۱۱	MPa ۳/۸۲	MPa ۴/۴۶
خاک حاوی ۰/۵ درصد کیسه پلیمری	MPa ۱/۵۵	MPa ۳/۲	MPa ۳/۹۵	MPa ۴/۵
خاک حاوی ۱ درصد پلی پروپیلن	MPa ۱/۶۶	MPa ۳/۴	MPa ۴/۴۱	MPa ۴/۷۱
خاک حاوی ۱/۵ درصد الیاف نخل	MPa ۱/۷۱	MPa ۳/۵۸	MPa ۴/۶	MPa ۵

نتیجه گیری

در نوشتار حاضر آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، تراکم استاندارد و حدود اتربرگ برای ارزیابی تأثیر درصد ماده تسلیح کننده، درصد آهک، طول الیاف و مدت زمان عمل آوری بر خصوصیات مقاومتی خاک تثبیت نشده و تثبیت‌شده با آهک انجام شده است. خلاصه نتایج به دست آمده از فعالیت های آزمایشگاهی به شرح زیر است:

۱. مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه با افزایش درصد آهک و مدت زمان عمل آوری، افزایش می یابد. مقاومت فشاری تک محوری در حضور ۶ درصد آهک پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز، ۲/۶۷ مگاپاسکال افزایش داشته است. همچنین با افزودن ۶ درصد آهک به خاک مقدار جابجایی در نقطه گسیختگی از ۱/۸ میلیمتر به ۱/۱۶ میلیمتر کاهش داشته، این نکته بیانگر کاهش شکل پذیری و گسیختگی ترد نمونه می‌باشد.

۲. افزودن خرده لاستیک و الیاف لاستیک به خاک تا میزان تا میزان ۰/۵ درصد منجر به افزایش مقاومت فشاری تک محوری در هر دو حالت تثبیت‌شده و تثبیت نشده می‌شود، پس از این میزان با افزایش درصد لاستیک مقاومت فشاری کاهش می یابد. افزودن ۰/۵ درصد خرده لاستیک و الیاف لاستیک به خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز منجر به افزایش مقاومت از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به ترتیب به مقدار ۴/۱۵ و ۴/۳۹ مگاپاسکال می‌شود.

۳. حضور خرده لاستیک و الیاف لاستیک در خاک تثبیت‌شده با آهک باعث افزایش جابجایی در نقطه گسیختگی و افزایش شکل پذیری خاک می‌شود. حداکثر جابجایی خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک، ۲ درصد خرده لاستیک و ۲ درصد الیاف لاستیک پس از ۵۶ روز، از مقدار ۱/۱۶ میلیمتر به ترتیب به مقدار ۱/۵ و ۱/۷ میلیمتر افزایش یافته است.

۴. افزودن الیاف پلی پروپیلن و کیسه پلیمری به ترتیب تا مقدار ۱ و ۰/۵ درصد منجر به افزایش مقاومت خاک به ترتیب به میزان ۳۶/۷ و ۲/۳۲ درصد می‌شود، پس از مقدار مذکور، با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری کاهش می یابد. مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک و یک درصد الیاف پلی پروپیلن پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به مقدار ۴/۷۱ مگاپاسکال افزایش داشته است. همچنین در حضور ۰/۵ درصد کیسه پلیمری و ۶ درصد آهک پس از ۵۶ روز مقاومت به مقدار ۴/۵ مگاپاسکال رسیده است. با توجه به اعداد اعلام شده، اختلاف الیاف پلی پروپیلن و کیسه پلیمری ضایعاتی کمتر از ۵ درصد بوده و استفاده از الیاف ضایعاتی توصیه می‌شود.

۵. الیاف پلی پروپیلن و کیسه پلیمری باعث افزایش شکل پذیری خاک مورد مطالعه در هر دو حالت تثبیت‌شده و تثبیت نشده می گردد. در نمونه تثبیت‌شده با ۶ در صد آهک پس از ۵۶ روز عمل آوری، جابجایی حداکثر با افزودن ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۰/۵ درصد الیاف کیسه پلیمری به صورت مجزا، به ترتیب از مقدار ۱/۱۶ میلیمتر به مقدار ۴/۶۶ و ۲/۷ میلیمتر افزایش داشته است.

۶. با افزایش درصد الیاف نخل تا مقدار ۱/۵ درصد مقاومت فشاری تک محوری از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به مقدار ۱/۷۱ مگاپاسکال در حالت تثبیت نشده و به مقدار ۳/۱ مگاپاسکال در حالت تثبیت‌شده با آهک پس از ۵۶ روز دوره عمل آوری، افزایش می یابد. همچنین افزودن الیاف نخل باعث افزایش جابجایی در نقطه گسیختگی از ۱/۱۶ میلیمتر به ۳/۱ میلیمتر و افزایش شکل پذیری خاک مورد مطالعه می‌شود.

