

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

ارزیابی مدول برجهندگی لایه اساس بهبود یافته با ضایعات
لاستیک با استفاده از آزمایش‌های pfwd و سه محوری
سیکلک و مقایسه نتایج آنها

نگارنده:

محمد امیر عبداللہیان

استاد راهنما:

دکتر حسین قاسم‌زاده طهرانی

دکتر محسن کرامتی

تیر ۱۳۹۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد امیر عبداللهیان به شماره دانشجویی: ۹۵۱۶۶۴۴

تحت عنوان: ارزیابی مدول برجهندگی لایه اساس بهبود یافته با ضایعات لاستیک با استفاده از آزمایش‌های

pfwd و سه محوری سیکلیک و مقایسه نتایج آنها

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه

مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر حسین قاسم- زاده طهرانی
			دکتر محسن کرامتی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر مهدی گلی		دکتر رضا نادری
			دکتر ایمان آقاییان

سپاس

سپاس **خدایی** را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد؛

خدایی که دست هر چشمی از دامان دیدارش کوتاه است و فهم هر کبوتر توصیف‌گری از پرواز در آسمان

وصفش عاجز....

برخود لازم می‌دانم از استادان ارجمندم جناب آقای **دکتر حسین قاسم زاده طهرانی** و **دکتر محسن کرامتی**

که بی‌دریغ مرا در مسیر رسیدن به هدف‌هایم و انجام این پژوهش پشتیبانی کردند، نهایت تشکر و

قدردانی را داشته باشم. در پایان از **مهندس امین رامش** و سایر **عزیزانی** که در انجام این تحقیق مرا یاری

کردن متشکرم.

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛

اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می‌شود به:

اولین و مهربان‌ترین آموزگار زندگی‌ام، **پرونده‌کار یگانه‌ام**؛

تقدیم می‌شود به **پدر و مادر عزیزتر از جانم**؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه‌ی فردا،

دوستشان دارم...

تقدیم می‌شود به **همسره عزیزم**؛ که با قلبی آکنده از عشق و معرفت محیطی سرشار از سلامت و

امنیت و آرامش را برای من فراهم آورد.

تعهد نامه

اینجانب محمد امیر عبداللهمیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی مدول برجهندگی لایه اساس بهبود یافته با ضایعات لاستیک با استفاده از آزمایش‌های pfwd و سه محوری سیکلیک و مقایسه نتایج آنها تحت راهنمایی دکتر حسین قاسم‌زاده-طهرانی و دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

لاستیک‌های فرسوده ماشین‌آلات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زباله‌های صنعتی و کارخانه‌ای شناخته می‌شوند که افزایش روزافزون آن مشکلاتی را برای جوامع بشری به وجود آورده است. استفاده مجدد از این ماده در سایر صنایع به‌ویژه مهندسی عمران در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر پژوهشگران امکان استفاده از این ماده را در بتن، خاک و مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ترکیب این ماده با این مواد برخی از ویژگی‌های آن‌ها را بهبود می‌بخشد.

هدف از انجام این پژوهش بررسی مطالعه امکان‌سنجی جایگزینی خرده لاستیک به جای بخشی از مصالح سنگی موجود در لایه اساس راه و بررسی تأثیرات آن در این لایه می‌باشد. در همین راستا آزمایشات CBR و PFWD که نتایج آن‌ها دو فاکتور مهم در طراحی و کنترل کیفیت روسازی راه است به انجام رسید. در این مطالعه از خرده لاستیک با اندازه ذرات بین ۹/۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین مصالح بین الک‌های نمره ۴ و $\frac{3}{8}$ استفاده شد.

نتایج حاصل از آزمایش CBR در حالت خشک نشان داد که به‌ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک با بخشی از دانه‌بندی مصالح سنگی لایه‌ی اساس راه، مقدار CBR نمونه‌ها افزایش می‌یابد هم‌چنین در CBR اشباع با جایگزین کردن خرده لاستیک با سایز الک شماره ۴ افزایش و با خرده لاستیک با سایز الک $\frac{3}{8}$ کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش PFWD نشان داد مقدار افزایش مدول الاستیسیته به ترتیب ۳/۲، ۱۰/۱ و ۱۲ درصد افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره ۴ شده است و این افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ به ترتیب ۵/۸، ۱۸/۴ و ۲۴/۹ درصد بوده است که افزایش این پارامتر در خاک لایه اساس سبب کاهش خرابی‌های شیارشدگی و ترک‌های پوست‌سوسماری شده و یا از شدت این نوع خرابی‌ها می‌کاهد. با توجه به آزمایش بارگذاری استاتسکی می‌توان گفت با اضافه کردن خرده لاستیک ظرفیت باربری کاهش پیدا کرده است و این کاهش ارتباط مستقیم با مقدار و سایز خرده لاستیک جایگزین شده دارد. به‌طوریکه با افزایش درصد خرده لاستیک ظرفیت باربری کمتر شده و با افزایش سایز نیز همین روند قابل مشاهده است.

کلمات کلیدی: خرده لاستیک، لایه اساس، CBR، PFWD، بارگذاری استاتیکی

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۱-۱- تعریف مسئله.....	۲
۲-۱- کاربرد لاستیک فرسوده.....	۳
۱-۲-۱- کاربرد در کفپوش ورزشی.....	۳
۲-۲-۱- در ساخت انواع عایق‌ها.....	۴
۱-۲-۲-۱- عایق صوتی.....	۴
۲-۲-۲-۱- عایق حرارتی.....	۴
۳-۲-۲-۱- عایق‌های صدایی دیوارهای مشترک و کف.....	۵
۳-۲-۱- انواع لرزه گیرهای پلیمری.....	۵
۴-۲-۱- استفاده در مهندسی.....	۶
۳-۱- اثرات منفی ضایعات لاستیک بر محیط زیست.....	۶
۴-۱- شرح مسئله.....	۷
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۷
۶-۱- نوآوری در تحقیق.....	۱۰
۷-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۱۱
۱۳	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۱-۲- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- معرفی خرده لاستیک و پودر لاستیک.....	۱۴
۳-۲- استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک در بتن و آسفالت.....	۱۵
۱-۳-۲- تأثیر ضایعات لاستیک بر قیر و آسفالت.....	۱۶
2-3-2- تأثیر ضایعات لاستیک در بتن.....	۱۹
4-2- استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک در بهسازی خاک.....	۲۰
۱-۴-۲- تأثیر ضایعات لاستیک در خاک‌ها.....	۲۱
۵۵	فصل ۳: روش تحقیق
۱-۳- مقدمه.....	۵۶
۲-۳- معرفی مصالح مورد استفاده و موضوع تحقیق.....	۵۸
۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها.....	۵۹
۴-۳- معرفی دستگاه‌ها و آزمایش‌های انجام شده.....	۶۱
۱-۴-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت دانه.....	۶۲

۶۳.....	3-4-2 - آزمایش تعیین وزن مخصوص خرده لاستیک
۶۴.....	۳-۴-۳ - آزمایش دانه بندی
۶۴.....	۴-۴-۳ - آزمایش تراکم
۶۵.....	۵-۴-۳ - آزمایش لس آنجلس
۶۶.....	۶-۴-۳ - آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)
۶۹.....	3-4-7 - آزمایش بارگذاری استاتیکی
۶۹.....	۱-۷-۴-۳ - محفظه مورد استفاده
۶۹.....	۲-۷-۴-۳ - سیستم بارگذاری و سنسورها (LVDT):
۷۰.....	۳-۷-۴-۳ - سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده ها:
۷۱.....	3-4-8 - آزمایش PFWD
۷۴.....	۵-۳ - نامگذاری آزمایش ها و علائم اختصاری

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها ۷۷

۷۸.....	۱-۴ - مقدمه
۷۸.....	۲-۴ - تعریف آزمایش دانه بندی
۷۹.....	۳-۴ - نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت دانه
۷۹.....	۴-۴ - نتایج آزمایش تراکم با درصد های مختلف خرده لاستیک
۸۱.....	۵-۴ - نتایج آزمایش لس آنجلس
۸۱.....	۶-۴ - نتایج حاصل از آزمایش CBR
۸۱.....	۱-۶-۴ - نتایج آزمایش CBR در حالت خشک
۸۳.....	۲-۶-۴ - نتایج آزمایش CBR در حالت اشباع
۸۵.....	۷-۴ - نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی
۸۶.....	۱-۷-۴ - نتایج آزمایش بار-نشست حاصل از بارگذاری استاتیکی
۸۷.....	4-2-7 - نتایج تغییر شکل در نقاط مختلف خاک با استفاده از LVDT
۹۰.....	۳-۷-۴ - مشاهده تغییر شکلهای سطح خاک در زمانهای متفاوت
۹۳.....	۸-۴ - نتایج آزمایش PFWD
۹۵.....	۹-۴ - بررسی و تحلیل نتایج
۹۵.....	۱-۹-۴ - اثر خرده لاستیک بر وزن مخصوص خشک اساس
۹۵.....	۲-۹-۴ - اثر خرده لاستیک بر درصد رطوبت بهینه اساس
۹۶.....	۳-۹-۴ - اثر خرده لاستیک بر CBR اساس
۹۷.....	۴-۹-۴ - اثر خرده لاستیک بر PFWD لایه اساس
۹۸.....	۵-۹-۴ - اثر خرده لاستیک بر ظرفیت باربری لایه اساس

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها ۹۹

۵-۱- مقدمه ۱۰۰

۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۰

۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده ۱۰۱

مراجع ۱۰۳

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) انباشت لاستیک های ضایعاتی در محیط زیست ۹
- شکل (۲-۱) آتش سوزی مرکز انباشت لاستیک در شهر تریسی ۱۰
- شکل (۱-۲) اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در بتن ۱۴
- شکل (۲-۲) مقایسه مقاومت مارشال آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2] ۱۷
- شکل (۳-۲) مقایسه مدول برجهندگی آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2] ۱۸
- شکل (۴-۲) مقایسه کشش غیر مستقیم آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2] ۱۸
- شکل (۵-۲) مقایسه عمق شیار آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2] ۱۸
- شکل (۶-۲) در صد هوای موجود به ازای درصد های مختلف خرده لاستیک [3] ۱۹
- شکل (۷-۲) مقایسه زمان گیرش اولیه و نهایی به ازای درصد های مختلف خرده لاستیک [3] ۲۰
- شکل (۸-۲) تأثیر خرده لاستیک با سایز و درصد متفاوت در حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه [4] ۲۲
- شکل (۹-۲) تأثیر خرده لاستیک با سایز و درصد متفاوت در مقاومت فشاری محصور نشده [4] ۲۳
- شکل (۱۰-۲) تأثیر خرده لاستیک در میزان کرنش [4] ۲۴
- شکل (۱۱-۲) تصویر رفتار نمونه ها در انتهای آزمایش [5] ۲۵
- شکل (۱۲-۲) تأثیر خرده لاستیک در کرنش محوری به تغییرات حجم و تنش انحرافی [5] ۲۶
- شکل (۱۳-۲) تأثیر خرده لاستیک در کرنش محوری به تغییرات حجم و تنش انحرافی [5] ۲۷
- شکل (۱۴-۲) حداکثر مقاومت برشی با چگالی بهینه ۲۷
- شکل (۱۵-۲) تأثیر جهتگیری در رفتار نمونه ها ۲۸
- شکل (۱۶-۲) مقادیر نفوذپذیری در فشار نرمال [6] ۲۹
- شکل (۱۷-۲) تنش برشی - جابجایی افقی [6] ۳۰
- شکل (۱۸-۲) تنش برشی - جابجایی افقی [6] ۳۱
- شکل (۱۹-۲) تأثیر درصد های مختلف خرده لاستیک در تنش برشی [6] ۳۲
- شکل (۲۰-۲) تأثیر درصد های مختلف در چسبندگی وزاویه اصطکاک داخلی [6] ۳۲
- شکل (۲۱-۲) تأثیر درصد های مختلف خرده لاستیک در حداکثر وزن مخصوص خشک [6] ۳۳
- شکل (۲۲-۲) تنش های برشی به وجود آمده در خاک [7] ۳۴
- شکل (۲۳-۲) نمودار بار - نشست با درصد های متفاوت خرده لاستیک [7] ۳۵
- شکل (۲۴-۲) مقادیر BCR در درصد های متفاوت خرده لاستیک [7] ۳۶

شکل (۲-۲۵) نمودار تنش برشی - تنش نرمال، تنش برشی - جابجایی افقی، جابجایی افقی - جابجایی قائم برای نسبت‌های مختلف [8].....	۳۷
شکل (۲-۲۶) نمودار تنش برشی - تنش نرمال، تنش برشی - جابجایی افقی، جابجایی افقی - جابجایی قائم برای نسبت‌های مختلف [8].....	۳۹
شکل (۲-۲۷) تغییرات زاویه اصطکاک در درصد‌های مختلف خرده لاستیک [8].....	۳۹
شکل (۲-۲۸) حداقل و حداکثر وزن مخصوص مخلوط را با درصد‌های وزنی متفاوت خرده لاستیک [9].....	۴۰
شکل (۲-۲۹) نمودار تنش برشی - جابجایی افقی با دو درصد تراکم ۵۰ و ۹۰ درصد [9].....	۴۱
شکل (۲-۳۰) تأثیر تراکم نسبی و تنش نرمال در درصد‌های مختلف خرده لاستیک [9].....	۴۲
شکل (۲-۳۱) زاویه اصطکاک داخلی مخلوط با درصد تراکم‌های مختلف براساس درصد‌های مختلف لاستیک [9].....	۴۲
شکل (۲-۳۲) نسبت تخلخل با درصد‌های مختلف خرده لاستیک و تراکم‌های متفاوت [9].....	۴۳
شکل (۲-۳۳) سختی با کرنش برشی برای نمونه‌ها با درصد لاستیک و تراکم نسبی مختلف [9].....	۴۳
شکل (۲-۳۴) تغییرات مدول برشی با درصد‌های مختلف لاستیک با تراکم‌های مختلف و تنش نرمال متفاوت [9].....	۴۴
شکل (۲-۳۵) تغییرات جابجایی افقی - جابجایی قائم برای درصد‌های مختلف لاستیک [9].....	۴۴
شکل (۲-۳۶) مقدار رطوبت بهینه بر اثر پودر لاستیک [11].....	۴۷
شکل (۲-۳۷) نمودار تنش قائم و نفوذ پیستون با درصد‌های مختلف پودر لاستیک [11].....	۴۸
شکل (۲-۳۸) تفاوت مقدار CBR با اضافه کردن پودر لاستیک [11].....	۴۸
شکل (۲-۳۹) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12].....	۵۱
شکل (۲-۴۰) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12].....	۵۱
شکل (۲-۴۱) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12].....	۵۱
شکل (۳-۱) تصویر لایه‌های مورد استفاده در جاده	۵۷
شکل (۳-۲) آزمایش تعیین وزن مخصوص خرده لاستیک.....	۶۳
شکل (۳-۳) آزمایش تراکم اصلاح شده.....	۶۵
شکل (۳-۴) دستگاه آزمایش CBR.....	۶۷
شکل (۳-۵) فرآیند اشباع سازی نمونه‌ها جهت آزمایش CBR.....	۶۸
شکل (۳-۶) مراحل بارگذاری استاتیکی و محل قرارگیری LVDT.....	۷۱
شکل (۳-۷) دستگاه PFWD نمونه مورد آزمایش.....	۷۲

شکل (۴-۱) دانه بندی انتخاب شده برای نمونه‌ها.....	۷۸
شکل (۴-۲) درصد وزنی مانده روی هر الک.....	۷۹
شکل (۴-۳) مقایسه حداکثر وزن مخصوص خشک با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک 3/8 و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک.....	۸۰
شکل (۴-۴) مقایسه درصد رطوبت بهینه با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک 3/8 و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک.....	۸۰
شکل (۴-۵) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR خشک با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴.....	۸۲
شکل (۴-۶) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR خشک با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک شماره 3/8.....	۸۳
شکل (۴-۷) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR اشباع با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) الک شماره ۴.....	۸۴
شکل (۴-۸) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR اشباع با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک شماره 3/8.....	۸۵
شکل (۴-۹) نمودار بار-نشست بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴.....	۸۶
شکل (۴-۱۰) نمودار بار-نشست بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره 3/8.....	۸۶
شکل (۴-۱۱) نمودار بار-نشست بادرصدهای مختلف خرده لاستیک برای هردو ساینز.....	۸۷
شکل (۴-۱۲) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴.....	۸۸
شکل (۴-۱۳) مقایسه شیب نمودارها (سرعت برگشت خاک) از لحظه تورم.....	۸۸
شکل (۴-۱۴) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره 3/8.....	۸۹
شکل (۴-۱۵) مقایسه شیب نمودارها (سرعت برگشت خاک) از لحظه تورم.....	۸۹
شکل (۴-۱۶) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT بادرصدهای مختلف خرده لاستیک برای هردو ساینز.....	۹۰
شکل (۴-۱۷) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۳/۵ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره ۴.....	۹۱

شکل (۴-۱۸) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۱۲/۵ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک	شماره ۴.....	۹۱
شکل (۴-۱۹) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۲۰/۸ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک	شماره ۴.....	۹۲
شکل (۴-۲۰) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۳/۸ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک	شماره ۳/۸.....	۹۲
شکل (۴-۲۱) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۱۲/۵ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک	شماره ۳/۸.....	۹۳
شکل (۴-۲۲) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۲۰/۸ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک	شماره ۳/۸.....	۹۳
شکل (۴-۲۳) ضریب عکس العمل خاک بستر با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک ۳/۸ و با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک		۹۴
شکل (۴-۲۴) مدول الاستیسیته با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک ۳/۸ و با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک		۹۴

فهرست جداول

جدول (۱-۲) مشخصات قیر مورد استفاده.....	۱۶
جدول (۲-۲) مشخصات سنگدانه ها.....	۱۷
جدول (۳-۲) مقدار چگالی و درصد رطوبت بهینه در درصد های مختلف خرده لاستیک.....	۴۷
جدول (۴-۲) لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه استفاده از خرده لاستیک.....	۵۲
جدول (۱-۳) دانه بندی مصالح اساس.....	۵۸
جدول (۲-۳) مقدار مصالح مورد نیاز برای هر آزمایش تراکم و CBR.....	۶۱
جدول (۳-۳) مقدار مصالح مورد نیاز برای هر آزمایش PFWD و بارگذاری استاتیکی.....	۶۱
جدول (۴-۳) مشخصات آزمایش تراکم اصلاح شده.....	۶۴
جدول (۵-۳) میزان وزن در آزمایش لس آنجلس.....	۶۶
جدول (۱-۴) نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص.....	۷۹
جدول (۲-۴) مقادیر CBR خشک بازای درصد های مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۸۲.۴	۸۲.۴
جدول (۳-۴) مقادیر CBR خشک بازای درصد های مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره 3/8	۸۳
جدول (۴-۴) مقادیر CBR اشباع بازای درصد های مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴.....	۸۴
جدول (۵-۴) مقادیر CBR بازای درصد های مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره 3/8.....	۸۵

فصل ۱:

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

لاستیک‌های فرسوده خودرو یکی از مهم‌ترین انواع پسماندها یا مواد زائد جامد به شمار می‌روند. لاستیک‌های ساییده و خراب امروزه باعث یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های محیط‌زیست شده‌اند، زیرا خارج شدن آنها از چرخه تولید و مصرف، به معنای آغاز یک تعهد محیط‌زیستی است. با این‌که طول عمر لاستیک‌های ماشین نسبت به گذشته بیشتر شده، اما این واقعیت نیز غیرقابل‌انکار است که جاده‌های کشورهای امروزه تحت سیطره تعداد بیشتری خودرو قرار دارند.

بخشی از این خطر به واسطه استفاده از انواع مواد شیمیایی سمی است که در فرآیند تولید لاستیک به کار می‌رود. در مجموع مواد سمی که از تجزیه و سوزاندن لاستیک‌ها در کوره‌های زباله‌سوز یا آتش‌سوزی‌های تصادفی حاصل می‌شود، می‌تواند براحتی باعث آلودگی خاک، آب و هوا شود.

مدیریت مواد زائد جامد یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌های زیست محیطی در سراسر جهان است. معضل افزایش روزافزون ضایعات پلیمری در محیط زیست نیاز به سرمایه‌گذاری وسیعی دارد چرا که ضایعات پلیمری برای تجزیه به زمان طولانی نیازمند است. اصولاً تایرهای فرسوده به روش غیر کنترل شده اشباع می‌شوند که احتمال وقوع آتش‌سوزی را فراهم می‌کند و تأثیرات منفی در اتمسفر و سلامت بشر دارد بنابراین لازم است برای بازیافت و استفاده بهینه از لاستیک‌های فرسوده تدابیر کارشناسی لازم در نظر گرفته شود از این رو مهندسان سعی در بازیافت و استفاده دوباره از این تایرها در زمینه‌های گوناگون دارند.

روش‌های بازیافت لاستیک به دو شاخه مکانیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش مکانیکی لاستیک تایر به تکه‌های کوچکتر تقسیم می‌شوند. این کار در چند مرحله و توسط دستگاه‌های خردکن و آسیاب انجام می‌شوند. هر مرحله از این روش محصولات متفاوتی تولید می‌کند که در صنایع مختلف کاربرد دارد. برخی صنایع از گرانول‌های درشت استفاده کرده و برخی دیگر به پودر بسیار نرم لاستیک احتیاج دارند. در روش شیمیایی یا تایر سوزانده می‌شوند و از ذغال و سیم‌های فلزی باقی‌مانده استفاده می‌شود یا تایر پیرولیز می‌شود. در روش پیرولیز تایر در خلاء سوزانده می‌شود. در این روش محصولاتی مانند سوخت (سوختی مانند گازوئیل)، روغن و غیره استخراج می‌گردد. محصولات بازیافتی تایر بسته به بازیافت مکانیکی یا شیمیایی متفاوت هستند ولی به صورت کلی به محصولات زیر می‌توان اشاره کرد:

- گرانول لاستیک
- پودر لاستیک
- فلز بازیافتی
- لاستیک احیاء شده یا reclaimed rubber
- آسفالت و قیر پلیمری
- سوخت گازوئیلی
- باتری خودرو

۱-۲- کاربرد لاستیک فرسوده

لاستیک‌های فرسوده در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله استفاده‌های آن میتوان به کاربرد در کفپوش ورزشی، در ساخت عایق‌ها، انواع لرزه‌گیرهای پلیمری و استفاده در مهندسی عمران نام برد که در زیر توضیح داده شده است.

۱-۲-۱- کاربرد در کفپوش ورزشی

زمین‌های بازی و سالنهای ورزشی با پوشش دائم از گرانول لاستیکی پوشیده می‌شوند و زمین دو و میدانی بسیاری از استادیوم‌ها، پوشیده از مواد بازیافتی است. سطح ایجاد شده از محلول یورتان و لاستیک خرده، مانند سطوح ملاتریزی شده دیگر است، با این تفاوت که به نحو چشمگیری از آسیب دیدگی‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین لاستیک خرد شده به صورت بسیار ریز برای پوشش زمین زراعی، ورزشی و بازی بکار می‌رود. در زمین‌های بازی این پوشش می‌تواند محافظت بیشتری نسبت به چوب، سنگ ریزه و دیگر پوشش‌های متداول داشته باشد.

۱-۲-۲- در ساخت انواع عایق‌ها

لاستیک ضایعاتی در ساخت انواع عایق‌ها کاربرد دارد که از جمله می‌توان به عایق صوتی، عایق حرارتی و عایق‌های صدایی دیوارهای مشترک و کف بیان کرد که در ادامه به توضیح آنها پرداخته شده است.

۱-۲-۲-۱- عایق صوتی

ابزار و تجهیزات دقیق اندازه‌گیری و ابزارهای آزمایشگاهی در ارتعاش‌های بسیار پایین آسیب پذیرند و باید درجه عایق بندی مناسبی برای آنها فراهم کرد. این کار به وسیله عایق‌های صوتی متنوع انجام می‌پذیرد. وظیفه اصلی به لرزه‌گیر یا عایق کننده ارتعاش عبارت است از:

- ۱- کاهش قابلیت انتقال
- ۲- داشتن میرایی مناسب برای جذب انرژی
- ۳- انعطاف پذیری و داشتن الاستیسیته مناسب
- ۴- صلبیت و سختی به منظور تحمل بار استاتیکی سیستم

۱-۲-۲-۲- عایق حرارتی

ضایعات لاستیکی مناسب عایق‌کاری، شامل فوم پلی اورتان و کالاهای پلاستیکی است. به طور کلی تمام مواد غیرهادی که حاوی مقدار زیادی هوا هستند، می‌توانند به عنوان عایق حرارتی استفاده شوند؛ اما برای استفاده در دیوارها و داخل ساختمان‌ها نباید این مواد، تخریب کننده محیط زیست و جذب آب باشد. مواد عایق استفاده شده در سقف داخلی باید خیلی تمیز باشند، زیرا در اثر گرم شدن می‌تواند محل تجمع حشرات باشد. استفاده از عایق‌های حرارتی در مناطق سردسیر باعث کاهش استفاده از وسایل گرمایی می‌شود. عایق‌های وارداتی گران است در حالی که پلاستیک ضایعاتی مثل بطری‌ها و کیسه‌های خرید به وفور یافت می‌شوند. اینگونه مواد پلاستیکی دورریز را می‌توان به عنوان عایق حرارتی در زیر سقف و در زیر پی و در داخل دیوارها قرار داد. دو گروه عمومی ضایعات پلاستیکی را بطری‌های پلاستیکی و فویل‌های پلاستیکی تشکیل می‌دهند. بطری‌ها چون حاوی هوا هستند

می‌توانند مستقیماً به عنوان عایق حرارتی استفاده شوند. در صنعت، استفاده از ضایعات پلاستیکی می‌تواند جنبه سه منظوره حرارتی، صوتی و رطوبتی داشته باشد. ورق‌هایی که در کف و دیواره خودرو و صنعت ریلی استفاده می‌شود که از کلیه جنبه‌های یاد شده برخوردار هستند.

۱-۲-۳- عایق‌های صدایی دیوارهای مشترک و کف

محصولات لاستیکی و پلاستیکی می‌تواند آلودگی صوتی و ارتعاش‌های موجود در ساختمان‌ها را به دو روش کاهش دهند. روش اول شامل استفاده از مقدار کمی محصول تخصصی برای کاهش صدای یک منبع خاص است، مانند استفاده از سکوی ضد ارتعاش در زیر ماشین آلات ارتعاش‌کننده؛ روش دوم استفاده از محصولات لاستیکی و پلاستیکی است که به طور کلی کنترل‌کننده صدا است. بهترین مثال آن انتقال صدا از طریق دیوارها و کف اتاق است. برای کنترل صدا مطابق با اصول ساختمان، عایق باید دارای جرم کافی باشد به عبارت دیگر دانسیته ویژه سطح باید $536 \frac{kg}{cm^3}$ باشد. در مورد حتی کوچکترین اشتباه در ساخت، باعث انتقال صدای زیادی است. عایق کاری با کار گذاشتن یک پانل سبک وزن روی یک هسته جامد بنایی بدست می‌آید. میزان دقیق بهبود عایق کاری، به روش کار گذاشتن عایق دوم روی ساختار اصلی بستگی دارد. از این رو نیاز به محاسبه کارشناسی برای اجرای آن است.

۱-۲-۳- انواع لرزه‌گیرهای پلیمری

لرزه‌گیرهای پلیمری شامل کفپوش‌ها و ضربه‌گیرها، لرزه‌گیرهای اتصالی و پایه‌های مرکب هستند. از این بین لرزه‌گیرهای اتصالی معمولاً برای ایزولاسیون خطوط لوله در سیستم‌های تأسیسات به کار می‌روند. لرزه‌گیرهای اتصالی از نوع لاستیکی معمولاً به دلیل ساختار مناسبی که دارند قادر به استهلاک تنش‌های زیاد، جذب شوک و ضربه، تعدیل نیروهای فشاری، پیچشی، خمشی در مسیر خطوط انتقال سیال هستند.

لرزه‌گیرهای پلیمری به منظور ایزوله کردن پایه‌ها و پل‌ها طراحی می‌شوند. این عایق‌ها به دلیل جلوگیری از خسارات مالی و جانی زیادی که زلزله‌ها به بار می‌آورند، از اهمیت زیادی برخوردار

هستند و باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

- ۱- حداقل انتقال نیروهای برشی به سازه
- ۲- کاهش نیروهای سازه در فرکانس ارتعاش
- ۳- کاهش تغییر مکان سازه
- ۴- توانایی بازگشت به حالت اولیه پس از اتمام زلزله
- ۵- توانایی حمل وزن ساختمان در حالت استاتیکی و هنگام وارد شدن نیروی شدید

۱-۲-۴- استفاده در مهندسی

لاستیک‌های فرسوده به دلیل ویژگی‌های خود، در دهه‌های گذشته به عنوان یک ماده افزودنی یا جایگزین در بخش‌های مختلف مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آنها می‌توان به کاربرد آن در انواع خاک‌ها، مخلوط‌های سیمانی، مخلوط‌های آسفالتی و غیره اشاره کرد. در فصل دو شرح کامل‌تری از استفاده این ماده در مهندسی عمران بیان خواهد شد.

۱-۳- اثرات منفی ضایعات لاستیک بر محیط زیست

لاستیک‌های فرسوده به مانند بسیاری از زباله‌های دیگر تأثیرات مخرب بدی بر محیط زیست وارد می‌کنند. به عنوان مثال انبار کردن این زباله‌ها همواره مخاطره آمیز می‌باشد. در دهه‌ی اخیر، ۵۴ مورد آتش سوزی انبار لاستیک در آمریکا و کانادا ثبت شده است. ضایعات لاستیک در صورت آتش سوزی، دود غلیظ سیاهی را وارد هوا خواهند کرد که گاهی تا ساعت‌ها ادامه دارد. طی این فرآیند، مخلوطی از ذرات فوق العاده ریز و سمی وارد جو خواهد شد. استرین، بوتادین، روغن‌های حاوی بنزن و کلرین از جمله ترکیبات سمی است که از این طریق آزاد خواهد شد. حتی روغن‌های موجود در پلاستیک نیز حاوی فلزات سنگینی از جمله سرب، کروم، کادمیوم و جیوه است. آتش سوزی حتی می‌تواند فلزات سمی هم چون کرومیوم، آرسنیک، روی، باریوم، کبالت، مس، آهن، آلومینیوم، منگنز و وانادیوم را با توجه به میزان به کار رفته وارد محیط کند. در مجموع آلاینده‌های ارگانیکی که همراه ذرات ریز حاصل از سوختن لاستیک حمل می‌شوند، نه تنها می‌توانند مشکلات تنفسی از جمله آسم و حتی بیماری‌های قلبی را

تشدید کنند، بلکه قابلیت آلوده کردن شیر مادر را نیز دارند.

از طرف دیگر لاستیک‌های دفن‌شده در محیط مشکل‌زا هستند چون فشرده نمی‌شوند و در نتیجه مکان زیادی را اشغال می‌کنند. از سوی دیگر حضور آن‌ها می‌تواند مأوایی مطمئن برای رشد و تکثیر انواع جوندگان و حشرات موذی باشد. حشرات ناقل بیماری‌هایی از جمله انسفالیت یا ورم مغز و تب استخوان‌شکن، می‌توانند به راحتی در چنین زیستگاه مناسبی تکثیر و پرورش پیدا کنند. در مراکز دفن بهداشتی، به دلیل رعایت اصول اولیه از بروز چنین مواردی جلوگیری می‌شود، اما در اماکنی که کنترل‌شده نیستند، بروز چنین فجایی دور از انتظار نخواهد بود.

۴-۱- شرح مسئله

فراوانی لاستیک‌های فرسوده از یک سو و تأثیرات منفی آن از سوی دیگر باعث شده است که در دهه‌های اخیر این ماده صنعتی در سایر صنایع مورد استفاده قرار گیرد. مهندسی عمران یکی از صنایعی است که به سبب ویژگی‌های مثبت این ماده از آن به روش‌های مختلف در خود استفاده کرده است. در بخش روسازی از صنعت عمران، به وفور تأثیرات لاستیک در قشر آسفالتی در سال‌های اخیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پایان‌نامه سعی شده است تا راه حلی دیگر جهت ارزیابی لاستیک، مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی در این پایان‌نامه افزودن لاستیک در لایه اساس راه به عنوان جایگزین بخشی از دانه‌بندی لایه اساس مورد بررسی قرار گرفته است و جهت ارزیابی و بررسی تأثیرات این جایگزینی آزمایش‌اتی نظیر -نسبت -باربری کالیفرنیا-^۱ (CBR)،^۲ PFWD و سایر آزمایشات لازم جهت بررسی خصوصیات لایه اساس و سنگ‌دانه‌ها به انجام رسیده است.

۵-۱- ضرورت انجام تحقیق

همواره مواد زائد جامد به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی محیط زیست مورد توجه بوده و با توجه به افزایش رو به رشد جمعیت و تولید بیشتر و متنوع‌تر زباله‌ها، مدیریت مواد زائد، از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به اختصاص بودجه‌های کلان برای اجرای برنامه‌های مدیریت مواد زائد جامد

در مراحل تولید، نگهداری، جمع آوری، حمل و نقل، دفع نهایی و اهمیت حفظ محیط زیست از اثرات مخرب زباله ها بویژه زباله های عفونی و خطرناک، ضرورت بررسی دقیق نحوه استفاده از بودجه های مذکور توسط مهندسين و اهل فن وجود دارد و همیشه سعی بر استفاده بهینه از امکانات، تجهیزات و بودجه در قالب طرحهای مهندسی و اقتصادی می باشد. برای رسیدن به این هدفها یکی اجرای برنامه هایی که منجر به کاهش تولید زباله می شود. دیگری توجه به مسئله بازیافت در محل تولید توسط تولید کنندگان زباله از جایگاه و اولویت اصلی برخوردار می باشد. امروزه در سطح جهان مدیریت مواد زائد جامد بدون توجه به این دو مسئله اساسی مطمئناً مدیریت موفق و کاملی نخواهد بود. به همین دلیل لازم است در کلیه طرحها و برنامه های مربوط به کنترل مواد زائد، دو مسئله کاهش تولید زباله و بازیافت مورد توجه قرار گیرد. موفقیت و رسیدن به اهداف مذکور در برنامه های مدیریت مواد زائد جامد بیشتر مستلزم اطلاع رسانی و آگاه سازی جامعه نسبت به اهمیت و ارزش بهداشتی و اقتصادی این گونه طرح هاست تا بتوان با جلب مشارکت و رضایتمندی آحاد جامعه، آن برنامه ها را هر چه بهتر به مرحله اجرا گذاشت. در این مقاله سعی شده در بحث مدیریت مواد زائد جامد، موضوع کاهش تولید زباله مورد توجه قرار گیرد. برای موفقیت در این رابطه ابتدا شناخت دقیق از زباله تولیدی ضروری است تا بتوانیم طرحهای مناسب و لازم را برای کاهش تولید زباله از طرق ایجاد تحول در فعالیت های بهره برداری، تغییر در نوع مواد اولیه و تغییر تولیدات و ... به اجرا گذاشت. در ادامه هم ارزش اقتصادی بازیافت و کاهش تولید زباله مورد بررسی قرار می گیرد.

بر طبق فرایندهای شیمیائی در مراکز دفن زباله گاز متان متصاعد می شود که پتانسیل بالای آتش سوزی دارد. چنین خطری، در اوهایو در تاریخ ۲۱ آگوست ۱۹۹۹ اتفاق افتاد. یکی از بزرگ ترین توده های تایر که متشکل از ۲۶ میلیون حلقه تایر بود و مساحتی بیش از ۱۴۰ جریب را اشغال کرده بود در مجموعه تایر kirby در غرب ناحیه وایندهات در آتش سوخت. آتش سوزی پنج روز به طول انجامید و توده سیاهی از دود برپا کرد که از فاصله شصت مایلی قابل مشاهده بود. از تایرهای در حال سوختن، روغنی خارج و وارد نهري در همان نزدیکی شد و سبب مرگ هزاران ماهی در "رودخانه سانداسکی" شد. طبق برآورد مقام های ایالت، پنج میلیون تایر در آتش سوخت. بیش از ۲۵۰ آتش نشان از ۲۱ حوزه آتش نشانی به فرونشاندن آتش پرداختند و در نهایت با ریختن خاک، موفق به مهار آن شدند.

بر اساس گزارش در Solid Waste Report، ۷۵۰ تن خاک بر روی آتش kibry به روغنی که از تایرهای در حال سوختن تراوش می شد، آلوده شد. اوهایو مبلغ ۸۳۷۰۰۰ دلار صرف جابجایی خاک و

پاک سازی آب آلوده کرد. تنها فایده آتش سوزی kibry این بود که موجب شد سازمان حفاظت از محیط زیست اوهایو و مجلس قانون گذاری ایالت اوهایو از سال ۱۹۹۶، تصویب نمود به ازای هر تائیری که فروخته می شود ۵۰ سنت بار مالیاتی قرار داده شود. همچنین نگهداری لاستیک در فضای باز مشکلاتی نظیر آتش سوزی، تجمع حشرات و حیوانات موذی و پخش شدن گازهای سمی می شود به طور مثال خاموش کردن ۷ میلیون تیر آتش گرفته در شهر تریسی ایالت کالیفرنیا دو سال به طول انجامید و در این مدت خاک و هوای منطقه به شدت مورد تاثیر قرار گرفت.

در سال های اخیر به دلیل کاهش منابع مورد نیاز بشر و افزایش مشکلات زیست محیطی ناشی از دفع مواد زائد، ایده استفاده مجدد از این مواد مانند لاستیک های فرسوده (که موادی تجزیه ناپذیر هم محسوب می شوند) مورد توجه اکثر محققین قرار گرفته است.

نظر به اینکه لاستیک ها را نمی توان به صورت کافی متراکم نمود. بدیهی است که توده های نگهداری لاستیک های فرسوده حجم زیادی از فضای مراکز دفن زباله را اشغال می کنند و این موضوع با توجه به افزایش بهای زمین در محدوده حومه شهرها یک معضل اقتصادی به شمار می رود. با جمع بندی موارد فوق و خصوصیات منحصر به فردی که لاستیک ها دارند می توان با استفاده مجدد از آنها به صرفه اقتصادی قابل توجهی دست یافت.



شکل (۱-۱) انباشت لاستیک های ضایعاتی در محیط زیست



شکل (۱-۲) آتش سوزی مرکز انباشت لاستیک در شهر تریسی

با توجه به موضوعات مطرح شده و همچنین اهمیت مقطعی از رده خارج کردن خودروهای فرسوده و با توجه به اینکه سوزاندن و یا دفن تایرها دارای آثار مخرب زیست محیطی است در میان تمام راه‌های مطرح شده برای رهایی از زباله‌های لاستیکی، مهمترین، سالم‌ترین و به صرفه‌ترین راه، بازیافت آن‌ها می‌باشد. زیرا نه تنها به محیط زیست لطمه‌ای وارد نمی‌کند، بلکه از مصرف بسیاری از منابع و سوخت‌های فسیلی جلوگیری می‌کند و باعث صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. علاوه بر آن تولید محصولات بازیافتی در ایران به دلیل ارزانی کارگر، آب و انرژی می‌تواند سود صد در صد داشته باشد.

۱-۶- نوآوری در تحقیق

یکی از بارزترین زمینه‌های استفاده از لاستیک فرسوده، استفاده از این ماده در اندازه و شکل‌های مختلف در مهندسی عمران است. لایه‌های روسازی راه یکی از مواردی است که در سال‌های اخیر از لاستیک فرسوده در آن استفاده شده است. در دهه‌های گذشته از این ماده در اندازه و شکل‌های مختلف در قشر آسفالتی استفاده شده و نتایج آن نشان‌دهنده تأثیرات مثبتی در قشر آسفالتی بوده است. در این پژوهش سعی شده از این زباله صنعتی به‌عنوان یک ماده جایگزین سنگ‌دانه‌های لایه‌ی اساس استفاده شود تا ضمن بررسی تأثیرات این جایگزینی، پنجره‌های دیگر جهت استفاده از این ماده در صنعت مورد بررسی

قرار گیرد. همچنین اثر آن بر طرح روسازی نیز بررسی می‌شود.

۷-۱- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به صورت زیر می‌باشند:

فصل اول: ارائه کلیات ضرورت انجام تحقیق، اهمیت موضوع و روش تحقیق پرداخته شده است.

فصل دوم: در این فصل به بررسی تاریخچه و ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک، تحقیقات انجام شده و نتایج بدست آمده در مورد خرده لاستیک پرداخته شده است.

فصل سوم: در این فصل شرحی از ویژگی‌های لایه اساس راه و معرفی آزمایشات صورت گرفته به همراه استانداردهای آزمایشات بیان شده است.

فصل چهارم: نتایج مربوط به بیان نتایج آزمایشات و بحث و بررسی آنها اختصاص داده شده است.

فصل پنجم: در این فصل به جمع‌بندی نتایج تحقیقات انجام گرفته در این پژوهش پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات بیشتر و جامع‌تر در بحث حاضر و دستگاه ساخته شده عنوان می‌گردد.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات فنی

۱-۲- مقدمه

همان گونه که در فصل اول به آن اشاره شد با توجه به حجم زیاد لاستیک های فرسوده در محیط و نرخ تولید روزافزون این ماده در دهه های اخیر هم زمان با پیشرفت صنعت، در سال های اخیر سعی شده است از این ماده در صنایع مختلف استفاده شود. مهندسی عمران یکی از صنایعی است که با توجه به ویژگی های خاص لاستیک از این ماده در آن استفاده می شود. به طور کلی در ادامه این فصل به کاربرد لاستیک در مهندسی عمران و مطالعات صورت گرفته در سه زمینه مخلوط سیمانی یا بتن، رویه آسفالتی و خاک پرداخته می شود.

۲-۲- معرفی خرده لاستیک و پودر لاستیک



شکل (۱-۲) اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در بتن

- ۱- ذرات لاستیک درشت دانه: برای جایگزینی به جای شن بکار می رود و اندازه ذرات آن بین ۹/۵ تا ۷۵ میلی متر می باشد.
- ۲- لاستیک به شکل الیاف: برای جایگزینی به جای شن بکار می رود به طوری که عرض و ضخامت آن حدود ۵ میلی متر و طول آن می تواند بین ۲۵ تا ۷۵ میلی متر باشد.
- ۳- ذرات لاستیک ریزدانه: برای جایگزینی به جای ریزدانه بکار می رود و دانه بندی آن بین ۰/۴۲۵ تا ۴/۷۵ میلی متر می باشد.

۴- پودر لاستیک: برای جایگزینی به جای فیلر به کار می‌رود و دانه‌بندی آن بین ۰/۰۷۵ تا ۰/۴۷۵ میلی‌متر می‌باشد.

در شکل ۱-۲ اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در بتن را ملاحظه می‌کنید.

۲-۳- استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک در بتن و آسفالت

در نیمه دوم قرن حاضر توسعه سریع صنعتی، منجر به گسترش وسیع راه‌های ارتباطی گردیده که نتیجه‌ی آن افزایش قابل توجه حجم ترافیک به همراه تمایل به سمت بارهای محوری سنگین بوده است. از این رو در بسیاری از کشورها، روند خرابی روسازی آسفالتی در مقابل عوامل مختلف، سرعت بیشتری را به خود گرفته است و از این بابت خساراتی نظیر کاهش عمر بهره‌برداری از روسازی و ایمنی استفاده‌کنندگان از راه و افزایش هزینه نگهداری، زمان سفر و مخارج استفاده‌کنندگان را منجر می‌شود. این مسئله باعث شده تا مواردی که منجر به افزایش دوام و کیفیت مطلوب روسازی می‌شود و از خرابی‌های زودرس در لایه‌های آسفالتی جلوگیری می‌نماید، مورد توجه پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت راه‌سازی قرار گیرد. از سوی دیگر ارتباط اساسی بین خواص و رفتار قیر با خواص و رفتار مخلوط‌های آسفالتی سبب شده که قیر به‌عنوان یک فاکتور اساسی و مؤثر در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، همواره مورد توجه کارشناسان باشد و یکی دیگر از استفاده‌های خرده لاستیک در مهندسی عمران، استفاده از این مواد به‌عنوان یک ماده افزودنی در مصالح بر پایه‌ی سیمان است. اگرچه بتن یک ماده محبوب و پر استفاده در مصالح ساختمانی است اما دارای نقطه ضعف‌هایی مانند مقاومت کششی پایین، جمع شدگی بتن، عمل‌آوری و سخت شدگی بتن، جذب انرژی کم و غیره می‌باشد. بکار بردن مواد ضایعاتی در بتن در کشورهای جهان سوم هنوز رونق نیافته‌است و رونق این امر نیازمند تشویق پیمانکاران و اجبارات دولتی است. استفاده از لاستیک‌ها فرسوده در بتن علاوه بر بهبود برخی خواص آن مانند مقاومت در برابر صوت، نفوذ یون کلر، سیکل‌های ذوب و یخ، سایش و غیره از یک سو سبب دفع زباله‌های زائد در محیط شده و از طرف دیگر با جایگزینی این ماده با بخشی از مواد موجود در بتن، موجب صرفه اقتصادی می‌شود.

۲-۳-۱- تأثیر ضایعات لاستیک بر قیر و آسفالت

آقاجانی و همکاران در سال ۱۳۹۰ در تحقیقی تاثیرات افزودن لاستیک به قیر را مورد بررسی قرار دادند. آن ها در تحقیق خود از قیر ۷۰-۶۰ AC استفاده نمودند که مشخصات آن در جدول ۲-۱ آمده است. آن ها در این تحقیق پودر لاستیک را با نسبت های ۶-۲۶ درصد به قیر افزودند و آزمایشات خود را به نفوذپذیری، نقطه نرمی و دمای PG محدود کردند. [1]

جدول (۲-۱) مشخصات قیر مورد استفاده [1]

نوع قیر	درجه نفوذ	نقطه نرمی (mm/°)	اگنمی (cm)	بازگشت پذیری الاستیک (%)
قیر ۶۰-۷۰	۶۴/۷	۵۰/۶	۱۰۰<	۱۷

نتایج حاصل از آزمایش های این محققان نشان داد که افزودن ۲۶ درصد پودر لاستیک به قیر سبب کاهش ۳۲ درصدی درجه نفوذ قیر می شود و نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک را به ترتیب ۴۰ و ۳۶۶ درصد افزایش می دهد.