۷. مقاومت فشاری خاک حاوی خاکستر الیاف نخل با افزایش دوره عمل آوری افزایش می یابد. با افزایش درصد خاکستر تا مقدار ۲ درصد مقاومت فشاری از مقدار ۱/۰۵ مگاپاسکال به مقدار ۱/۸۶ مگاپاسکال افزایش و از آن پس کاهش داشته است، افزودن ۲ درصد خاکستر نخل و ۶ درصد آهک پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز موجب افزایش مقاومت فشاری تک محوری بیش از ۴ برابر می‌شود.

۸. با افزاشی طول الیاف کیسه پلیمری و الیاف درخت نخل تا مقدار ۴۰ میلیمتر طول الیاف گیه پلیمری با افزایش میلیمتر مقاومت

فشاری تک محوری افزایش می یابد.

۹. با افزودن آهک به خاک، حد روانی و شاخص خمیری خاک کاهش یافته و حد خمیری آن افزایش می یابد.

از اهداف پژوهش حاضر کاهش درصد آهک و جایگزینی آن با الیاف ضایعاتی بوده است. مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت‌شده با ۶ درصد آهک پس از دوره عمل آوری ۵۶ روز برابر ۳/۸۱ مگاپاسکال بوده است، در حالی که مقاومت خاک حاوی ۴ درصد آهک و ۰/۵ درصد خرده لاستیک، ۰/۵ درصد الیاف لاستیک، ۰/۵ درصد کیسه پلیمری، ۱ درصد پلی پروپیلن، ۱/۵ درصد الیاف نخل و ۲ درصد خاکستر نخل به‌طور مجزا به ترتیب برابر ۳/۲۲، ۳/۶۷، ۳/۹۶، ۳/۹۵، ۴/۴۱، ۴/۶ و ۳/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد. با جایگزین کردن آهک با الیاف ضایعاتی می‌توان به مقاومتی بیشتر از خاک تثبیت‌شده با آهک دست یافت.

منابع

۱. امینی و بررسی آزمایشگاهی مقایسه اثر تثبیت کنندگی اهک سیمان و محصول ساخته شده با فناوری نانو (CBR+)در تثبیت خاک های رسیو کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۳۹۰. ۲۷-۲۹.

۲. طباطبایی امو روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی تهران، ۱۳۷۷. ۴۱-۴۷.

3. Adetoro A E. Adekanmi SJ, Potentials of palm keneral shell and sawdust ashes for stabilization of gbonyin local government area soul, Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, 2015, 2(8), 2315-2319.
4. Ahmd F. Bateni F, Azmi M Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres, Geotextiles and Geomembranes, 2010. 28.93-99.
5. Eldin NN, Senouci A B, Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete, Cement & concrete composites, 1994, 16, 287-298.
6. Gesoğlu M. Guneyisi E. Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. Construction and building materials, 2011, 25, 3319-3326.
7. Hongu T. Philips G. New fibers, Ellis horwood series in polymercience and technology, 1990, 3(1), 1-7.
8. Jacobson J, Factor affecting strength gained in lime cement columns and development of laboratory testing procedure, Thesis of m.se, 9-12.
9. Karol RH, Chemical grouting and soil stabilization, Marcel dekker, 2003, 15.
10. Lepcha K H, Agnihotri A K Priyadarshee A. Yadav M. Application of tire chips in reinforcement of soil: A review. Journal of civil engineering and environmental technology, 2014, 1(5), 51 - 53.
11. Mallela J. Consideration of lime stabilization layers in mechanistic empirical pavement design. The national lime association, 2004, 19.
12. Mohammed BS Khandaker M, Anwar H. Jackson TE S. Grace W. Abdullahi M, Properties of crumb rubber hollow concrete block. Journal of cleaner production, 2012, 57-67.
13. Otoko G R. Ephriam M E. Ikegboma A, Reinforcement of a lateritic soil using oil palm fruit fibre, International journal of engineering and technology research, 2014.
14. Otoko GR. Fubara M I. S.Chinweike I. Soft soil stabilization using palm oil fibre ash, Journal of multidisciplinary engineering science and technology, 2016, 3(5), 18-19.
15. Patel M A. Patel H, A review on effects of stabilizing agents for stabilization of weak

soil, Civil and environmental research, 2012. 2. 1-7.
16. Petry TM, Sobhan K, Evaluation of chemical stabilizers: state of the practice report, Transportation research E-Circular, 2005, 34-39.
17. Pourakbar S. Asadi A, B K Huat B. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement, Transportation Geotechnics, 2015, 3.24-35.
18. Sherwood P. Soil stabilization with cement and lime, Her majesty stationary office, 1993, 102-105.
19. Thomas B S. Gupta RC, Panicker V J, Recycling of waste tire rubber as aggregates in concrete-durability related performance, Journal of cleaner production, 2015, 5-8.
20. Tiwari SK Singh R. Mathur S. Gupta A, Soni K, State of art Techniques for Soil Improvement, 2010, 18-21.