در مرحله بعدی نتایج حاصل از آزمایشات صورت گرفته نشان داد که افزودن پودر لاستیک به قیر حساسیت حرارتی قیر را کاهش می دهد و نشان دهنده درجه نفوذ قیر از مقدار ۱/۱۶- برای نمونه کنترل به ۱/۹۸ برای نمونه حاوی ۲۶ درصد پودر لاستیک می شود.

آنها خاصیت اگنمی را نیز مورد بررسی قرار دادند. خاصیت اگنمی قیر را در سه درصد ۱۲ و ۲۰ و ۲۶ درصد افزودنی لاستیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که خاصیت اگنمی قیر برای نمونه های کنترل ۷۰ سانتی متر و برای نمونه های حاوی ۱۲ و ۲۰ و ۲۶ درصد پودر لاستیک به ترتیب برابر ۱۷/۵، ۱۴/۳ و ۱۲/۷ بدست آمده است. همچنین دمای فراس از مقدار ۱۱- برای نمونه کنترل به ۴۲- برای نمونه حاوی ۲۶ درصد پودر لاستیک کاهش یافت.

در ادامه آزمایش های نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک بعد از RTFO مورد بررسی قرار گرفت. قیرهای پیر شده در RTFO دارای نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک بیشتری از قیرهای پیر نشده با درصدهای پودر لاستیک یکسان هستند که این پدیده را می توان تصعید مواد فرار موجود در قیر و همچنین اختلاط بیشتر و بهتر پودر لاستیک و قیر با یکدیگر که مربوط به جذب بیشتر آروماتیک

و در نتیجه افزایش درصد آسفالتن در قیر و کاهش روغن ها نسبت داد. پودر لاستیک بخش روغن های سبک قیر را جذب می کند که سبب کاهش رادیکال های آزاد می شود. آنتی اکسیدانت ها و آنتی ازن های موجود در پودر لاستیک قابلیت اکسید نشدن قیر را بالا می برد. تحت حرارت قیر اکسید می شود و میزان آسفالتین آن افزایش می یابد. [1]

شاکری و همکاران در سال ۱۳۹۲ در تحقیقی به بررسی و مقایسه آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی پرداختند. آنها در این تحقیق از قیر AC-60/70 با وزن مخصوص ۱/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب، خاصیت انجمی برابر ۱۰۰ و درجه نفوذ معادل ۳۶ استفاده کردند و مشخصات سنگدانه های استفاده شده در جدول (۲-۲) آورده شده است. [2]

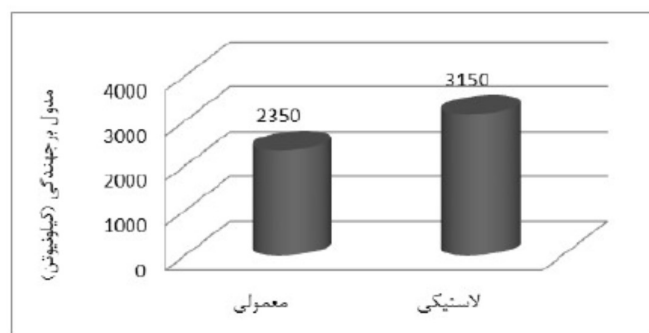
جدول (۲-۲) مشخصات سنگدانه ها [2]

سایش لسنجلس	ارزش ماسه ای	جذب آب	چگالی مصالح	مقاومت فشاری
%	%	%	$\frac{gr}{cm^3}$	$\frac{kg}{cm^2}$
۲۳	۶۳/۲	۰/۹۶	۲/۵۸	۴۰۰

نتایج حاصل از این آزمایش ها نشان داد که مقاومت مارشال آسفالت لاستیکی در حدود ۳ درصد از آسفالت معمولی بیشتر است که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده می باشد. نتایج حاصل از آزمایش های مدول برجهندگی که یک معیار مهم در تعیین ضخامت و طراحی لایه های روسازی است در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است در نمونه های دارای لاستیک افزایش ۳۴ درصدی در مدول برجهندگی وجود دارد.

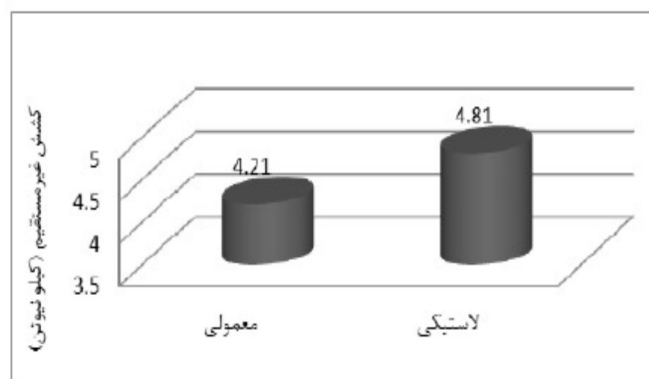


شکل (۲-۲) مقایسه مقاومت مارشال آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2]

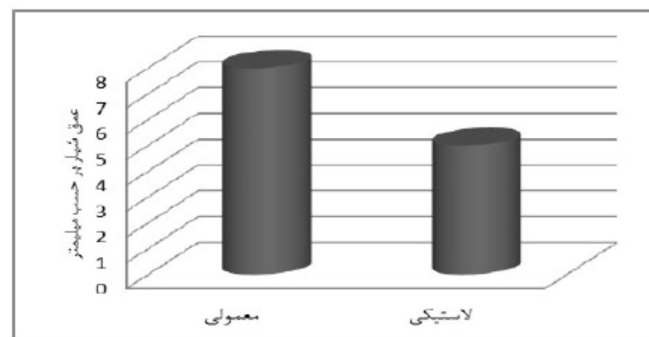


شکل (۳-۲) مقایسه مدول برجهدگی آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2]

در گام بعدی پژوهشگران با استفاده از آزمایش UTM مقدار کشش غیر مستقیم نمونه‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج حاصل از آزمایش‌های آنها همانطور که در شکل ۲-۴ مشخص است مقادیر ۴/۲۱ و ۴/۸۱ کیلو نیوتن به ترتیب برای آسفالت معمولی و لاستیکی است.



شکل (۴-۲) مقایسه کشش غیر مستقیم آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2]

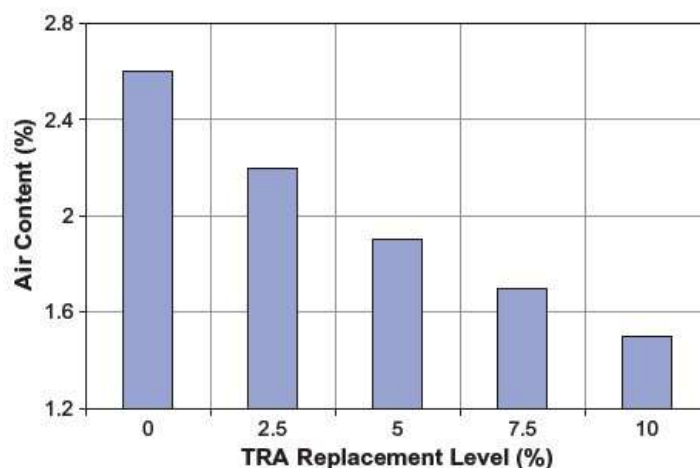


شکل (۵-۲) مقایسه عمق شیار آسفالت لاستیک با آسفالت معمولی [2]

در آخرین گام در این تحقیق پدیده شیار افتادگی در آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. آنها برای انجام این پژوهش بیش از ۸۰۰۰ بار چرخشی شبیه به چرخ خودرو را از روی نمونه های آسفالتی ساخته شده عبور دادند که نتایج حاصل آن در شکل ۲-۵ قابل مشاهده است و نشان از کاهش ۴۰ درصدی شیارشدگی نمونه آسفالت لاستیکی در مقایسه با آسفالت معمولی دارد. [2]

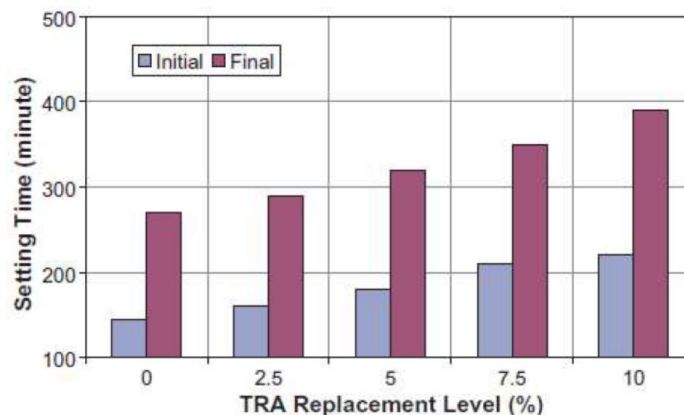
۲-۳-۲- تأثیر ضایعات لاستیک در بتن

اسمادی و همکاران در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی بر روی تأثیرات افزودن خاکستر لاستیک (TRA) به عنوان فیلر به ملات سیمانی انجام دادند. خاکستر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش از سوزاندن مقادیر عمده ای لاستیک در دمای ۸۵۰ درجه برای مدت ۷۲ ساعت بدست آمد. آنها TRA را با درصدهای ۵، ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزین ماسه موجود در سیمان کردند. [3] ابتدا پژوهشگران درصد هوای موجود در نمونه ها را باهم مقایسه کردند. که می توان نتایج حاصل از این آزمایش ها را در شکل ۲-۶ مشاهده کرد. نتایج نشان می دهد که به ترتیب به ازای ۵، ۲/۵، ۷/۵، ۱۰ درصد TRA به مخلوط درصد هوای موجود در نمونه ها به ترتیب ۱۵، ۲۷، ۳۷، ۴۰ درصد کاهش یافته است.



شکل (۲-۶) در صد هوای موجود به ازای درصدهای مختلف خرده لاستیک [3]

آزمایش‌های زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. که نتایج آن با در شـ ۲-۷ قابل ملاحظه است. نتایج حاصل از این آزمایش نشان از افزایش ۵۱ و ۴۴ درصدی - - - - - دی زمان گیرش نهایی و اولیه نمونه حاوی ۱۰ درصد TRA نسبت به نمونه کنترل است. در مرحله بعد تأثیرات افزودن خاکستر لاسـتیک بر فاکتور دوام و مدول دینامیکی الـسـتیسـیـتـه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزودن TRA سبب افزایش مدول دینامیکی و فاکتور دوام ملات سیمان می‌شود. [3]



شکل (۷-۲) مقایسه زمان گیرش اولیه و نهایی به ازای درصدهای مختلف خرده لاستیک [3]

۴-۲- استفاده از خرده لاستیک و پودر لاستیک در بهسازی خاک

اندیشه بهبود بخشیدن به خصوصیات مقاومتی خاک، به منظور به کارگیری گسترده‌تر آن به عنوان مصالح اصلی احداث بناهای گوناگون، سابقه‌ای چند هزارساله دارد. در این زمینه تحقیقات فراوانی انجام و روش‌های گوناگونی امتحان شده است، از جمله متراکم کردن خاک، تثبیت خاک با مواد سیمانی یا آهکی و تسلیح خاک با مواد مختلف. تعیین پارامترهای مقاومتی این مصالح برای تحلیل‌های پایداری و مقاومتی در ارزیابی‌های ژئوتکنیکی از جمله مسائلی است که در خصوص این مصالح و مخلوط‌های آن با خاک کمتر مورد توجه بوده است.

حل معضل افزایش روزافزون ضایعات پلیمری در محیط زیست نیاز به سرمایه‌گذاری وسیعی دارد چراکه ضایعات پلیمری برای تجزیه به زمان‌های طولانی نیازمند است. از این رو به عنوان راهکاری در برابر این معضل امروزه استفاده از پلیمر و پودرهای پلیمری جهت بهبود خواص مصالحی مانند بتن، خاک، آسفالت

و غیره در دنیا به شدت رو به افزایش است و تأثیر افزودن این پودرها بر بهبود خواص مصالح در حال پژوهش و بررسی می‌باشد. از سوی دیگر برخی از چنین ضایعاتی علاوه بر ایجاد مشکلات زیست محیطی، نیازمند مکان وسیعی برای دفع می‌باشد که از جمله آنها می‌توان به تایرهای فرسوده اشاره کرد. تسلیح خاک یکی از روشهای مؤثر و قابل اطمینان افزایش مقاومت و پایداری خاکها می‌باشد. این روش در حال حاضر در کاربری‌های متنوعی همچون سازه های حائل و خاکریزها تا پایداری سازه های زیراساس راهها و بستر پی ها بکار گرفته می‌شود. نوع مصالح تسلیح کننده می‌تواند از لحاظ مختلف بسیار گوناگون باشد؛ در شکل (نوارها، صفحه ها، شبکه ها، میله ها و الیاف)، بافت (زبر یا صاف) و سختی نسبی (بالا مثل فولاد یا پایین مثل الیاف پلیمری). دلایل استفاده از ضایعات تایرها در مسائل ژئوتکنیکی را میتوان به صورت زیر برشمرد :

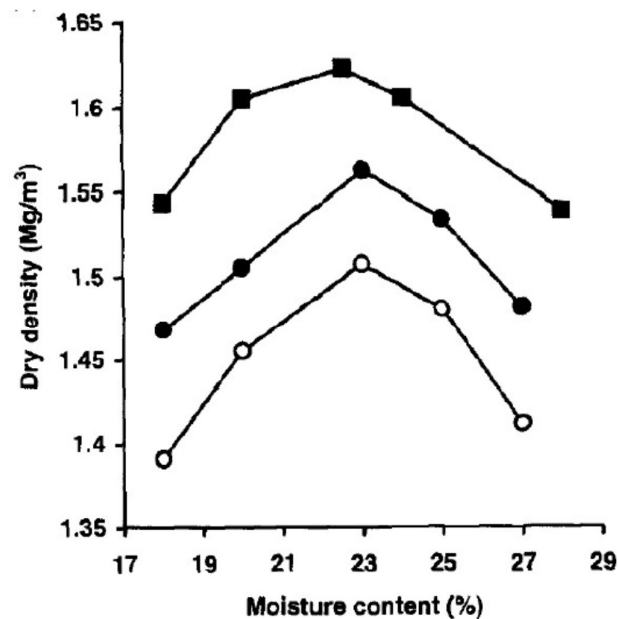
- ۱- این روش علاوه بر صرفه جویی در فضای اشغال شده توسط لاستیک های فرسوده، خطرات زیست محیطی و بهداشت عمومی را نیز کاهش میدهد.
- ۲- مصرف خاک طبیعی کاهش می‌یابد، این موضع بیشتر در احداث خاکریزها دارای اهمیت بسیار می‌باشد.
- ۳- خصوصیات گوناگون خاک نظیر ظرفیت باربری، مقاومت کششی، زهکشی و غیره بهبود بخشیده می‌شود.

۲-۴-۱- تأثیر ضایعات لاستیک در خاک ها

تابا و آراوینسن در سال ۱۹۹۸ مطالعاتی روی خاک رس پیش تحکیم یافته انجام شد. رس استفاده شده در این تحقیق یک رس طبیعی شکسته شده می باشد. تایرهای استفاده شده از ضایعات لاستیک با اندازه ۱ تا ۸ میلیمتر است که به دو دسته ۴-۱ میلیمتر و ۸-۴ میلیمتر تقسیم می شوند و با درصدهای وزنی ۶ تا ۱۵ درصد با رس مخلوط می شوند. خرده لاستیک با خاک رس خشک مخلوط شده و سپس آب به آن افزوده می‌شود تا درصد رطوبت بهینه بدست آید. با توجه به رطوبت طبیعی خاک و رس با رطوبت بهینه خشک نیاز به اضافه کردن آب جهت تسهیل در مخلوط دارد. جهت تراکم نمونه ساخته شده از خاک رس و مخلوط خاک رس و خرده لاستیک با استفاده از کمپرسور و ۱۰ ضربه در هر طرف نمونه انجام می‌شود. نمونه های فشرده شده از قطر ۳۸ میلیمتر تا ۷۶ میلیمتر ساخته شده و برای

مقاومت فشاری محصورنشده مورد آزمایش قرار گرفته است و برای اطمینان ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. نفوذپذیری با استفاده از روش جریان پمپ انجام شد استفاده از پمپ جریان سرعت فرآیند اشباع اولیه را افزایش می‌دهد و ظرف چند روز مقدار نفوذپذیری مورد نظر را فراهم کرد. نمونه ها با ۵ درصد رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه برای نفوذپذیری کم فشرده شدند. یک مبدل فشار منفذ در موقعیت ورودی فشار آب نفوذ جریان را اندازه‌گیری می‌کند و نفوذپذیری عمودی با استفاده از قانون داریسی محاسبه می‌شود.

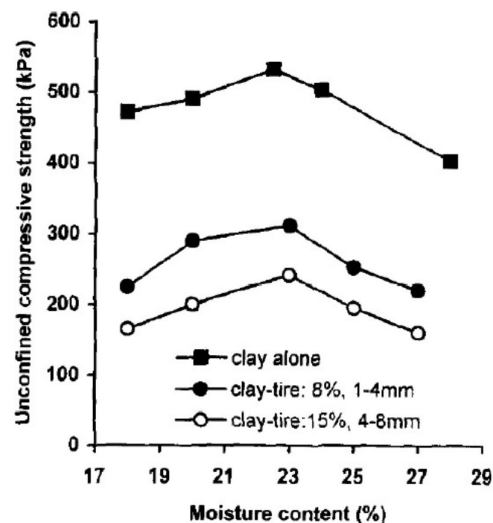
برای اندازه‌گیری نفوذپذیری از آب و آب اسیدی برای شبیه‌سازی شرایط زمین و پارافین استفاده می‌شود و در هر مورد ۳ نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرد که تغییراتی به میزان $\pm 3\%$ قابل ملاحظه بود که نشان دهنده ناهمگونی در فرآیند مخلوط بوده است. برای مقایسه ۳ رطوبت برای هر مخلوط که ۲٪ کمتر و ۵٪ بیشتر از رطوبت بهینه استفاده شد. رفتار تراکمی خاک به تنهایی و با ۸ و ۱۵ درصد خرده لاستیک با ابعاد ۴-۱ و ۸-۴ میلیمتر به ترتیب وزن مخصوص خشک و رطوبت های مختلف را نشان می‌دهد با توجه به شکل (۲-۸) می‌توان دریافت که وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد و درصد رطوبت بهینه برای ۳ حالت تقریباً مشابه است. [4]



شکل (۲-۸) تأثیر خرده لاستیک با سایز و درصد متفاوت در حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه [4]

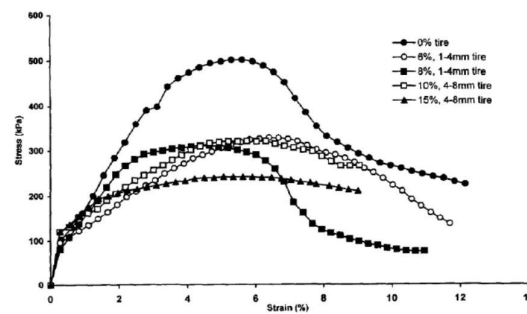
با توجه به وزن کمتر لاستیک نسبت به خاک کم شدن وزن مخصوص انتظار میرفت و این نشان می

دهد که لاستیک هیچ تأثیر مثبتی در تراکم خاک ندارد. ترک خوردگی در درصد رطوبت‌های پایین مشاهده شد و زمانی که رطوبت حداقل ۲ درصد بالاتر از درصد رطوبت بهینه بود به حداقل رسید. سپس برای نمونه‌های فشرده شده نتایج مقاومت محصورشدگی در شکل ۲-۹ آورده شده است؛ ارقام نشان می‌دهد که استفاده از خرده لاستیک کاهش قابل توجهی در مقدار UCS گذاشته است و با درصدهای لاستیک مختلف باز هم در یک درصد رطوبت بیشترین مقدار را تولید می‌کند.



شکل (۲-۹) تأثیر خرده لاستیک با سایز و درصد متفاوت در مقاومت فشاری محصور نشده [4]

کاهش UCS به دلیل استفاده از ذرات لاستیک است که با نتایج سایر افراد مطابقت دارد اما میزان کاهش آن بستگی به خاک مورد آزمایش دارد به طوری که به علت افزایش میزان رس میزان کاهش کمتر مشاهده شد. تأثیر لاستیک بر UCS نیز به شکل ذرات وابسته است. رفتار تنش-کرنش در طی آزمایشات UCS مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۲-۱۰ قابل ملاحظه است نتایج نشان می‌دهد که سختی آن به دلیل استفاده از لاستیک کاهش یافته است در واقع مقاومت آن کمتر شده اما دیگر گسیختگی ناگهانی اتفاق نمی‌افتد؛ مقدار کرنش در هنگام نشست تقریباً مشابه باقی ماند و همانطور که قابل پیش بینی بود حضور لاستیک باعث ایجاد دامنه طولانی مدت شده که بیشترین مقدار تنش را حفظ کند. با توجه به مشخص است که استفاده از خرده لاستیک ریزتر باعث گسیختگی در کرنش بیشتر می‌شود.



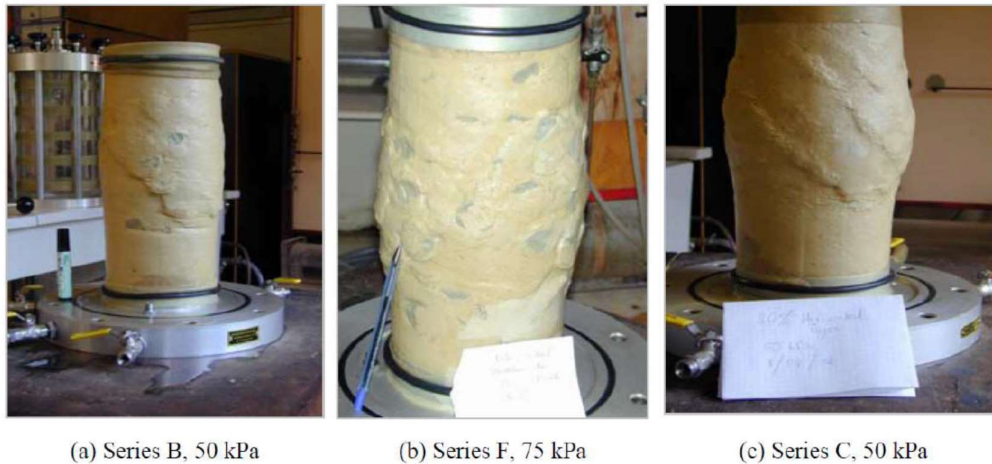
شکل (۲-۱۰) تأثیر خرده لاستیک در میزان کرنش [4]

مقدار نفوذپذیری با استفاده از ۳ پارامتر آب مقطر، آب اسیدی و پارافین اندازه‌گیری می‌شود. سه نفوذگر به طور همزمان بکار گرفته می‌شود تا نفوذپذیری اندازه‌گیری شده نمونه را بتوان به راحتی مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد نفوذپذیری مخلوط در مقایسه با رس به تنهایی افزایش می‌یابد. افزایش نفوذپذیری نشان‌دهنده این است که پیوند خوبی بین رس و خرده لاستیک برقرار نشده است. وقتی آب اسیدی در نمونه نفوذ کرد نفوذپذیری برای خاک رس و خاک رس مخلوط با خرده لاستیک کمی افزایش یافت. این به علت آن است که محیط اسیدی باعث انعطاف پذیری می‌شود و باعث می‌شود نفوذپذیری بیشتری تولید کند. زمانی که از پارافین به عنوان نفوذکننده استفاده شد نفوذپذیری بیش از ۱ واحد افزایش یافت. هنگامی که پارافین به نمونه‌هایی دارای خرده لاستیک نفوذ می‌کند نفوذپذیری نسبت به رس تنها کاهش می‌یابد. نفوذپذیری با پارافین در مقایسه با آب با استفاده از ۵٪ خرده لاستیک ۴-۸ میلیمتر بیش از ۵۰ برابر کاهش یافته است. روند مشاهده شده در رفتار نفوذپذیری با آنچه که توسط دیگران بدست آمده شبیه است در هنگام استفاده از بنزین به عنوان نفوذپذیر که در این صورت کاهش نفوذپذیری کائولین و رس‌های بنتونیت ۷ برابر آب با توجه به مقدارهای گزارش شده تنها مخلوط ۱۵٪ خرده لاستیک تحت نفوذپذیری پارافین کمتر از مقدار هدف است. [4]

گوتلند و همکاران در سال ۲۰۰۵ ویژگی‌های مقاومتی مخلوط خرده لاستیک و ماسه را مورد بررسی قرار دادند. خرده لاستیک در این تحقیق با استفاده از روش پانچینگ بدست آمد. مقادیر قطر و ضخامت تراشه‌های دایره‌ای به ترتیب ۱/۲۸ و ۱۰/۴ میلیمتر است. ضخامت آن‌ها متفاوت است و به شدت به تعداد لایه‌های فولادی بستگی دارد. وزن مخصوص تراشه‌های گرد بین ۱۱ تا ۱۵/۴ کیلو نیوتن بر متر مکعب بود و بسته به لایه‌های فولادی مقدار میانگین ۱۳/۳ است. ماسه این آزمایش از رودخانه سین با کلاس D فرانسه است. از آنجایی که ماسه خلیج است مهمترین ویژگی آن گردی دانه‌ها است، وزن

مخصوص آن ۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب و تمام ماسه مورد استفاده با الک ۵ میلیمتر الک شده است. [۵] چهار نوع ترتیب مختلف قطعات لاستیک مورد بررسی قرار گرفت که عبارت است از: افقی-عمودی متناوب، فقط افقی، فقط عمودی و بدون جهت می باشد. قطعات لاستیک قرار داده شده طوری انتخاب شده اند که لایه های فولادی را در ساختار آن در نظر نگیرند که خطر سوراخ شدن غشا را کاهش دهد. نمونه های H و V قطعات تایلر را به صورت افقی و عمودی قرار داده شده است و وزن مخصوص ماسه از 16/3 تا ۱۷ بسته تایلر در جهت گیری متفاوت است. به جز مورد ۵۰ درصد که 0/5 کیلونیوتن بر متر مکعب است از این رو تقریباً فشرده کردن مخلوط به راحتی غیر ممکن است.

9 سری آزمایش های تحکیم زهکشی شده، CD و سه محوری انجام شده است. آزمایش ها براساس استاندارد فرانسه به نرخ کرنش ۲ میلیمتر بر دقیقه انجام شد و فشار، بار محوری و تغییر حجم نمونه اندازه گیری شد. اندازه قطعات تایلر نیاز به یک سلول سه محوری بزرگ برای ساخت نمونه دارد که قطر آن ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع آن ۳۰۰ میلیمتر و حجم نمونه ۵×۱۰^6 میلیمتر مکعب است. برای هر سری آزمایش سه فشار ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال برای تعیین پارامتر مقاومت مورد بررسی قرار گرفت. برای سری I هیچ پیکی مشاهده نشد و برای سری H یک پیک در کرنش ۱۴ درصد بسته به فشار محفظه مشاهده شد. شکل (۲-۱۱) تصویری از نمونه در انتهای آزمایش را نشان می دهد. زاویه اصطکاک ۱۹ به 42/6 درجه متغیر است و چسبندگی از ۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال تغییر می کند. [5]

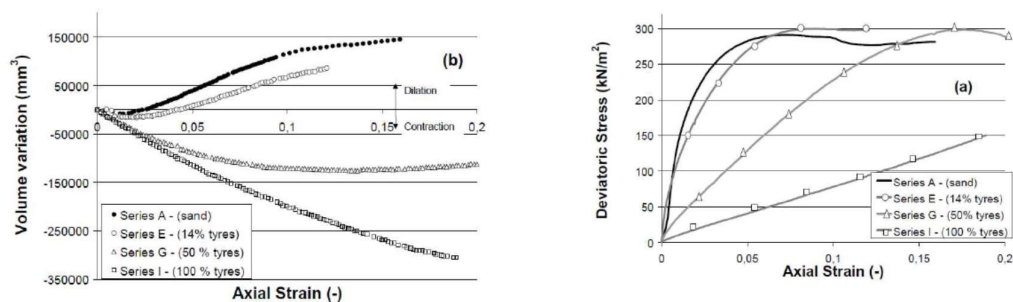


شکل (۲-۱۱) تصویر رفتار نمونه ها در انتهای آزمایش [5]

چسبندگی برای سری E، F، H و I به طور عمده برای مقادیر Φ_{eq} تأثیر نگذاشته است. با توجه به مقادیر Φ_{eq} به جای مقادیر Φ و C برای مشخص کردن مقاومت برشی نمونه ها ممکن است نتایج

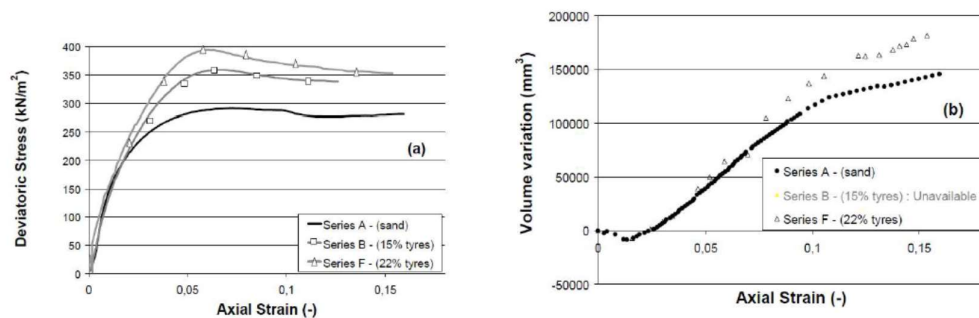
مختلفی بدست آید. به نظر می‌رسد مقاومت برشی نمونه‌ای از تراشه لاستیک بسیار کمتر از مخلوط ماسه و لاستیک تا ۵۰ درصد وزن است. بررسی تأثیر محتوای لاستیک و جهت‌گیری آن امکان مقایسه سطحی از سری‌های مختلف را بیان می‌کند.

شکل ۲-۱۲ تأثیر تیر بر رفتار نمونه‌ها با فشار ۷۵ کیلوپاسکال بر روی سری آزمایشات E.G.A و A نشان می‌دهد. لاستیک به شدت در تنش انحرافی- کرنش و کرنش حجمی تأثیر گذار است. ماسه منقبض شده را نشان می‌دهد پیک منحنی تنش-کرنش در کرنش محوری ۶ درصد تعریف شده است. تفاوت در رفتار ۱۰۰ درصد تیر نمونه قابل مشاهده است. منحنی تنش-کرنش نمونه ۰ و ۱۰۰ درصد که رفتار تقریباً خطی با مدول اولیه ۷۹۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد این مقدار کوچکتر از آن مقداری است که توسط یانگ پیش‌بینی شده بود. در مورد ۱۴ درصد وزنی تیر و ماسه رفتار نمونه شبیه ماسه متوسط و متراکم است هرچند لاستیک باعث مقاومت برشی بیشتر مخلوط می‌شود. نقطه پیک در ۸ درصد کرنش محوری می‌توان دید. اگرچه رفتار نمونه‌هایی که محتوای لاستیک آنها بین ۱۴ تا ۵۰ درصد است به طور قابل توجهی تغییر می‌کند باید توجه داشت که مقاومت برشی خودشان مشابه هستند بنابراین پیشنهاد می‌شود بین این دو درصد بیشترین مقاومت پیک بدست آید.



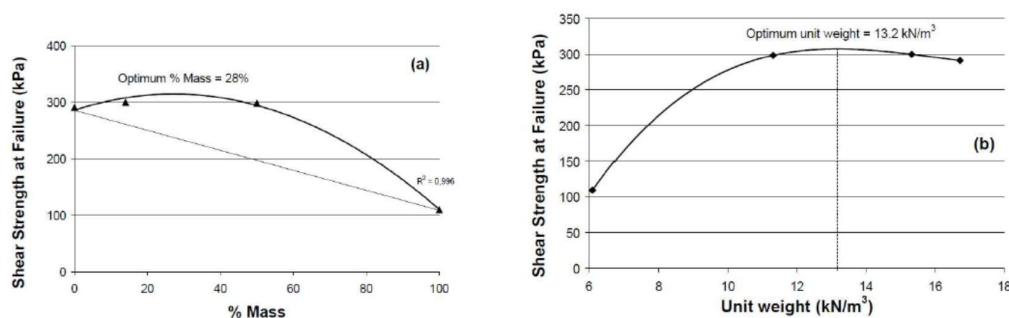
شکل (۲-۱۲) تأثیر خرده لاستیک در کرنش محوری به تغییرات حجم و تنش انحرافی [5]

همان نتایج را نیز می‌توان از نمونه‌های H و V استخراج کرد در شکل (۲-۱۳) نمونه‌های B، A، F، قابل ملاحظه است. نشان می‌دهد محتوای تیر از ۱۵ به ۲۲ درصد باعث افزایش مقاومت برشی پیک از ۳۵۹ به ۳۹۴ کیلوپاسکال می‌شود. تنوع حجمی برای نمونه با ۲۲ درصد تیر شبیه یک ماسه متراکم است که در یک رفتار انحنایی پس از یک دوره کوتاه انقباض است.



شکل (۲-۱۳) تأثیر خرده لاستیک در کرنش محوری به تغییرات حجم و تنش انحرافی [5]

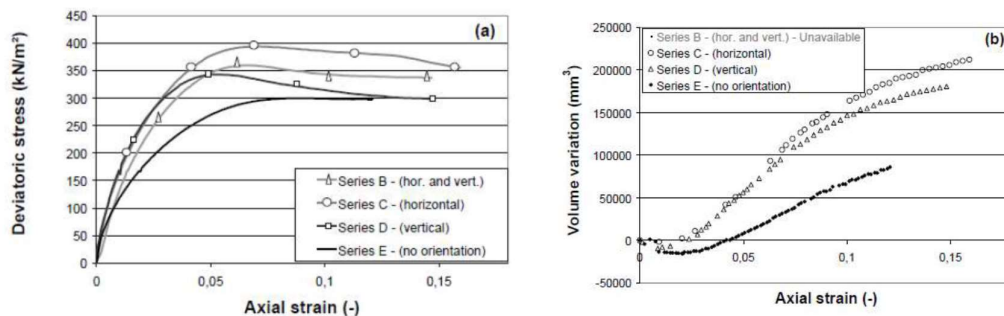
شکل ۲-۱۴ که مطابق با ایده برش داخلی و مکانیزم تقویت توسط زورنبرگ پیشنهاد شده است. این نتایج در آزمایشگاه با فشار محفظه ۷۵ کیلوپاسکال بدست آمده است اما مشاهدات مشابه در فشار دیگر و محتوی لاستیک مطلوب به ترتیب ۲۸ و ۳۶ درصد برای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تغییر کرده است. با درنظر گرفتن این سه درصد مطلوب توده لاستیک ۳۴ درصد که حداکثر مقاومت برشی را با چگالی بهینه ۱۳/۵ کیلونیوتن بر مترمربع است. این نتایج نزدیک به درصد مطلوب ۳۵ درصد که توسط زورنبرگ گزارش شده است می باشد. این درصد بهینه توسط یک پیک معلوم مشخص نشده است. بررسی تغییر جهت تراشه ها صرفا با ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی لاستیک در نمونه های E.D.C.B انجام شده است.



شکل (۲-۱۴) حداکثر مقاومت برشی با چگالی بهینه

در شکل ۲-۱۵ به نظر می رسد جهت گیری تأثیر مهمی در رفتار نمونه دارد. نمونه H به مقاومت برشی بالاتر از نمونه V می رسد. این نتایج توسط مقاومت برشی اندازه گیری شده تحت فشار محفظه ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تأیید شده است. مقادیر زاویه اصطکاک نشان می دهد ویژگی های برش در H نزدیک به V است و بالاتر از V و ماسه خالی است. در نمونه ما تکه های لاستیک عمود بر طرح نیستند اما نمونه H

و ۷ از لحاظ تقویت جهت گیری کارآمدتری دارند. تغییرات حجم سه نوع مخلوط همان شکل را دارد اما افزایش حجم نمونه‌ها کوچکتر است و این به این معنی است که برش دادن نمونه‌های خالص نیاز به بازسازی در نمونه دارد و همچنین نوار برش نازک‌تر است. در واقع منحنی تنش-کرنش نمونه H یک پیک کاملاً مشخص در کرنش ۱۴/۵ تا ۱۷ درصد بسته به فشار محفظه نمایش می‌دهد. [5]



شکل (۲-۱۵) تأثیر جهت گیری در رفتار نمونه‌ها

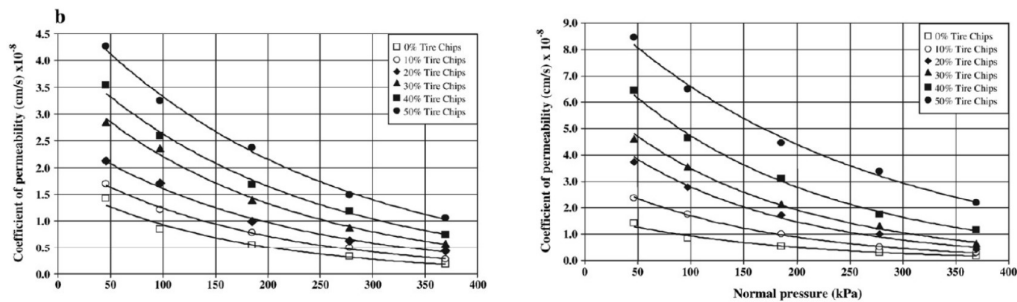
کتین و همکاران در سال ۲۰۰۶ پژوهشی در مورد خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط لاستیک و خاک رس چسبیده به عنوان ماده پرکننده انجام دادند. در این آزمایش از خاک رس و ذرات لاستیک بدون قطعات فلزی استفاده شده است خاک مورد استفاده از آنادا در جنوب ترکیه بدست آمده و در طبقه بندی در رده CL قرار گرفته و خرده لاستیک با دو سایز زیر ۰/۴۲۵ میلی‌متر و بین ۲ میلی متر و ۴/۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. در این آزمایش از خرده لاستیک با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ استفاده شده است. [6]

آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۲-۶۳ و ASTM D۴۲۱۸-۰۰ انجام می‌شود. نمونه‌ها در این آزمایش به صورت استوانه‌ای با ارتفاع ۲/۸۵ سانتی متر و قطر ۶/۳۵ سانتی متر هستند. مقادیر نفوذپذیری در فشار نرمال ۴۶ و ۹۶ و ۲۸۷ و ۳۷۱ کیلوپاسکال انجام می‌شود و نتایج در شکل ۲-۱۶ آمده است. آزمایش‌ها تحت شرایط اشباع انجام و برش آن سریعتر اتفاق می‌افتد (۱ میلی متر بر دقیقه) که زهکشی یا انجام نشود یا حداقل باشد. پیشگیری از زهکشی در آزمایش برش مستقیم بسیار دشوار است بنابراین اکثر آزمایش‌های زهکشی نشده در دستگاه برش مستقیم به طور کامل زهکشی شده نیستند به همین خاطر گرایش بیشتری به آزمایش زهکشی شده است.

این آزمایش با دستگاه برش مستقیم (ELED۳۰۰) با ابعاد ۶×۶ سانتی متر و ارتفاع ۳/۵ سانتی متر در یک سینی پر از آب در طول آزمایش نگه داشته می‌شود. حد روانی (۴۱/۵۵٪) تا ۳۰ درصد خرده لاستیک

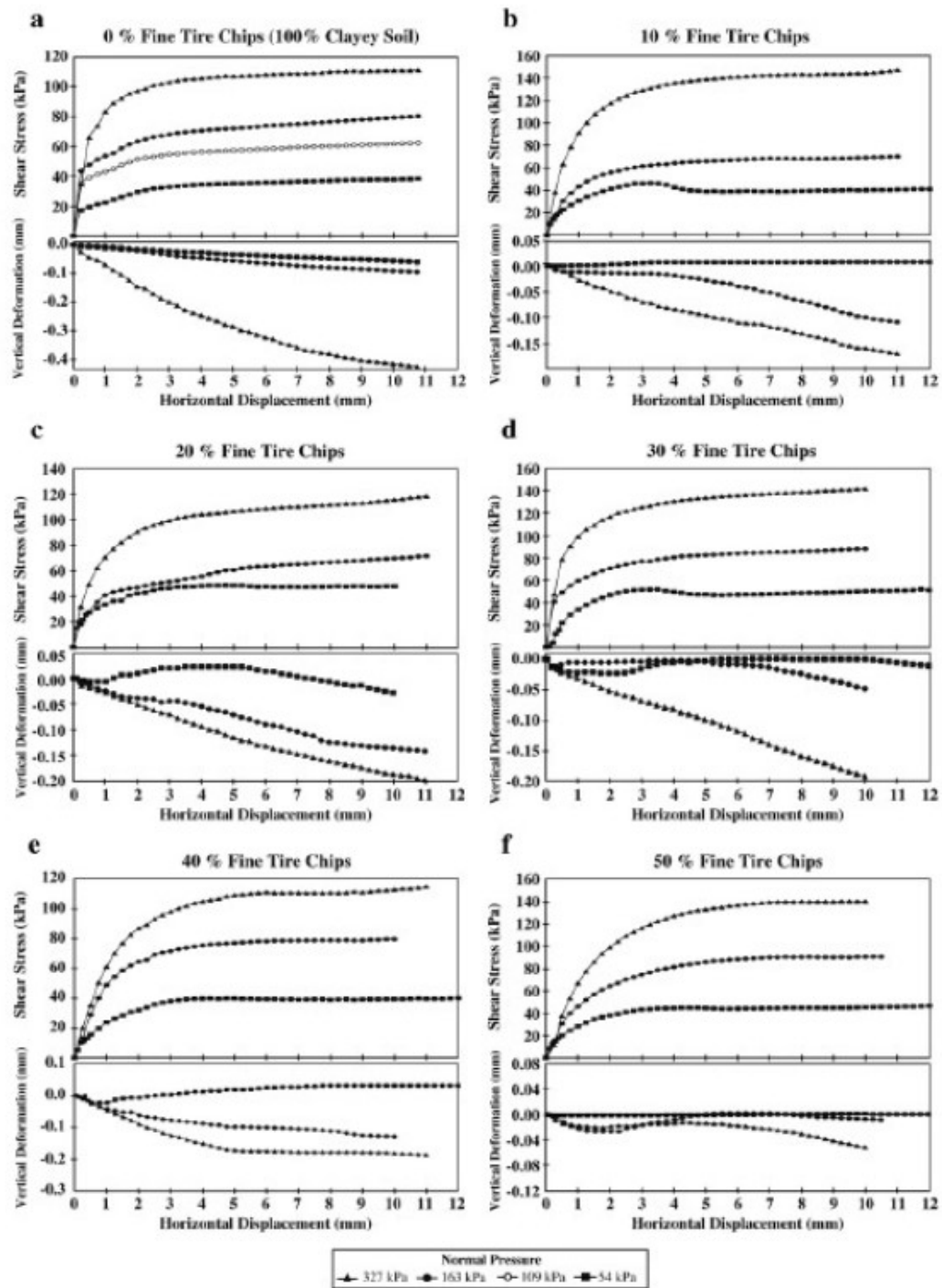
باقی می ماند و سپس شروع با کاهش می کند و حد خمیری ($25/67\%$) تا 10% درصد خرده لاستیک باقی می ماند و سپس از $67,25\%$ تا 25% درصد کاهش می یابد و بعد از آن تقریباً ثابت باقی می ماند. که این نتایج شبیه خاک های خوب دانه بندی شده چسبنده با خاصیت خمیری متوسط است. زمانی که خرده لاستیک افزایش می یابد نفوذپذیری افزایش می یابد و فشار نرمال کاهش می یابد که در درصدهای بالای خرده لاستیک و فشار نرمال پایین تر تفاوت در افزایش بیشتر است.

با توجه به این نتایج می توان گفت از این مخلوط می توان در جایی که نفوذپذیری کم و تراکم (بارگذاری) مورد نیاز است استفاده کرد مانند فونداسیون های ضعیف. اما نباید در جاهایی که نیاز به زهکشی برای جلوگیری از فشار منفی در هنگام بارگیری در شرایط اشباع وجود دارد مورد استفاده قرار گیرد.

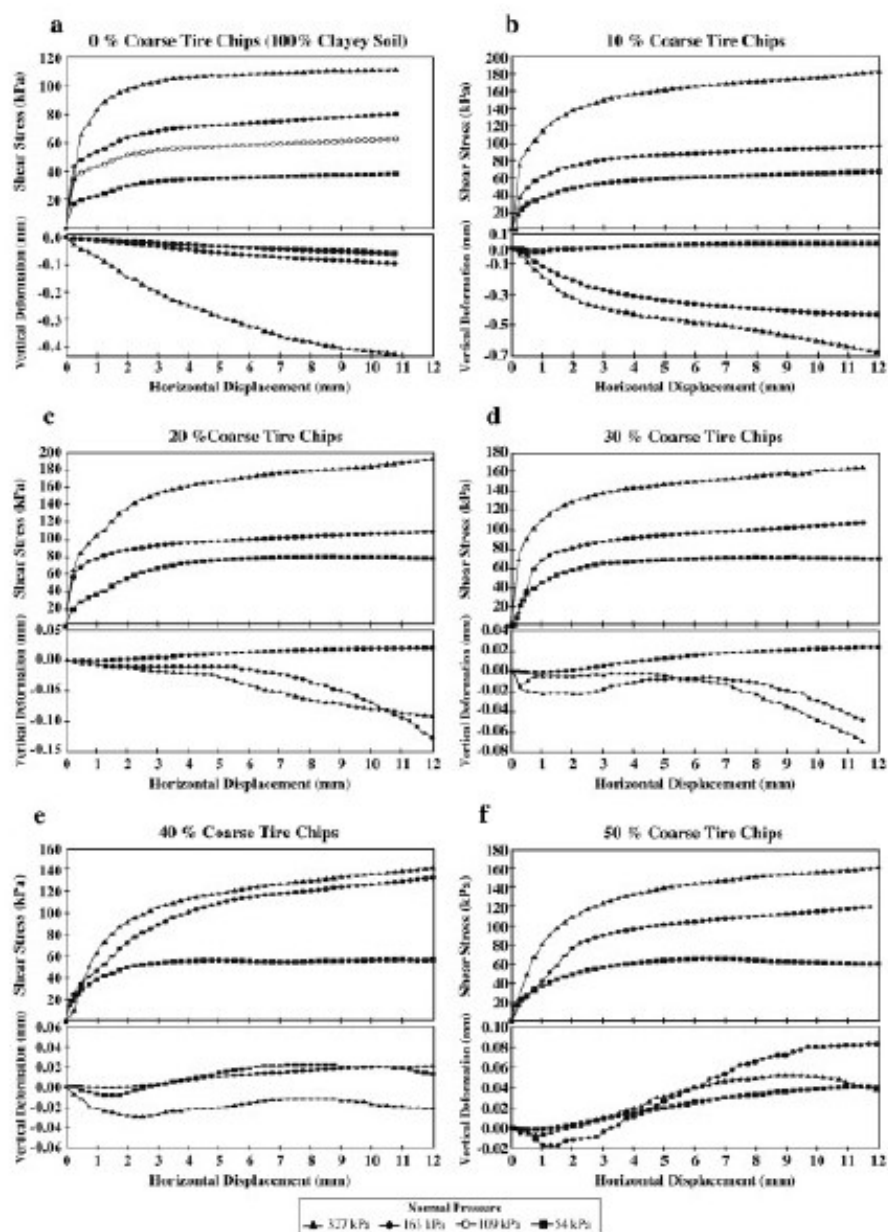


شکل (۲-۱۶) مقادیر نفوذپذیری در فشار نرمال [6]

در شکل ۲-۱۷ و ۲-۱۸ نمودار تنش برشی-جابجایی افقی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تقریباً تمام نمونه ها یک رفتار تنش و سخت شدگی را نشان می دهند به عبارت دیگر هیچ افتی وجود ندارد و هیچ نقطه پیکی در نمودار مشخص نشده است.

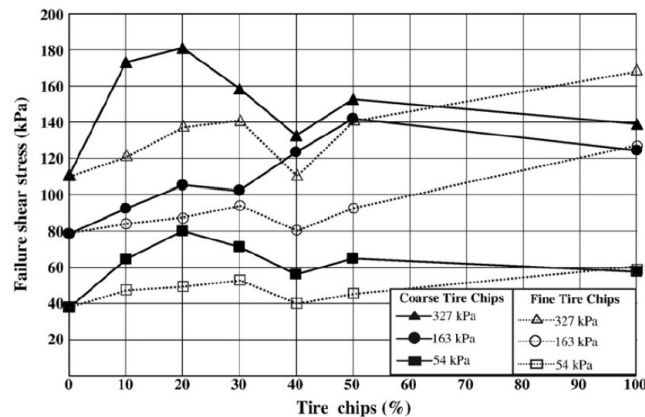


شکل (۲-۱۷) تنش برشی - جابجایی افقی [6]



شکل (۲-۱۸) تنش برشی - جابجایی افقی [6]

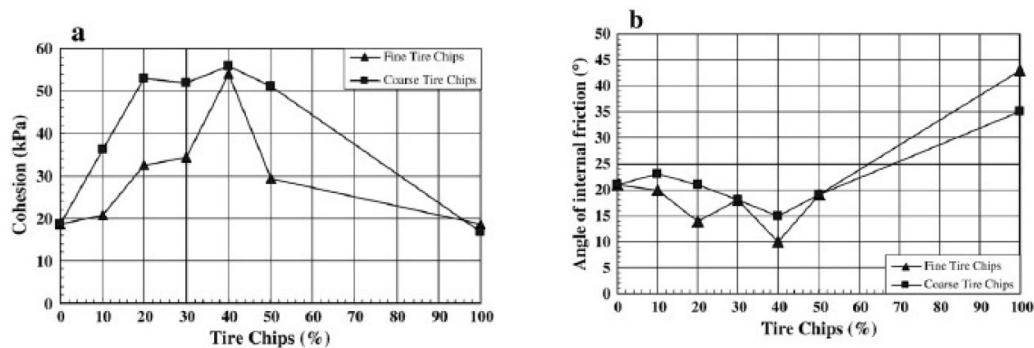
در شکل ۲-۱۹ تنش برشی در مقابل شکست با درصدهای مختلف لاستیک تحت فشارهای نرمال مختلف قابل ملاحظه است. نمودار نشان‌دهنده افزایش مقاومت برشی تا ۳۰ درصد برای پودر لاستیک و ۲۰ درصد برای خرده لاستیک است. مقاومت برشی با افزایش فشار نرمال افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۱۹) تأثیر درصدهای مختلف خرده لاستیک در تنش برشی [6]

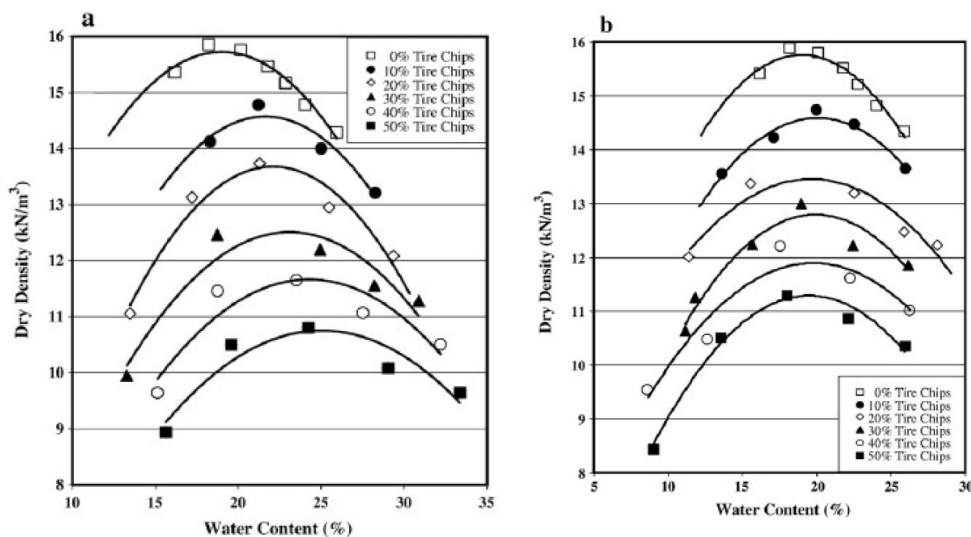
در شکل (۲-۲۰) شکست و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی براساس درصدهای مختلف لاستیک را می‌توان مشاهده کرد. چسبندگی برای هردو نمونه با افزایش درصد خرده لاستیک افزایش می‌یابد در حالی که زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد.

نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد مخلوط با ۲۰ درصد خرده لاستیک و ۳۰ درصد پودر لاستیک دارای ویژگی مقاومت برشی بالا از نظر قدرت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی است بنابراین به عنوان پرکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲-۲۰) تأثیر درصدهای مختلف در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی [6]

آزمایش تراکم برای خاک رس تنها و مخلوط با پودر و خرده لاستیک براساس پروکتر استاندارد انجام گرفت. که نتایج آن در شکل ۲-۲۱ آمده است. با توجه به شکل ۲-۲۱ برای خاک رس تنها حداکثر وزن مخصوص خشک ۱۵/۷۹ کیلونیوتن بر متر مکعب و درصد رطوبت بهینه ۱۹ درصد است. وزن مخصوص خشک با افزایش درصد لاستیک کاهش می‌یابد مثلاً ۱۳/۴۳ کیلونیوتن بر متر مکعب برای ۲۰ درصد خرده لاستیک و ۱۲/۵ برای ۳۰ درصد پودر لاستیک تبدیل می‌شود. [6]

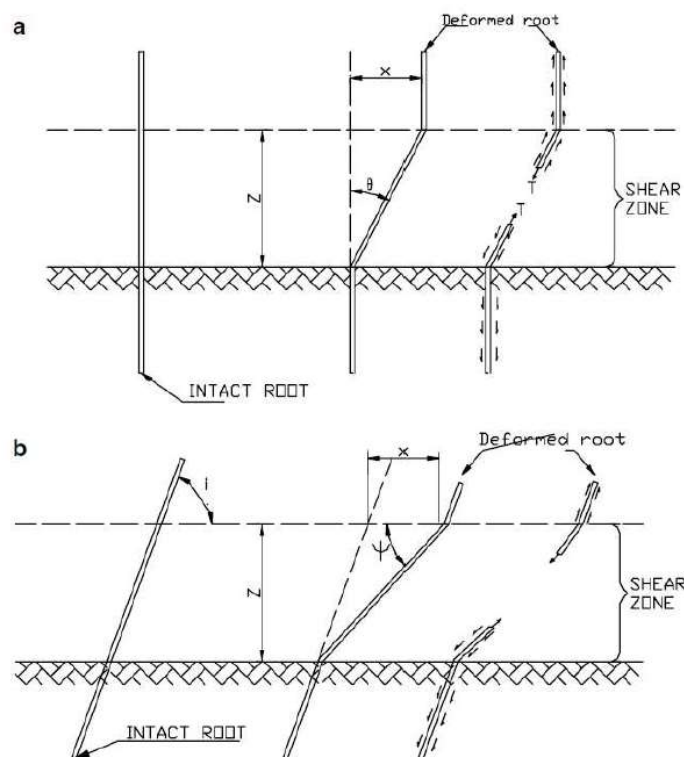


شکل (۲-۲۱) تأثیر درصدهای مختلف خرده لاستیک در حداکثر وزن مخصوص خشک [6]

هاتف و رحیمی در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای به بررسی تأثیر افزودن قطعات لاستیک در مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای پرداخت. این پژوهشگران تئوری مسئله خود را اینگونه بیان کردند که مدلسازی حالت تنش و کرنش ماسه مسلح در حین شکست و تغییر شکل بسیار دشوار است و دو روش تحلیل المال محدود پیشرفته و تعادل نیروها در پیش‌بینی رفتار مقاومت برشی ماسه مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش دوم که توانایی شناسایی پارامترهای مهم در تحقیقات تجربی را دارد در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. [7]

همانطور که در شکل (۲-۲۲) مشخص است مسلح سازی خاک به دو صورت عمودی (a) و مایل (b) صورت می‌گیرد. تنش‌های برشی به وجود آمده در خاک و در ادامه لغزش خاک به طرفین سبب ایجاد اعوجاج‌هایی در عوامل تسلیح می‌شود. این اعوجاج‌های به وجود آمده، سبب ایجاد نیروی کششی (T) در عوامل تسلیح سازی خاک می‌شود که می‌توان نیروی کششی به وجود آمده را به دو مؤلفه عمود بر سطح برش و مماس بر سطح برش تقسیم کرد. با توجه به محصورشدگی کامل عامل تسلیح توسط

خاک، باید توجه داشت که افزایش مؤلفه قائم نیروی کششی موجود در عامل تسلیح سبب افزایش تنش محصورشدگی در خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش در مقاومت برشی خاک است.



شکل (۲-۲۲) تنش‌های برشی به وجود آمده در خاک [7]

در این تحقیق از یک ماسه نسبتاً یکنواخت که براساس طبقه‌بندی یونیفاید در رده SW قرار می‌گیرد استفاده شده است.

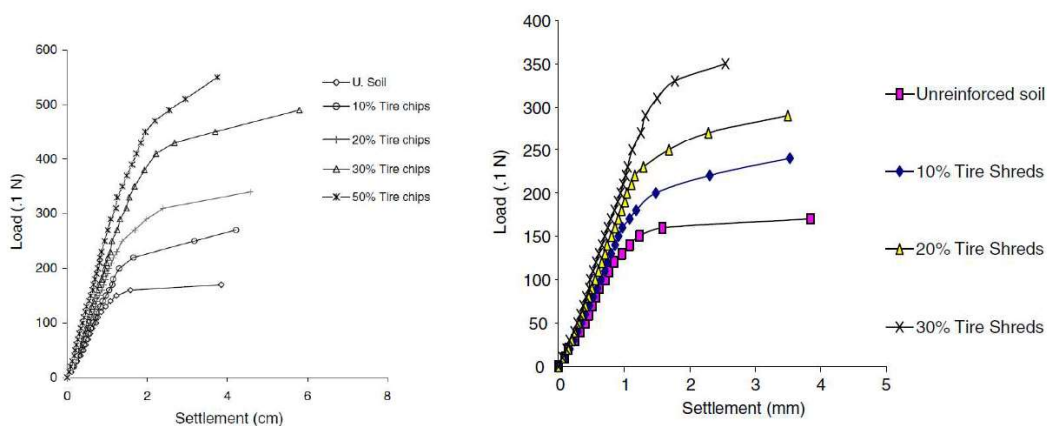
بیش از ۱۷۰ تیر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌است و لاستیک‌ها با یک دستگاه برش مخصوص به شکل مستطیلی و سایزهای مختلف برش داده می‌شوند. جایگزینی خرده لاستیک‌ها به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد حجمی است. عرض خرده لاستیک‌ها ۲ تا ۳ سانتی متر و با نسبت ابعادی ۲، ۳، ۴ و ۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق از پایه فولادی استوانه‌ای شکل با قطر ۱۵ سانتی متر و ضخامت ۷ سانتی‌متر است و استوانه ای با قطر ۱ متر و ارتفاع ۱ متر و ضخامت ورق ۴ میلیمتر ساخته شده است. برای بارگذاری آن از یک سیستم بارگذاری استاتیکی با استفاده از بازوی اهرم ساده استفاده شده است. بار وارد شده و نشست اندازه گیری می‌شود و از کانال‌های کوچکی برای اندازه گیری چگالی در استوانه

استفاده می شود. استوانه با اندازه کافی بزرگ ساخته شده است که از اثر شرایط مرزی بر ظرفیت باربری اجتناب شود.

روش انجام آزمایش به این گونه است که به اندازه ۱۰ تا ۵۰ درصد حجمی خرده لاستیک اندازه گیری و با ماسه به خوبی مخلوط می شود. سپس مخلوط به ارتفاع ۲۰ سانتی متر درون استوانه ریخته می شود قبل از ریخته شدن لایه بعدی باید این لایه به وسیله یک صفحه چوبی خاص و با ارتفاع سقوط مشخص فشرده شود.

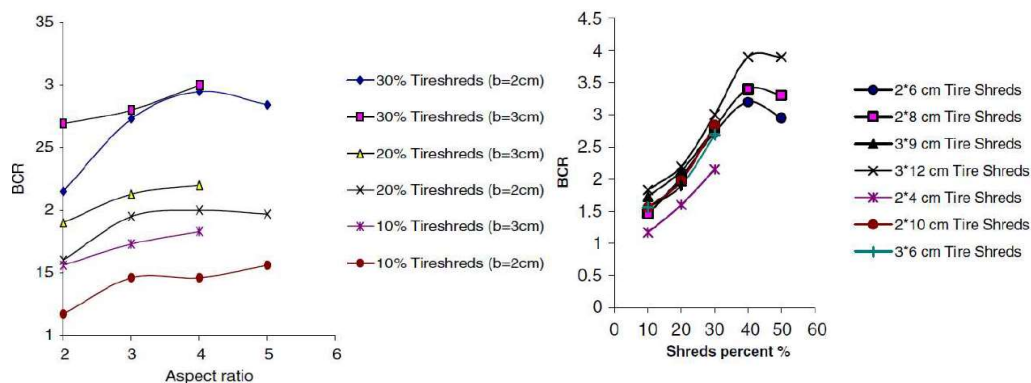
تراکم نسبی در نمونه با توجه به مقدار لاستیک از ۳۵ درصد تا ۴۵ درصد تغییر می کند. افزایش مقدار خرده لاستیک تراکم نسبی را کاهش می دهد و این به این دلیل است که خرده لاستیک ها انرژی تراکم را جذب می کنند. برنامه آزمایشات اینگونه است که مجموع ۳۴ آزمایش بر روی خاک تقویت شده با خرده لاستیک و نسبت های مختلف خرده لاستیک انجام می گیرد. نتایج آزمایش با نتایج آزمایش های بدون تقویت مقایسه می شود تا اثر تقویت کننده بر ظرفیت باربری مشخص شود. اثر تقویت کننده بر ظرفیت باربری BCR (به عنوان نسبت ظرفیت باربری خاک تقویت شده به ظرفیت باربری خاک تقویت نشده) آورده شده است. یکی از نتایجی که می توان از این تحقیق گرفت این است که اضافه کردن خرده لاستیک باعث افزایش ظرفیت باربری و محدود کردن مقاومت حداکثر می شود. شکل ۲-۲۳ منحنی های بار-نشست را برای خاک های تقویت شده با درصد های مختلف خرده لاستیک براساس آزمایش های انجام شده نشان می دهد.



شکل (۲-۲۳) نمودار بار - نشست با درصد های متفاوت خرده لاستیک [7]

شکل ۲-۲۴ مقادیر مختلف BCR را برای نسبت‌های ابعادی مختلف در درصدهای خرده لاستیک متفاوت نشان می‌دهد. که به نظر می‌رسد برای هر دو عرض (۲ و ۳ سانتی متر) انتخاب شده نسبت ابعادی بهینه ۴ است و می‌توان مشاهده کرد که کمترین BCR مربوط به ابعاد ۲×۴ است. که این به دلیل کوتاهی طول خرده لاستیک‌ها است زیرا در این مواقع نیروی کششی بوجود آمده در لاستیک از نیروی مقاوم بیشتر است. پس می‌توان گفت برای عملکرد بهتر باید طول حداقل تأمین شود و بیشترین BCR مربوط به خرده لاستیک با ابعاد ۱۲×۳ است.

همچنین می‌توان دید که افزایش طول برای عرض خاص، بیشتر از طول مطلوب BCR را کاهش می‌دهد که این کاهش بدلیل آن است که افزایش طول باعث کاهش نسبت مساحت می‌شود که یک پارامتر مهم است. بیشترین و کمترین BCR به ترتیب ۳/۹ و ۱/۱۷ برای مخلوط با ۴۰ درصد خرده لاستیک با ابعاد ۱۲×۳ و ۱۰ درصد خرده لاستیک با ابعاد ۴×۲ است. اثر خرده لاستیک در BCR در نمودار زیر نشان داده شده است با توجه به شکل ۲-۲۳ مشخص است افزایش خرده لاستیک BCR را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد BCR بعد از ۴۰ درصد خرده لاستیک افزایش پیدا نمی‌کند. [7]

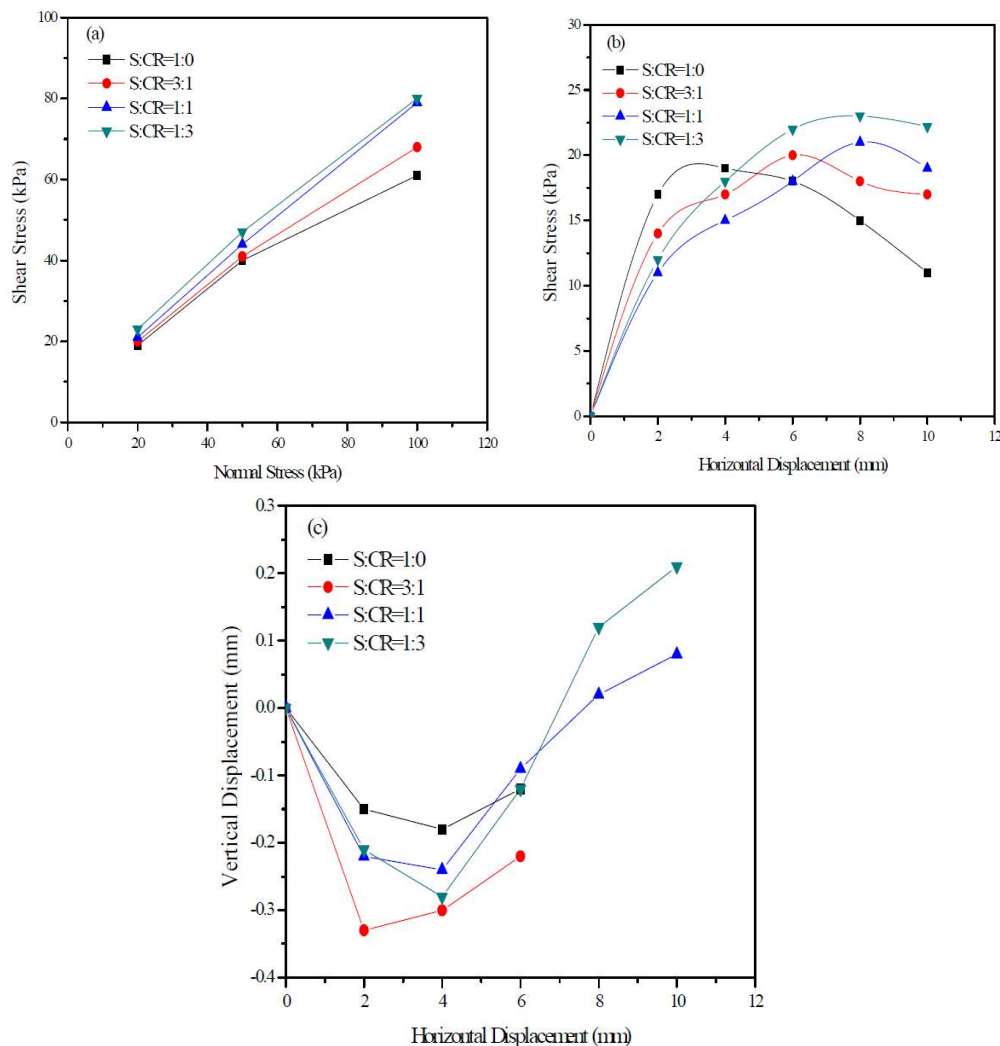


شکل (۲-۲۴) مقادیر BCR در درصدهای متفاوت خرده لاستیک [7]

تیواری و همکاران در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای با عنوان خصوصیات ژئوتکنیک ترکیب ماسه و لاستیک ضایعاتی منتشر شد. خاک مورد استفاده در این آزمایش از جیسالمر، راجستان خریداری جیسالمر، راجستان خریداری شد. تحلیل درجه بندی براساس IS۲۷۲۰ طبقه بندی شد که خاک به عنوان یک ماسه غیر پلاستیکی به صورت یکنواخت طبقه بندی شده است. وزن مخصوص خاک و لاستیک مورد آزمایش به ترتیب ۲/۶۶ و ۱/۱۳ در نظر گرفته شده است و چگالی خشک حداکثر و حداقل به ترتیب ۱۶/۱ و ۱۲/۹ کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد. زاویه اصطکاک داخلی ماسه ۳۰۰ می‌باشد و از لاستیک

با اندازه ذرات بین ۰/۸ تا ۲ میلیمتر استفاده شده است. [8]

آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های مخلوط لاستیک خرد شده و ماسه در شرایط سست و فشرده برای مقایسه - به انجام شد - بد. برای انجام آزمایش برش مس - ستقیم از محفظه ای با ابعاد ۵۰×۶۰×۶۰ میلیمتر جهت انجام آزمایش بر روی مخلوط ماسه و خرده لاستیک مورد استفاده قرار گرفت. خرده لاستیک با درصدهای ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ با ماسه - به براس - س مقدار وزن خشک - مخلوط شد و تحت تنش های نرمال ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع قرار گرفت.



شکل (۲-۲۵) نمودار تنش برشی - تنش نرمال، تنش برشی - جابجایی افقی، جابجایی قائم برای نسبت های مختلف [8]

به منظور مقایسه مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده لاستیک دو حالت فشرده سازی مورد بررسی قرار گرفت. یکبار مواد را از ارتفاع خیلی کم درون قالب می‌ریزیم که باعث حداقل تراکم می‌شود و برای تهیه نمونه فشرده ورقه‌های چوبی با ابعاد کمتر از قالب بالای نمونه قرار گرفته است و از ارتفاع ۱۰ سانتی متری وزنه ای ۲/۰ کیلوگرمی ۵ بار بر روی آن رها می‌شود پس از تراکم نمونه‌ها تنش به نمونه اعمال شد و نمونه نمونه برش داده شد. تمام آزمایش‌ها تحت شرایط کنترل شده و با نرخ کرنش ۲/۵ میلیمتر بر دقیقه انجام شد تا زمانی که تنش برشی ثابت یا حداکثر تغییر شکل برشی به ۱۰ میلیمتر برسد ادامه می‌یابد.

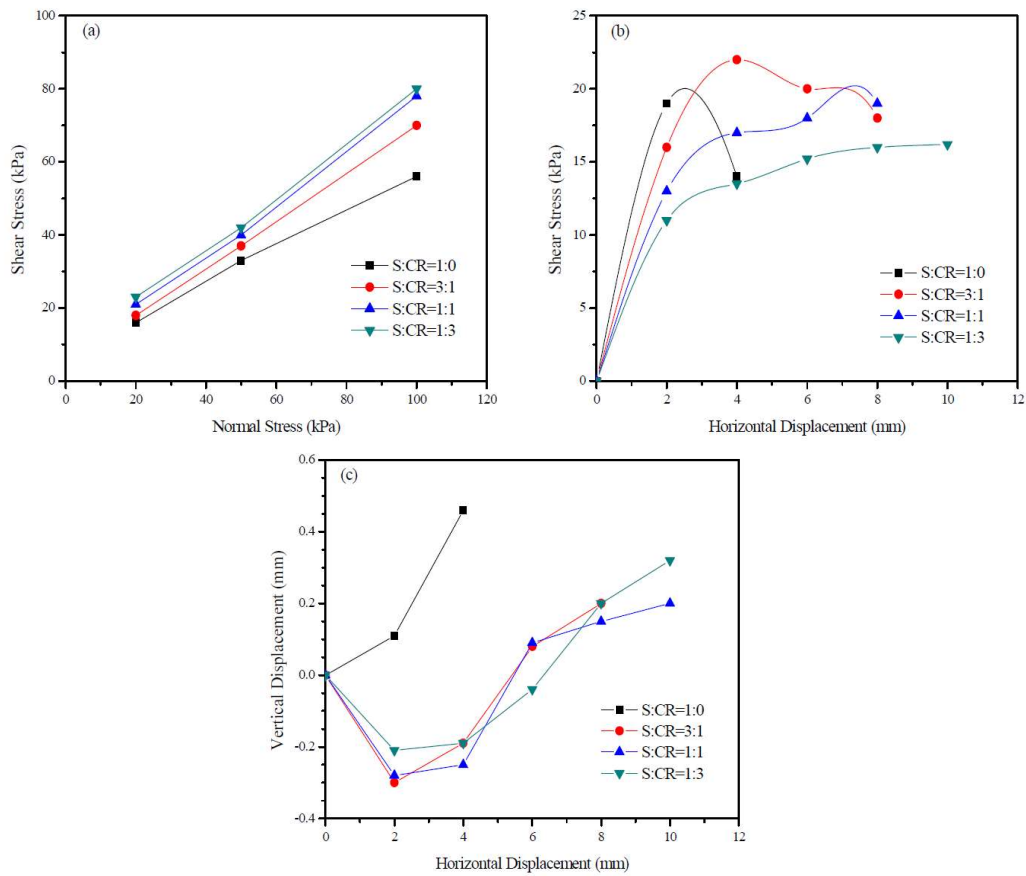
آزمایش‌های برش مستقیم تحت تنش‌های نرمال ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع بر نمونه‌ها اعمال شد. نمودارهای a و b در شکل ۲-۲۵ تنش برشی-تنش نرمال و تنش برشی-جابجایی افقی را برای نسبت‌های مختلف و در حالت سست می‌توان مشاهده کرد نمودار c نمودار جابجایی قائم-جابجایی افقی برای نمونه سست با تنش نرمال ۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع نشان می‌دهد.

شکل ۲-۲۶ مربوط به نمونه در حالت متراکم یا فشرده می‌باشد. نمودار a نشان دهنده تنش برشی-تنش نرمال است که نشان‌دهنده افزایش تنش برشی با اضافه کردن درصد بیشتری خرده لاستیک است. نمودار b نشان‌دهنده تنش برشی-جابجایی افقی برای نمونه فشرده با تنش نرمال ۵۰ کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد و نمودار c نشان دهنده جابجایی افقی-جابجایی عمودی برای نمونه فشرده با تنش نرمال ۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشد.

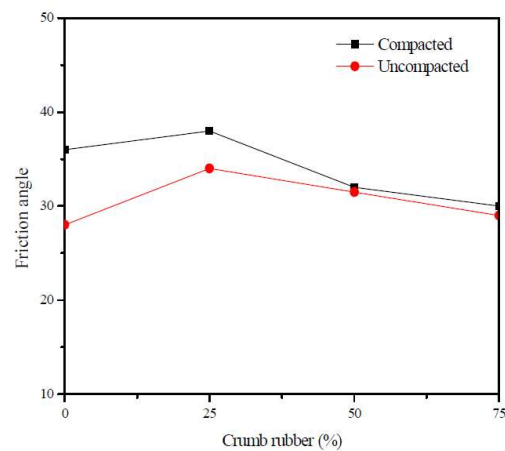
شکل ۲-۲۷ تغییرات زاویه اصطکاک در درصدهای مختلف خرده لاستیک برای حالت فشرده و سست را نشان می‌دهد با توجه نمودار می‌توان دریافت که با اضافه کردن خرده لاستیک تا ۲۵ درصد زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد و پس از آن روند کاهشی دارد. به طور کلی می‌توان از مجموعه آزمایش‌ها چند نتیجه گرفت:

- نمونه مخلوط ماسه و لاستیک مقاومت برشی بیشتری نسبت به ماسه معمولی دارد.
- تنش برشی با افزایش تغییر شکل افقی افزایش می‌یابد و در تمام نمونه‌ها می‌توان از یک پیک مشخص استفاده کرد.
- نمونه‌های سست با درصد خرده لاستیک بیش از ۵۰ درصد و تحت تنش ۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع ابتدا فشرده شده و سپس برش داده می‌شوند که با افزایش درصد لاستیک افزایش می‌یابد.
- زاویه اصطکاک در ابتدا با افزایش درصد خرده لاستیک افزایش می‌یابد سپس با اضافه کردن

بیشتر آن روند کاهشی دارد. [8]



شکل (۲-۲۶) نمودار تنش برشی - تنش نرمال، تنش برشی - جابجایی افقی، جابجایی افقی - جابجایی قائم برای نسبت های مختلف [8]

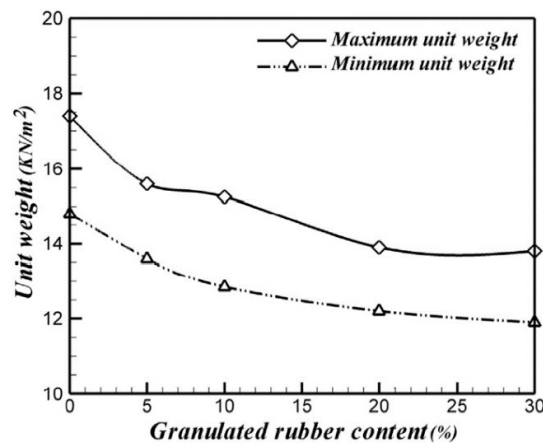


شکل (۲-۲۷) تغییرات زاویه اصطکاک در درصد های مختلف خرده لاستیک [8]

در سال ۲۰۱۷ انوری و همکاران اثر لاستیک گرانول را بر مقاومت برشی ماسه خوب دانه بندی شده مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ماسه خوب دانه بندی شده و خرده لاستیک با ابعاد ۵ تا ۵ میلیمتر به میزان ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی مورد استفاده قرار گرفت. براساس ASTM D۴۲۵۴ و ASTM D۴۲۵۳ حداکثر و حداقل وزن مخصوص ماسه ۱۴/۷ و ۱۷/۴ کیلونیوتن بر متر مکعب بدست آمد. طبق استاندارد ASTM D۶۲۷۰ قطعات تایر مورد استفاده به عنوان لاستیک گرانول طبقه بندی شده‌اند و میانگین وزن مخصوص و چگالی برای لاستیک گرانول ۱۲/۰۵ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۱/۲۲ است. در این آزمایش‌ها از جعبه برش طبق استاندارد ASTM D۳۰۸۰، ۱۰×۱۰ سانتی‌متری که قطر داخلی آن ۱۴/۱۴ سانتی‌متر است استفاده شده‌است و نرخ جابجایی ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. [9]

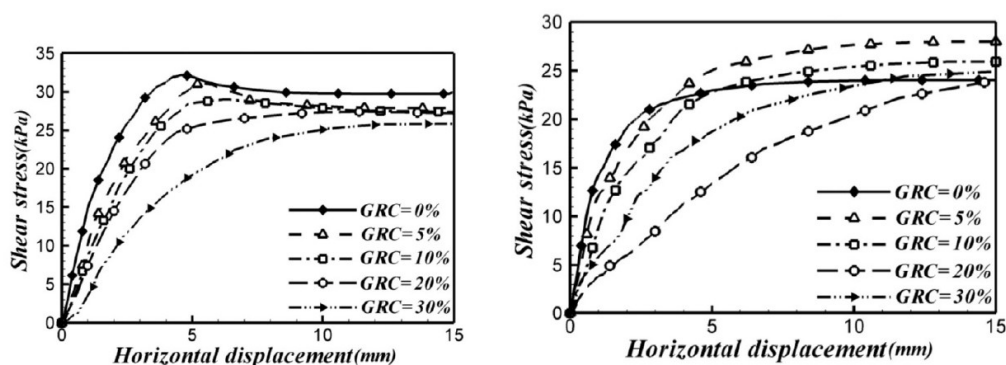
مخلوط ماسه و خرده لاستیک به سه بخش تقسیم شده و هر قسمت درون جعبه برش قرار داده می‌شوند و تا رسیدن به تراکم مورد نیاز فشرده می‌شوند. تست‌های برش با تنش نرمال ۳۴/۵، ۵۴/۵، ۷۴/۵ و ۱۰۴/۵ و در صد تراکم‌های نسب ۵۰٪ و ۷۰٪ و ۹۰٪ مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۲-۲۸ حداقل و حداکثر وزن مخصوص مخلوط را با درصدهای وزنی متفاوت خرده لاستیک نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود حداقل و حداکثر وزن مخصوص در مخلوط خرده لاستیک و ماسه با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش می‌یابد که به علت کم بودن چگالی خرده لاستیک است. اثر متقابل ماسه و خرده لاستیک سبب افزایش تخلخل می‌شود و این حفرات نیز با ماسه پر نمی‌شود. در نمودار مشخص است از ۰ تا ۲۰ درصد نمودار شیب بیشتری دارد و بعد از آن با شیب کمتری ادامه می‌یابد.



شکل (۲-۲۸) حداقل و حداکثر وزن مخصوص مخلوط را با درصدهای وزنی متفاوت خرده لاستیک [9]

شکل ۲-۲۹ اثرات درصد‌های مختلف خرده لاستیک بر نمودار تنش برشی-جابجایی افقی با دو درصد تراکم ۵۰ و ۹۰ درصد و با تنش نرمال ۳۴/۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود زمانی که تراکم نسبی ۵۰ درصد است مخلوط یک رفتاری شبیه ماسه شل را که هیچگونه افت مقاومت بعد از نقطه پیک را ندارد نشان می‌دهد این درحالی است که با تراکم ۹۰ درصد منحنی یک پیک همراه با شکست را نشان می‌دهد. بعد از شکست مقاومت برشی به مقدار ثابت برای جابجایی حدود ۱۵ سانتی متر می‌رسد. در اکثر مخلوط‌ها نمودار تنش برشی-جابجایی افقی بین ۱۰ میلیمتر جابجایی افقی و با افزایش جابجایی افقی تا ۱۵ میلیمتر که به صورت رفتار خطی است نشان می‌دهد. با افزایش مقدار لاستیک در مخلوط جابجایی برشی بالا برای ایجاد تنش برشی پیک نیاز است که می‌توان گفت جابجایی باعث قفل شدن ماسه و خرده لاستیک در هم می‌شود.



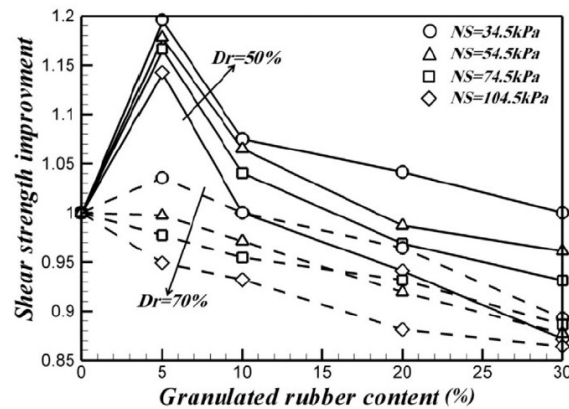
شکل (۲۹-۲) نمودار تنش برشی-جابجایی افقی با دو درصد تراکم ۵۰ و ۹۰ درصد [9]

شکل ۲-۳۰ تاثیر تراکم نسبی و تنش نرمال برای پیشرفت مقاومت برشی در درصد‌های مختلف خرده لاستیک نشان می‌دهد. در تراکم نسبی ۵۰ درصد مقاومت برشی تا ۵ درصد خرده لاستیک برای تمامی تنش‌های نرمال افزایش می‌یابد و سپس با افزایش خرده لاستیک مقاومت برشی کاهش می‌یابد. بر خلاف تراکم نسبی ۵۰ درصد در تراکم نسبی ۷۰ و ۹۰ درصد افزایش خرده لاستیک موجب کاهش مقاومت برشی در هر تنش نرمال می‌شود. پس می‌توان گفت افزایش بیشتر تراکم نسبی باعث کاهش مقاومت برشی در هر تنش نرمال می‌شود از آنجاییکه مقاومت متقابل ذرات ماسه و لاستیک کمتر از ماسه است می‌توان گفت خرده لاستیک اثر منفی در مقاومت برشی دارد.

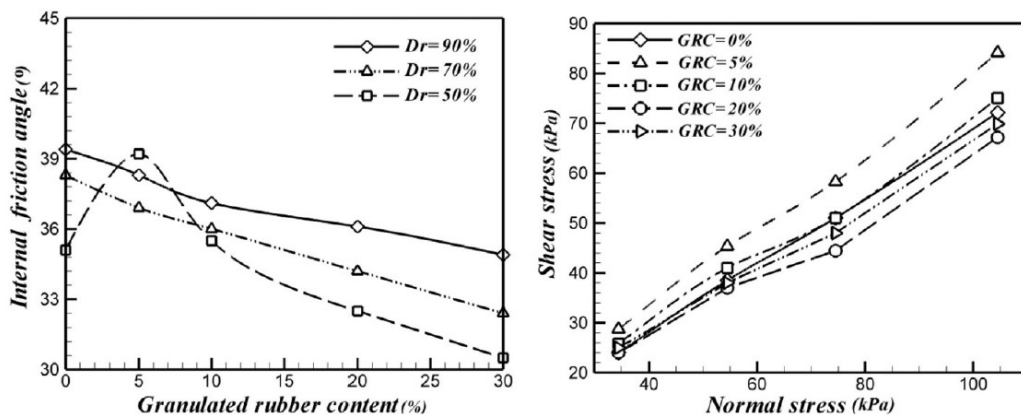
در شکل ۲-۳۰ می‌توان دید که مقاومت برشی با افزایش تنش نرمال کاهش می‌یابد. با افزایش تنش نرمال سطح تماس بیشتر می‌شود و خرده لاستیک در ماسه فرو می‌رود. افزایش تراکم نسبی اثر تنش

نرمال را بر بهبود مقاومت برشی کاهش می‌دهد و بهبود و افزایش مقاومت برشی با افزایش تراکم نسبی و تنش نرمال کاهش می‌یابد.

شکل ۲-۳۱ برای درصد تراکم‌های مختلف براساس درصدهای مختلف لاستیک زاویه اصطکاک داخلی مخلوط را نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک با کاهش تراکم کاهش می‌یابد. در تراکم ۷۰ و ۹۰ درصد با افزایش خرده لاستیک زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد و در تراکم ۵۰ درصد زاویه اصطکاک داخلی مخلوط با ۵ درصد خرده لاستیک بیشتر از ماسه خالص است. در شکل زیر در تراکم نسبی ۵۰ درصد خرده لاستیک‌های مختلف نمودار تنش نرمال بر حسب تنش برشی نشان داده شده است که تنش برشی با افزایش تنش نرمال افزایش می‌یابد.

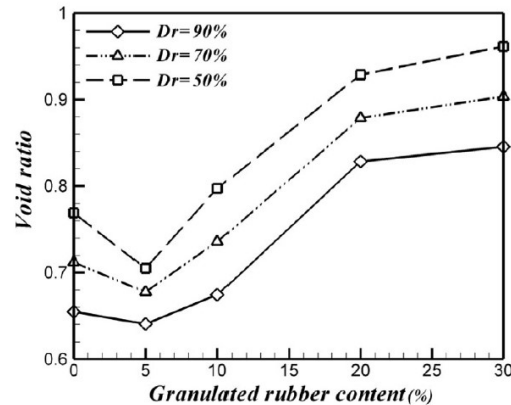


شکل (۲-۳۰) تأثیر تراکم نسبی و تنش نرمال در درصدهای مختلف خرده لاستیک [9]



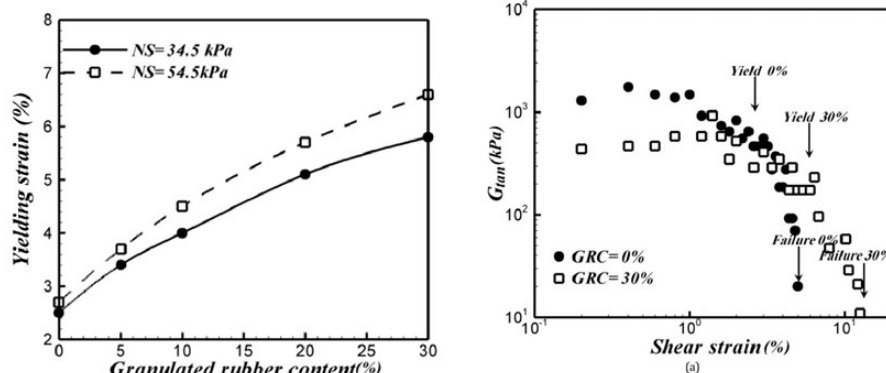
شکل (۲-۳۱) زاویه اصطکاک داخلی مخلوط با درصد تراکم‌های مختلف براساس درصدهای مختلف لاستیک [9]

در شکل ۲-۳۲ اثرات تراکم نسبی و درصد‌های خرده لاستیک بر روی نسبت تخلخل قابل مشاهده است. نسبت تخلخل در درصد تراکم‌های مختلف ۰ تا ۵۰ درصد خرده لاستیک ابتدا روند کاهشی و بعد از آن روند افزایشی است در ۵ درصد خرده لاستیک حفره های ماسه را پر می کند و نسبت تخلخل کاهش می یابد و می توان گفت نسبت تخلخل با افزایش تراکم نسبی کاهش می یابد.



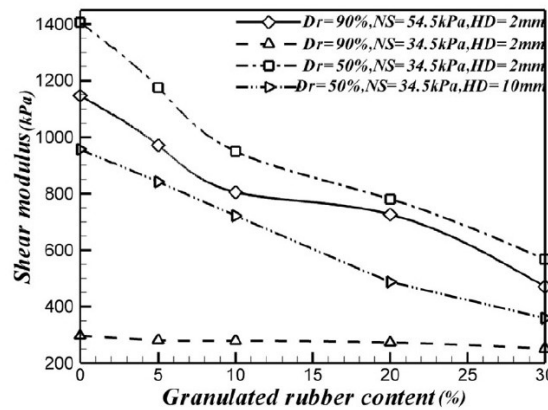
شکل (۲-۳۲) نسبت تخلخل با درصد‌های مختلف خرده لاستیک و تراکم‌های متفاوت [9]

شکل ۲-۳۲ سختی با کرنش برشی برای نمونه‌ها با درصد لاستیک ۰ و ۳۰ درصد و تراکم نسبی ۹۰ درصد و تنش نرمال ۳۴/۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. می‌توان دید که کرنش تسلیم برای نمونه‌ها با ۳۰ درصد خرده لاستیک بالاتر از کرنش ماسه معمولی است. شکل زیر کرنش تسلیم و درصد لاستیک با تنش نرمال ۳۴/۵ و ۵۴/۵ و تراکم نسبی ۹۰ درصد نشان می‌دهد که کرنش تسلیم در تنش نرمال ۳۴/۵ و ۵۴/۵ به ترتیب ۲/۵ و ۲/۷ درصد می‌باشد. تراکم نسبی بالا باعث کاهش مقاومت برشی و افزایش ظرفیت کرنشی می‌شود.

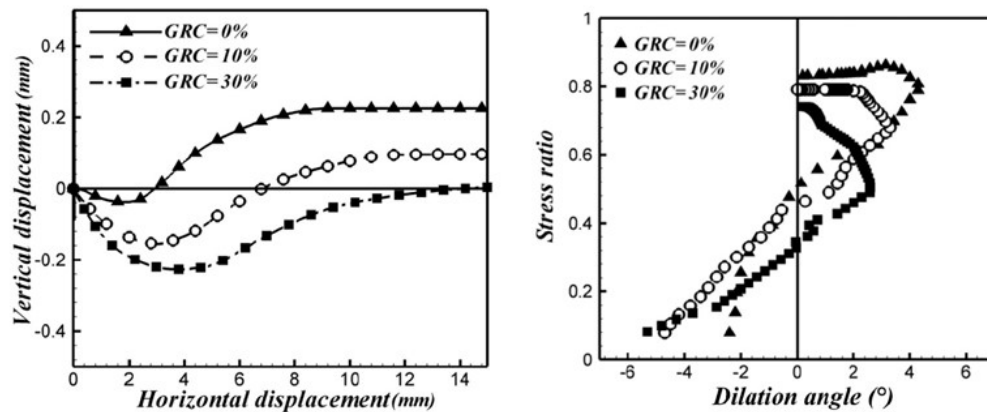


شکل (۲-۳۳) سختی با کرنش برشی برای نمونه‌ها با درصد لاستیک و تراکم نسبی مختلف [9]

شکل ۲-۳۴ تغییرات مدول برشی با درصدهای مختلف لاستیک با تراکم های مختلف و تنش نرمال متفاوت نشان می‌دهد. که مدول برشی با افزایش درصد لاستیک کاهش می‌یابد و در تراکم نسبی ثابت مدول برشی مخلوط با ۰ درصد خرده لاستیک بسیار بالاتر از مخلوط با ۳۰ درصد خرده لاستیک است. همچنین نشان می‌دهد افزایش خرده لاستیک اثر تنش نرمال بر سختی را کاهش می‌دهد.



شکل (۲-۳۴) تغییرات مدول برشی با درصدهای مختلف لاستیک با تراکم های مختلف و تنش نرمال متفاوت [9]



شکل (۲-۳۵) تغییرات جابجایی افقی- جابجایی قائم برای درصدهای مختلف لاستیک [9]

شکل ۲-۳۵ نمودار تغییرات جابجایی افقی- جابجایی قائم برای درصدهای مختلف لاستیک را نشان می‌دهد و شکل بالا تغییرات نسبت تنش با زاویه برای نمونه با تنش نرمال ۵۴/۵ کیلوپاسکال و تراکم نسبی ۹۰ درصد را نشان می‌دهد.

در مراحل اولیه برش زاویه ای منفی یعنی مقدار زیاد انقباض را نشان می‌دهد و میزان انقباض با افزایش

خرده لاستیک افزایش می یابد. دیده می شود حداکثر زاویه با کاهش مقدار لاستیک کاهش می یابد. فشار عادی زمین در حالت عادی با افزایش تراکم نسبی کاهش می یابد. در تراکم نسبی ۵۰ درصد نمونه با ۵ درصد خرده لاستیک دارای کمترین فشار جانبی زمین در شرایط عادی است. علاوه بر این مقدار فشار نرمالیزه شده زمین در حالت فعال نشان می دهد که محتوی لاستیک به طور مطلوب مخلوط در تراکم نسبی ۵۰ و ۷۰ و ۹۰ درصد به ترتیب ۲۰ و ۵ و ۲۰ درصد می باشد. [9]

نورزاد و روشنی در سال ۱۳۹۳ مقاله ای با عنوان بررسی آزمایشگاهی رفتار ماسه مسلح با خرده لاستیک و پودر لاستیک انجام شد. هدف اصلی از انجام آن بررسی رفتار تنش-کرنش و مقاومت برشی ماسه-خرده لاستیک و ماسه-پودر لاستیک با دستگاه سه محوری است. برای این منظور تعدادی آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده CD انجام شد. [10]

خرده لاستیک و پودر لاستیک استفاده شده در این تحقیق حاصل از خرد و آسیاب کردن لاستیک های فرسوده است ذرات لاستیک با ابعاد ۱ تا ۶ میلیمتر را خرده لاستیک و زیر ۱ میلیمتر را پودر لاستیک در نظر می گیریم. در این آزمایش خرده لاستیک به ماسه به صورت در صد وزنی خشک ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد اضافه شده است. علت افزودن خرده لاستیک تا ۳۰ درصد این است که افزودن بیشتر از ۳۰ درصد باعث پدیده جداشدگی بین ذرات خرده لاستیک و ماسه می شود.

برای تهیه و ساخت نمونه ابتدا میزان ماسه و خرده لاستیک که در ساخت نمونه با توجه به تراکم نسبی ۷۰ درصد بدست می آید. سپس هرکدام به ۵ قسمت مساوی تقسیم و به صورت مجزا مخلوط می شوند. در این تحقیق از نمونه سازی کوبش خشک استفاده شده است به منشور متراکم کردن لایه های ریخته شده در قالب از کوبه ای با قطر کمی بیش از قطر نمونه استفاده شده است. ارتفاع لایه های متراکم شده با استفاده از کولیس کنترل گردید. در بین لایه ها به منظور حفظ پیوستگی دو لایه با استفاده از خط کش شیارهایی به عمق ۱/۱ ضخامت لایه به صورت شبکه ای ایجاد شد. بعد از آماده سازی نمونه سنگ متخلخل را به آرامی و به صورت کاملاً تراز روی خاک قرار داده و سپس بارگذاری روی آن انجام می شود و بعد از این مرحله به منظور عدم کج شدگی و خروج از مرکزیت نمونه مقدار کمی خلأ در حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلو پاسکال به نمونه اعمال می شود. بعد از پر نمودن آب داخل سلول به منظور حذف خلأ اعمالی بر نمونه فشار داخلی سلول تا مقداری که جایگزین خلأ اعمالی برای نگه داشتن نمونه باشد افزایش می یابد که این مقدار برای تمام نمونه ها ۱۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد نمونه ها در فشارهای همه جانبه ۵۰-۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش قرار گرفتند میزان سرعت بارگذاری در آزمایش های این تحقیق ۰/۳ میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود خرده لاستیک و پودر لاستیک در خاک باعث افزایش کرنش گسیختگی، مقاومت پسماند و کاهش مقاومت بیشینه نمونه‌ها می‌گردد. این در صورتی است که افزودن پودر لاستیک به ماسه نسبت به افزودن خرده لاستیک باعث کاهش بیشتر مقاومت بیشینه خاک می‌شود؛ و همچنین می‌توان گفت افزودن خرده لاستیک و پودر لاستیک به خاک باعث افزایش کرنش گسیختگی و کاهش سختی خاک می‌شود و این کاهش سختی با افزایش درصد مسلح کننده افزایش می‌یابد. در واقع افزودن لاستیک به ماسه باعث تغییر رفتار ماسه از حالت سخت‌شونده به حالت نرم‌شونده می‌شود. نمودارهای تغییر حجم بر حسب کرنش محوری را برای ماسه غیر مسلح، ماسه و خرده لاستیک به میزان ۲۰ درصد و ماسه و پودر لاستیک به میزان ۲۰ درصد در فشار دورگیر ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. بررسی آنها نشان می‌دهد وجود خرده لاستیک و پودر لاستیک در خاک باعث اتساع نمونه‌ها می‌شود. با مقایسه دانه‌بندی خرده لاستیک و حتی پودر لاستیک با دانه‌بندی ماسه دیده می‌شود که خرده لاستیک و پودر لاستیک دارای D₅₀ به مراتب بزرگتر در مقایسه با ماسه هستند در نتیجه وجود آنها باعث اتساع در مقایسه با ماسه غیرمسلح می‌گردد.

تأثیر تسلیح با خرده لاستیک و پودر لاستیک بر پارامترهای مقاومتی خاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود افزودن خرده لاستیک و پودر لاستیک باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی می‌شود. علت کاهش زاویه اصطکاک این است که نیروی اصطکاک بین ذرات لاستیک با یکدیگر و ذرات لاستیک با ماسه کمتر از نیروی اصطکاک بین ذرات ماسه است.

نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزودن خرده لاستیک و پودر لاستیک مقاومت بیشینه ماسه کاهش می‌یابد و تسلیح خاک با خرده لاستیک و پودر لاستیک باعث افزایش کرنش گسیختگی می‌شود یکی دیگر از تأثیراتی که می‌تواند بر روی ماسه بگذارد این است که رفتار ماسه را از حالت سخت‌شونده به نرم‌شونده تغییر دهد. افزودن خرده لاستیک و پودر لاستیک باعث کاهش اتساع نیز می‌شود و پودر لاستیک تأثیر بیشتری در اتساع دارد. افزودن لاستیک به ماسه باعث کاهش اصطکاک داخلی ماسه و ایجاد چسبندگی ظاهری در آن می‌شود و با افزایش نسبت تسلیح کننده زاویه اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد.

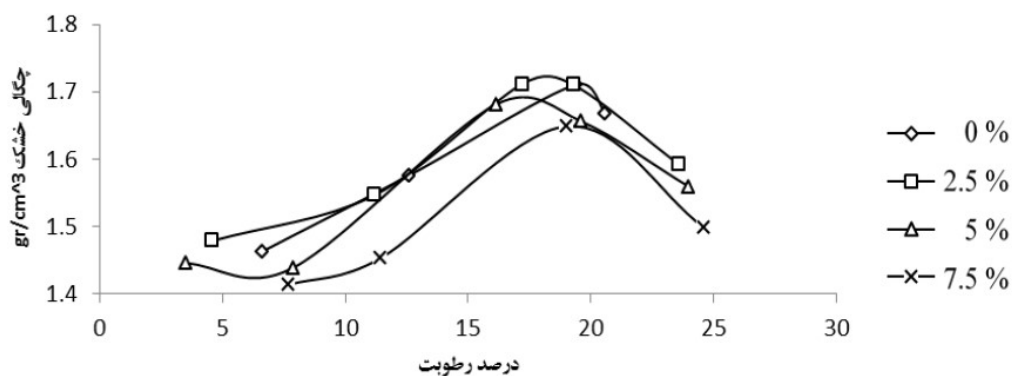
پزشکی و امین فر در سال ۱۳۹۳ مقاله‌ای با عنوان بررسی و قیاس اثر پودر لاستیک بر خاک با اثر ضایعات درشت تر لاستیک انجام شد. در این مقاله با انجام آزمایش‌ها تراکم خاک و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه‌ها انجام شده است. در این تحقیق پودر لاستیک دارای ابعاد کمتر از ۰/۲ میلیمتر و از لاستیک‌های ضایعاتی خودرو تهیه شده است. کوچک بودن محدوده اندازه ذرات پودر

لاستیک باعث می شود تا خاکی با دانه بندی نزدیک به آن در اولویت قرار گیرد. خاک مورد استفاده در این تحقیق با دانه بندی $0/01$ و $0/1$ میلیمتر از نوع CL است. [11]

از استاندارد ASTM D698 روش B برای تعیین درصد رطوبت بهینه خاک در اختلاط با پودر لاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. برای آزمایش CBR از استاندارد ASTM D 1883-99 استفاده شده است. که برای ارزیابی مقاومت خاک های چسبنده که حداکثر اندازه دانه بندی آن کوچکتر از 19 میلیمتر است مورد استعمال قرار می گیرد. با توجه به شکل 2-36 مقدار رطوبت بهینه بر اثر پودر تغییر یافته است و حداکثر مقدار کاهش آن 3 درصد است و همچنین تغییر رطوبت بهینه از روند خاصی پیروی نمی کند. در رابطه با وزن مخصوص می توان گفت مقدار وزن مخصوص خشک و مرطوب خاک با افزایش پودر کاهش یافته است بطوریکه مقدار چگالی مرطوب از $2/05$ گرم بر سانتی متر مکعب تا $1/86$ کاهش داده شده است. در واقع کمتر شدن چگالی به سبب کمتر بودن وزن مخصوص پودر است و پودر در فرآیند تراکم اختلالی ایجاد نمی کند و فقط جایگزین رس می شود.

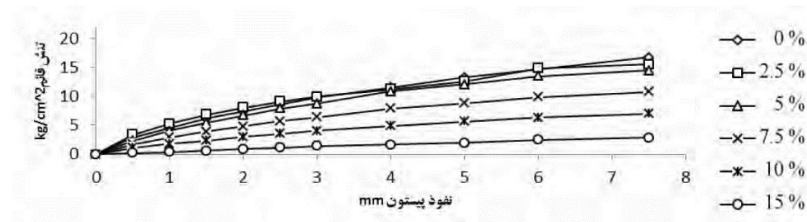
جدول (2-3) مقدار چگالی و درصد رطوبت بهینه در درصد های مختلف خرده لاستیک

درصد پودر	رطوبت بهینه	چگالی مرطوب در رطوبت 19 درصد
0	19	2/05
2/5	17	2/02
5	16	1/89
7/5	18	1/86



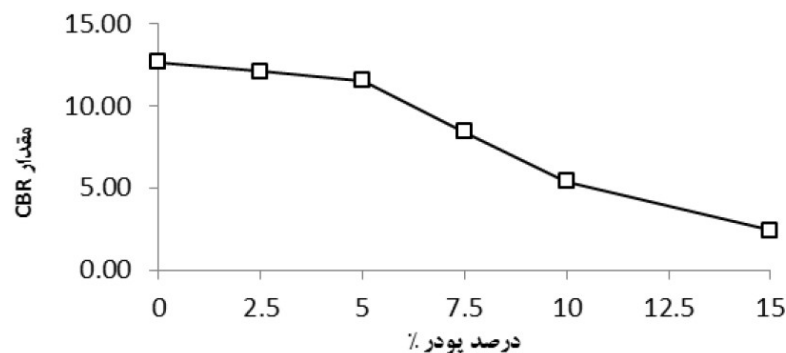
شکل (2-3) مقدار رطوبت بهینه بر اثر پودر لاستیک [11]

با توجه به شکل ۲-۳۷ می‌توان مشاهده کرد با افزودن پودر لاستیک به خاک رس خاک توانایی قبلی خود را در برابر بارهای وارده نداشته باشد و منحنی CBR به سمت پایین متمایل گردد. با بیشتر شدن پودر لاستیک خاک حالت الاستیک تری به خود گرفته و همچنین با افزایش نفوذ پیستون دیگر تنش قائم افزایش پیدا نمی‌کند این در حالی است که در مقادیر کمتر پودر لاستیک خاک با افزایش نفوذ پیستون تنش بیشتری تحمل کرده و منحنی روند صعودی خود را حفظ کرده است.



شکل (۲-۳۷) نمودار تنش قائم و نفوذ پیستون با درصدهای مختلف پودر لاستیک [11]

مقادیر CBR حاصل از منحنی‌ها در شکل زیر نشان داده شده است که کاهش محسوس CBR قابل رؤیت است این کاهش تا حدی است که خاک دیگر قابلیت باربری خود را از دست داده و بیشتر شبیه یک ماده الاستیک شده است.



شکل (۲-۳۸) تفاوت مقدار CBR با اضافه کردن پودر لاستیک [11]

از این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که کاهش چگالی خاک بر اثر افزودن پودر لاستیک با کاهش آن بر اثر افزودن ضایعات درشت تر متفاوت است. تفاوت آن در این است که در مقادیر کمتر پودر لاستیک خللی در تراکم خاک ایجاد نکرده و فقط جایگزین دانه های خاک می‌گردد. مقادیر بیشتر از ۱۵ درصد

پودر لاستیک مکانیزم تراکمی خاک را کاملاً مختل می‌کند. افزودن پودر لاستیک به خاک باعث کاهش توان باربری خاک می‌گردد در حالیکه ضایعات درشت تر باعث افزایش باربری می‌گردد. علت این امر آن است که ضایعات درشت تر به صورت مستقیم در ایجاد مقاومت می‌کنند در حالیکه پودر لاستیک از اصطکاک میان دانه ها می‌کاهد. [11]

در سال ۱۳۹۳ لشته‌نشایی و همکاران پژوهشی در خصوص ارزیابی مقاومت مخلوط‌های پودر لاستیک و ماسه در دستگاه برش مستقیم سیکلیک بزرگ مقیاس انجام گرفت. [12]

معمول‌ترین و در دسترس‌ترین وسیله برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک دستگاه برش مستقیم است. آزمایش برش مستقیم نسبت به سه محوری از دقت کمتری برخوردار است اما هزینه انجام آن نسبت به آزمایش سه محوری بسیار کمتر است و نتایج نسبتاً قابل قبولی در اختیار ما می‌گذارد.

دستگاه برش مستقیم اساساً مرکب از یک قوطی که در جهت افقی به دو قسمت تقسیم شده است. شکل نمونه از دستگاه را نشان می‌دهد. قسمت پایین دستگاه برش مستقیم به طور ثابت به پایه دستگاه اتصال یافته و بدون حرکت است در حالیکه قسمت بالایی آزاد است و می‌تواند در هر دو جهت افقی و قائم حرکت کند که مقدار حرکت را می‌توان به وسیله گیج اندازه‌گیری نمود.

مقاومت برشی توده خاک مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز دهد. برای تحلیل مسائل پایداری خاک نظیر ظرفیت فشاری، پایداری شیروانی‌ها و فشار جانبی بر روی سازه‌های حائل خاک لازم است. طبیعت مقاومت برشی به خوبی شناخته شود. آزمایش برش مستقیم یک نمونه از آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی خاک می‌باشد. این آزمایش روی نمونه خاک‌های دانه ای و چسبنده انجام می‌شود و هدف از آن تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک در خاک‌ها می‌باشد.

ماسه مورد آزمایش در این تحقیق از منطقه چاف استان گیلان می‌باشد و براساس دانه‌بندی این خاک در رده sp قرار گرفته است. این نوع ماسه دارای ضریب یکنواختی $1/25$ و ضریب انحنای $0/94$ است براساس منحنی دانه بندی این خاک در رده ماسه بد دانه بندی شده قرار گرفته است.

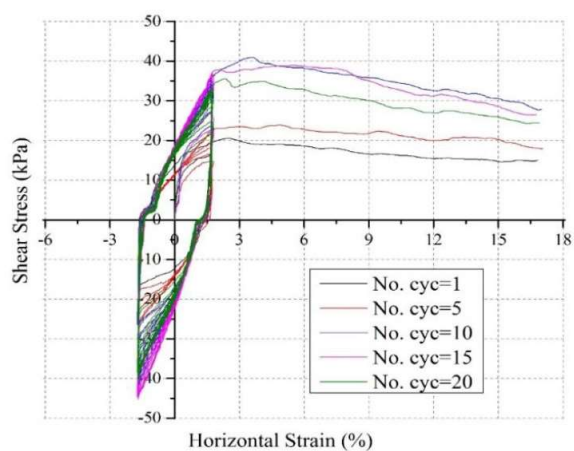
برای آزمایش، ماسه خالص مورد استفاده و بررسی قرار گرفت که برای ماسه خالص ۳ سربار مختلف انتخاب شد (۴۰ و ۸۰ و ۱۶۰ کیلو پاسکال) که تحت ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ سیکل بارگذاری با دامنه ۰/۵ سانتیمتر با نرخ کرنش ۶۰ سانتیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از تعداد سیکل‌های مشخص به صورت استاتیکی برش داده شدند.

شکل‌های ۲-۳۹، ۲-۴۰، ۲-۴۱ نتایج مربوط به تنش برشی در برابر کرنش افقی را برای تمامی حالت‌های

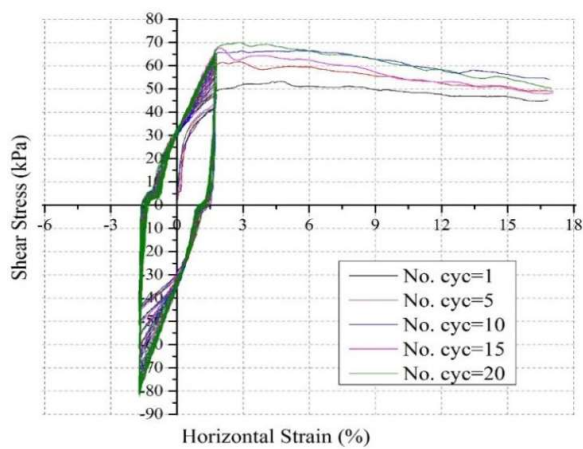
ممکن نشان می‌دهند. برای نمودارهایی با یک سیکل بارگذاری به طور مشخص مقدار مقاومت در انتهای سیکل بیشتر از حالت اولیه است که این افزایش ناشی تراکم نمونه در هنگام بارگذاری بوده است. برای تمامی نمودارهای مربوط به ماسه خالص چنین رفتاری مشاهده می‌شود. نکته قابل ذکر دیگر در مورد مقاومت بیشینه بعد از چرخه‌های بارگذاری این است که برای یک سیکل بارگذاری این مقاومت بیشینه با کمی فاصله از کرنش سیکلیک اتفاق می‌افتد، درحالی‌که با افزایش تعداد سیکل‌ها مقاومت نهایی بیشینه دقیقاً پس از اتمام سیکل‌های بارگذاری اتفاق می‌افتد. همچنین مقاومت نهایی در انتهای تست‌های بارگذاری همواره بیشتر از مقدار مقاومت در سیکل اول بارگذاری می‌باشند که نشانگر مقاومت بسیار کم نمونه‌ها در اول آزمایش می‌باشد.

به طور کلی می‌توان نتایج این آزمایش را در موارد زیر خلاصه کرد:

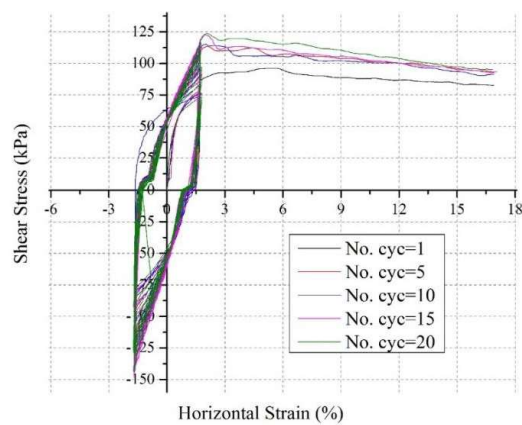
- در خاک ماسه خالص با افزایش چرخه بارگذاری مقدار مقاومت افزایش می‌یابد که این امر ناشی از شل بودن نمونه ماسه‌ای در ابتدا می‌باشد که رفته رفته متراکم می‌شود.
- برای ماسه با ۲۵ پودر لاستیک نتایج نشان می‌دهد، که مقاومت برشی با افزایش سیکل‌های بارگذاری افزایش دارد. تفاوت موجود در این نمودار نسبت به ماسه خالص این است که اختلاف بین مقاومت بیشینه سیکلیک و مقاومت نهایی بیشتر می‌شود که بیانگر تأثیر پودر لاستیک در برش نهایی می‌باشد.
- برای یک سیکل بارگذاری هر دو مقاومت برشی سیکلیک و بیشینه نهایی با افزایش لاستیک کاهش نشان می‌دهند، اما مقاومت نهایی بیشینه همواره بیشتر از سیکلیک می‌باشد و همچنین با افزایش سربار اختلاف مقاومت‌ها بیشتر می‌شود. برای ۲ سیکل بارگذاری نیز رفتار مشابهی دیده می‌شود. اما برای ۱۰ سیکل بارگذاری دیده می‌شود که مقاومت سیکلیک بیشینه روند کاهشی ملایمی داد، اما مقاومت نهایی بیشینه کاهش بسیار زیادی را نشان می‌دهد، به طوریکه مقاومت نهایی به مقدار مقاومت در سربار ۴۰ کیلوپاسکال می‌رسد. برای ۲۰ سیکل بارگذاری نیز رفتار تقریباً مشابهی دیده می‌شود. بعد از ۲۵ پودر لاستیک کاهش زیادی در مقاومت نهایی بیشینه دیده می‌شود.
- با افزودن پودر لاستیک مقاومت بیشینه سیکلیک و مقاومت استاتیکی نهایی در حالت کلی کاهش می‌یابد، اما مقدار تغییرات این پارامترها یکسان نیست. [12]



شکل (۲-۳۹) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12]



شکل (۲-۴۰) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12]



شکل (۲-۴۱) تنش برشی در برابر کرنش افقی [12]

جدول (۲-۴) لیستی از پژوهشگران و کارهای صورت گرفته در عرصه‌ی استفاده از خرده لاستیک

نتایج	عنوان مقاله	سال	نویسنده
آفاجانی	اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک	۱۳۹۰	کاهش درجه نفوذ، حساسیت حرارتی، خاصیت انگمی و دمای فراس، افزایش نقطه نرمی، نشانه درجه نفوذ، دمای بالای PG، نقطه نرمی و بازگشت پذیری
اسمادی	Properties of tire rubber ash mortar	۲۰۰۴	افزایش زمان گیرش ابتدایی و نهایی، مدول دینامیکی، فاکتور دوام ملات سیمانی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر ملات سیمانی
تابا و آراوینسن	Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials	۱۹۹۸	کاهش ماکزیمم چگالی خشک، سختی در برابر شکست، میزان تورم خاک در آب و کاهش مقاومت محصور شدگی خاک.
گوتلند	Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures	۲۰۰۵	جهت قرارگیری لاستیک‌ها بر مقاومت برشی خاک مؤثر است به این صورت که اگر به صورت افقی در نمونه‌ها باشند بیشترین تأثیر گذاری را دارند. مقدار بهینه محتوای لاستیک ۲۸ درصد است.
کتین	Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material	۲۰۰۶	افزودن بیش از ۳۰ درصد لاستیک سبب کاهش LL خاک و تا ۴۰ درصد سبب کاهش PL می‌شود. کاهش حداکثر وزن مخصوص و کاهش زاویه اصطکاک داخلی بی‌ازای ۴۰ درصد لاستیک ریز و درشت. افزایش مقاومت برشی بی‌ازای ۳۰ درصد ریزدانه و ۲۰ درصد درشت دانه.
هاتف و رحیمی	Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds	۲۰۰۶	شاخص BCR با افزودن تراشه‌های لاستیک افزایش می‌یابد. بهترین نسبت ابعادی برای تراشه‌های لاستیک ۴ می‌باشد.

تیواری	Geotechnical Properties of Dune sand-Waste Tires Composite	۲۰۱۷	مخلوط ماسه و لاستیک مقاومت برشی بیشتری نسبت به ماسه معمولی دارد. تنش برشی با افزایش تغییر شکل افقی افزایش می یابد. زاویه اصطکاک در ابتدا با افزایش درصد خرده لاستیک افزایش می یابد سپس با اضافه کردن بیشتر آن روند کاهشی دارد.
انوری	Effect of granulated rubber on shear strength grained sand of fine	۲۰۱۷	با افزودن خرده لاستیک و پودر لاستیک مقاومت بیشینه ماسه کاهش می یابد و باعث افزایش کرنش گسیختگی می شود یکی دیگر از تاثیرات این است که رفتار ماسه را از حالت سخت شونده به نرم شونده تغییر دهد و باعث کاهش اتساع نیز می شود. باعث کاهش اصطکاک داخلی ماسه و ایجاد چسبندگی ظاهری در آن می شود و با افزایش نسبت تسلیح کننده زاویه اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی افزایش می یابد.
پزشکی و امین فر	بررسی و قیاس اثر پودر لاستیک بر خاک با اثر ضایعات درشت تر لاستیک	۱۳۹۳	کاهش ماکزیمم چگالی خشک و مقدار CBR خاک
لشته نشایی	ارزیابی مقاومت مخلوط های پودر لاستیک و ماسه در دستگاه برش مستقیم سیکلیک بزرگ مقیاس	۱۳۹۳	در خاک ماسه خالص با افزایش چرخه بارگذاری مقدار مقاومت افزایش می یابد. برای یک سیکل بارگذاری هر دو مقاومت برشی سیکلیک و بیشینه نهایی با افزایش لاستیک کاهش نشان می دهند. مقاومت بیشینه سیکلیک و مقاومت استاتیکی نهایی در حالت کلی کاهش می یابد، اما مقدار تغییرات این پارامترها یکسان نیست.

فصل ۳:

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در فصل پیش رو مباحث مرتبط به بخش آزمایشگاهی تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد بررسی و پس از آن مشخصات دستگاهها و آزمایشهای مورد استفاده، استانداردهای آزمایشها و روشهای نمونه سازی و خصوصیات نمونهها برای هر آزمایش ارزیابی شده است.

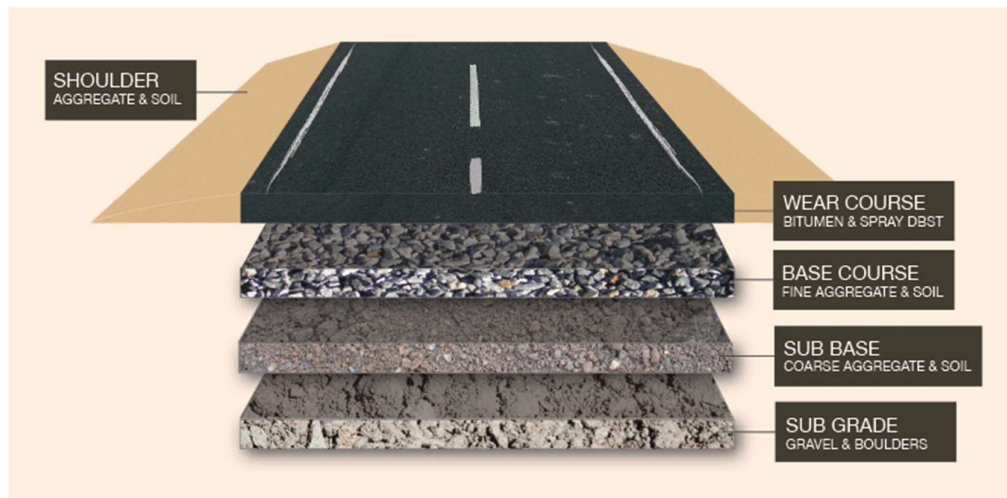
قشر اساس دومین قشر از روسازی راه است که با مشخصات و ضخامت معین روی قشر زیراساس و در تمام عرض آن اجرا می شود مصالح این قشر می تواند متشکل از سنگ کوهی شکسته، شن و ماسه رودخانه ای شکسته یا سرباره کوره های آهن گذاری و یا ماکادام باشد. این مصالح علاوه بر عملکرد عمومی سازه ای که در سیستم روسازی دارد باید دارای خصوصیات باشد که در زیر توضیح داده شده است. عملکرد قشر اساس در روسازی به شرح زیر می باشد:

۱- تحمل بارهای وارده: بارهای وارده از قشرهای بالاتر روسازی به وسیله این قشر تعدیل و به قشر زیراساس وارد می گردد، به طوری که تنش مجاز وارده سبب نشست و یا تغییر شکل غیر مجاز آن نشود.

۲- خاصیت تراوایی: قشر اساس که با مشخصات فنی معین تهیه و پخش می شود، دارای خاصیت تراوایی بیشتری نسبت به قشر زیراساس می باشد.

با توجه به نوع زمین و شرایط جوی و مصالح موجود در محل و میزان بار وارده و تعداد آمد و شد و همچنین وضع اقتصادی از انواع اساس به شرح زیر می توان استفاده نمود:

- اساس شنی و یا سنگی
- اساس ماکادامی
- اساس قیری



شکل (۱-۳) تصویر لایه‌های مورد استفاده در جاده

برای هر پروژه نوع اساس باید در دفترچه مشخصات خصوصی قید شود. مشخصات فنی، نحوه تهیه مصالح و اجرای عملیات اساس شنی - سنگی و ماکادامی به شرح زیر می‌باشد:

۱- اساس شن و ماسه ای شکسته: شن و ماسه حاصل از رودخانه‌ها را مشروط بر آن که دارای مشخصات فنی لازم باشد، می‌توان بعد از شکستن و تأمین دانه‌بندی و مشخصات لازم در قشر اساس به کار برد. سنگ‌های استخراج شده از معادن سنگ یا قلوه‌سنگ های درشت رودخانه‌ای در سنگ‌شکن‌ها، شکسته و سپس سرند می‌شود و بر اساس مشخصات تعیین شده در قشر اساس بکار می‌رود.

۲- اساس ماکادامی: اساس ماکادامی از سنگ کوهی و یا سنگ‌های رودخانه‌ای شکسته تشکیل می‌شود. این مصالح بر اساس مشخصات، پخش و سپس مصالح ریزدانه بر روی آن پخش شده و به روش خشک و یا مرطوب کوبیده می‌شود.

۳- اساس قیری: این قشر به عنوان اولین قشر روسازی بتن آسفالتی می‌تواند مستقیماً روی قشر زیراساس و یا اساس قرار گیرد. اساس قیری دارای دانه‌بندی درشت‌تر و مقدار قیر آن کمتر از آسفالت آستر و رویه می‌باشد. حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌های آن تا ۵۰ میلی‌متر و در مواردی نیز تا ۷۵ میلی‌متر می‌رسد.

از اساس قیری با دانه‌بندی باز به‌عنوان یک لایه زهکش به منظور تسریع در تخلیه آب‌های نفوذی به سیستم روسازی و یا جلوگیری از بازگشت ترک‌های آسفالت موجود در بهسازی‌ها با حداکثر اندازه

سنگ دانه‌های ۳۷/۵ تا ۵۰ میلی‌متر، متشکل از مصالح صد در صد شکسته، به عنوان لایه کنترل کننده ترک‌های انعکاسی استفاده می‌کنند.

در این پژوهش اساس شن و ماسه‌ای یا سنگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اساس با مصالح شن و ماسه شکسته و یا مصالح سنگ کوهی و یا قلوه‌سنگ شکسته شده باید دارای مشخصات فنی به شرح زیر باشد:

دانه بندی مصالح اساس با توجه به شرایط پروژه باید با یکی از دانه بندی‌های جدول زیر ۱-۳ مطابقت داشته باشد. این دانه‌بندی باید به موازات منحنی میانی دانه‌بندی انتخابی بوده و پیوسته باشد. که دانه‌بندی انتخابی در این پایان نامه دانه‌بندی شماره ۵ می‌باشد. بدلیل آنکه برای آزمایش CBR نباید اندازه سنگدانه بزرگتر از ۲۰ میلیمتر باشد دانه‌بندی شماره ۵ انتخاب می‌شود.

جدول (۱-۳) دانه‌بندی مصالح اساس

درصد وزنی رد شده از هر الک					شماره دانه بندی
V	IV	III	II	I	اندازه الک
---	---	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
---	۱۰۰	---	---	۹۵-۱۰۰	۳۷/۵ میلیمتر (۱/۵ اینچ)
۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۷۵-۹۵	۷۰-۸۵	۶۰-۸۰	۲۵ میلیمتر (۱ اینچ)
---	۶۰-۹۰	---	۶۰-۸۰	۷۰-۹۳	۱۹ میلیمتر (۳/۴ اینچ)
۵۰-۸۵	۴۵-۷۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۵۰-۷۰	۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)
۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۳۵-۵۵	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
۲۵-۵۰	۲۰-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	---	۲ میلیمتر (شماره ۱۰)
---	---	---	---	۱۲-۲۵	۰/۶ میلیمتر (شماره ۳۰)
۱۵-۳۰	۱۰-۳۰	۱۵-۳۰	۸-۲۰	---	۰/۴۲۵ میلیمتر (شماره ۴۰)
۲-۸	۲-۸	۲-۸	۲-۸	۲-۸	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)*

۲-۳- معرفی مصالح مورد استفاده و موضوع تحقیق

در این قسمت مصالح مورد استفاده، ایده تحقیق، پیش بینی آزمایش‌های مورد استفاده و انتظاراتی که از تغییر در مشخصات لایه اساس داریم بیان می‌شود.

مصالح مورد استفاده از کارخانه آسفالت میامی تهیه و خرده لاستیک‌ها در دو سایز مختلف از کارخانه بازیافت مشهود تهیه شده است. در این پایان‌نامه رفتار لایه اساس مورد بررسی قرار گرفته است و اینکه

اگر خرده لاستیک با در صد های مختلف حجمی جایگزین سنگدانه‌ها با سایزهای مختلف شود چه تأثیری در خصوصیات و رفتار لایه اساس گذاشته خواهد شد. در این پژوهش از دوسایز خرده لاستیک با ابعاد الک شماره ۴ و الک شماره $\frac{3}{8}$ استفاده شده است. که جایگزین سنگدانه‌ها با همین سایز می‌گردد. هدف ما این است که ببینیم چه تغییراتی در حداکثر وزن مخصوص و در صد رطوبت بهینه، ظرفیت باربری، مدول الاستیسیته و رفتار الاستیک خاک روی خواهد داد. با اضافه کردن خرده لاستیک انتظار داریم حداکثر وزن مخصوص به دلیل کمتر بودن وزن مخصوص خرده لاستیک نسبت به سنگدانه کمتر شود و در صد رطوبت بهینه افزایش یابد و درمورد ظرفیت باربری انتظار داریم ظرفیت باربری کاهش پیدا کند بدلیل مقاومت کمتر خرده لاستیک نسبت به سنگدانه این نتیجه پیش بینی می‌شود و همچنین انتظار داریم با اضافه کردن خرده لاستیک مدول الاستیسیته یا خاصیت ارتجاعی افزایش پیدا کند.

جهت بررسی موارد ذکر شده در فوق آزمایشاتی را می‌توان پیش‌بینی کرد این آزمایش‌ها شامل آزمایش تراکم اصلاح شده، آزمایش CBR، آزمایش PFWD و ... می‌باشد که در قسمت‌های بعدی راجع به چگونگی نمونه‌سازی برای هر آزمایش، نحوه انجام آزمایش و مشخصات دستگاه‌های استفاده شده به طور کامل توضیح داده شده است.

۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها

در این پایان نامه خرده لاستیک جایگزین سنگدانه با سایز الک ۴ و $\frac{3}{8}$ به صورت جایگزین حجمی با در صد های مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ در صد مورد نظر قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا وزن مخصوص سنگدانه‌های الک شماره ۴ و $\frac{3}{8}$ اندازه‌گیری و سپس وزن مخصوص خرده لاستیک اندازه‌گیری می‌شود. برای جایگزینی با خرده لاستیک با توجه به دانه‌بندی گفته شده سهم هر سنگدانه مشخص است و با مشخص بودن وزن مخصوص حجم مورد نیاز آن سنگدانه مشخص می‌شود و ۲۰، ۴۰ و ۶۰ در صد حجم آن محاسبه و با ضرب آن در وزن مخصوص خرده لاستیک مقدار مورد نیاز خرده لاستیک برای هر نمونه مشخص می‌شود. که روند محاسبه در رابطه زیر آورده شده است که در رابطه زیر X وزن سنگدانه مورد استفاده برای ساخت نمونه است. در روابط زیر Y حجم سنگدانه مورد نظر و $Z1$ حجم خرده لاستیک می‌باشد. مقدار مصالح و روش ساخت نمونه‌ها جهت آزمایش تراکم، CBR، PFWD

و بارگذاری استاتیکی در ادامه توضیح داده شده است.

$$X \times \frac{1}{\text{وزن مخصوص سنگدانه}} = Y$$

$$Z1 = Y \times \text{درصد جایگزینی مورد نظر}$$

وزن مخصوص خرده لاستیک $\times Z1 =$ مقدار خرده لاستیک مورد استفاده

وزن مخصوص سنگدانه مورد نظر $\times (Y - Z1) =$ مقدار سنگدانه مورد استفاده

نمونه سازی برای ساخت نمونه برای آزمایش تراکم و CBR به صورت مشابه انجام گرفت. وزن مصالح مورد نیاز برای این آزمایشات ۱۴ کیلوگرم بود که با درصد های مختلف خرده لاستیک جایگزین شد و وزن هر سنگدانه و خرده لاستیک در جدول ۳-۲ آورده شده است. برای آزمایش تراکم بعد از آن مصالح با هم مخلوط در صد مشخصی آب به آن اضافه می شود در ۵ لایه کوبیده می شود سپس وزن آن اندازه گیری می شود بعد از آن با اضافه کردن رطوبت مراحل قبل دوباره تکرار می شود و قطعا انتظار می رود در مراحل اول با اضافه کردن آب وزن خاک داخل قالب بیشتر شود یا به عبارتی مصالح بیشتری داخل قالب جای گیرد این مراحل تا جایی ادامه پیدا می کند که با اضافه کردن آب به مصالح وزن مصالح داخل قالب کم شود سپس با داشتن وزن ها و در صد رطوبت در هر مرحله می توان حداکثر وزن مخصوص خشک و در صد رطوبت بهینه را محاسبه کرد. برای ساخت نمونه CBR با توجه به آزمایش تراکم مقدار در صد رطوبت بهینه معلوم شده است سنگدانه ها و خرده لاستیک با یکدیگر مخلوط و در صد مشخص آب به آن اضافه می شود و در قالب ۶ اینچ در ۵ لایه کوبیده می شود و بعد از آن یک نمونه برای آزمایش CBR برده می شود و نمونه دیگر برای اشباع سازی داخل حوضچه آب تا ۹۶ ساعت قرار می گیرد و بعد از آن آزمایش CBR روی آن انجام می شود.

در ادامه روند ساخت نمونه برای در آزمایش pfwd و بارگذاری استاتیکی گفته می شود. برای ساخت نمونه برای این دو از قالب استوانه ای با قطر ۲۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده شد مقدار خاک مورد استفاده برای این آزمایش با داشتن نتایج آزمایش تراکم محاسبه و سهم هر ساین مشخص شد. سپس با در صد رطوبت بهینه نمونه را مخلوط می کنیم و در پنج لایه درون قالب ریخته و هر لایه ۱۰۰ ضربه می کوبیم بعد از آن آزمایش PFWD و بارگذاری استاتیکی روی آن انجام می گیرد. مقدار مورد نیاز برای هر آزمایش در جدول ۳-۳ آورده شده است

جدول (۲-۳) مقدار مصالح مورد نیاز برای هر آزمایش تراکم و CBR

CBR - 3/8 - 60	CBR - 3/8 - 40	CBR - 3/8 - 20	CBR - 4 - 60	CBR - 4 - 40	CBR - 4 - 20	CBR - 0	مقدار سنگدانه مورد استفاده از هر الک (g)
1955	2930	۳۹۱۰/۲	4900	4900	4900	4900	الک ۸/۳
2100	2100	2100	۸۴۱/۰۵	۱۲۵۷/۹	۱۶۸۷/۵	2100	الک ۴
2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	الک ۱۰
2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	الک ۴۰
2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	الک ۲۰۰
1024	681	۳۴۱/۵	-	-	-	-	خرده لاستیک سایز ۸/۳
-	-	-	۴۳۲/۶	۲۸۹/۸	۱۴۵/۳۲	-	خرده لاستیک سایز ۴

جدول (۳-۳) مقدار مصالح مورد نیاز برای هر آزمایش PFWD و بارگذاری استاتیکی

ESL- 3/8 - 60	ESL- 3/8 - 40	ESL- 3/8 - 20	ESL- 4 - 60	ESL- 4 - 40	ESL- 4 - 20	ESL - 0	مقدار سنگدانه مورد استفاده از هر الک (g)
3934	5854	8049	9930	10059	9943	9870	الک ۸/۳
4225	4195	4323	1704	2582	3406	4230	الک ۴
4225	4195	4323	4255	4311	4261	4230	الک ۱۰
4225	4195	4323	4255	4311	4261	4230	الک ۴۰
5633	5593	5763	5446	5747	5681	5640	الک ۲۰۰
2060	1360	703	-	-	-	-	خرده لاستیک سایز ۸/۳
-	-	-	876	594	294	-	خرده لاستیک سایز ۴
1312	1244	1319	1468	1460	1390	1325	آب مورد نیاز

۳-۴- معرفی دستگاه‌ها و آزمایش‌های انجام شده

در این قسمت تمامی آزمایش‌های انجام شده به همراه استانداردهای آزمایش‌های و دستگاه‌های مورد استفاده معرفی می‌گردد.

۳-۴-۱- آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت دانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت دانه از استاندارد ASTM C127 استفاده می شود. از این روش آزمایش می توان وزن مخصوص خشک (OD^1)، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (SSD^2)، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ دانه ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، سبد سیمی با سوراخ های $3/35$ میلی متری یا ریزتر، مخزن آب و الک های استاندارد می باشد. روش انجام آزمایش به صورتی است که ابتدا نمونه ها را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای 110 درجه سانتی گراد خشک کرده، سپس آن ها، برای مدت 1 تا 3 ساعت در دمای محیط قرار می گیرند تا خنک شوند. در ادامه سنگ دانه ها برای مدت 24 ساعت در آب با دمای محیط قرار می گیرند و سپس نمونه ها را از آب بیرون آورده و روی یک پارچه جاذب رطوبت پهن کرده تا لایه سطحی آب روی سنگ دانه ها از بین برود. وزن نمونه که در حالت اشباع با سطح خشک می باشد محاسبه می شود. پس از تعیین وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، نمونه را درون سبد سیمی قرار داده و وزن ظاهری آن ها در آب 21 تا 25 درجه سانتی گراد ثبت می شود. در نهایت نمونه تا رسیدن به وزن ثابت در دمای 110 درجه سانتی گراد خشک شده و 1 تا 3 ساعت در هوای محیط خنک می شود. در پایان وزن خشک مصالح سنگی نیز ثبت می شود. با داشتن 3 وزن ذکر شده و با استفاده از روابط $3-1$ تا $3-4$ موجود در استاندارد ASTM C127 وزن مخصوص ها و درصد جذب آب مصالح سنگی درشت دانه قابل محاسبه می باشد. این آزمایش برای سه نوع مصالح درشت دانه شامل مانده بر روی الک های 19 ، $9/5$ و $4/75$ میلی متر به صورت جداگانه به انجام رسید [۱۳].

$$\text{رابطه ۱-۳} \quad OD = \frac{\text{وزن خشک نمونه} \times 997.5}{\text{وزن غوطه وری نمونه} - \text{وزن SSD نمونه}}$$

$$\text{رابطه ۲-۳} \quad SSD = \frac{\text{وزن SSD نمونه} \times 997.5}{\text{وزن غوطه وری نمونه} - \text{وزن SSD نمونه}}$$

$$\text{رابطه ۳-۳} \quad \text{وزن مخصوص ظاهری} = \frac{\text{وزن خشک نمونه} \times 997.5}{\text{وزن غوطه وری نمونه} - \text{وزن خشک نمونه}}$$

$$\text{رابطه ۴-۳} \quad \text{درصد جذب آب} = \frac{\text{وزن خشک نمونه} - \text{وزن SSD نمونه}}{\text{وزن خشک نمونه}} \times 100$$

۳-۴-۲- آزمایش تعیین وزن مخصوص خرده لاستیک

جهت محاسبه وزن مخصوص پودر لاستیک، گرم مشخصی از ذرات لاستیک را در ابتدا انتخاب می‌شود. در ادامه همانطور که در شکل ۳-۳ مشخص است ظرف مشخص و دقیقی تا نقطه مشخص از نفت پر شده به طوری که حجم نفت داخل ظرف مشخص باشد (ظرف دارای نشانگر دقیق می‌باشد). سپس ذرات لاستیک در ظرف حاوی نفت، مستغرق می‌شود. تغییر حجم نفت موجود در ظرف را به کمک نشانه‌های موجود در ظرف یادداشت می‌گردد. تفاوت حجم اولیه و ثانویه ظرف، نشانگر حجم مقدار مشخص شده ذرات لاستیک می‌باشد. در نهایت با دانستن حجم و میزان گرم ذرات لاستیک مقدار وزن مخصوص ذرات لاستیک قابل محاسبه می‌باشد.



شکل (۳-۲) آزمایش تعیین وزن مخصوص خرده لاستیک

۳-۴-۳- آزمایش دانه بندی

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D422 به انجام می‌رسد. این روش آزمایش تعیین کمی توزیع ذرات خاک را پوشش می‌دهد. توزیع ذرات درشت‌تر از $75 \mu\text{m}$ (مصالح مانده روی الک ۲۰۰) با الک کردن تعیین می‌شود، درحالی که برای حفظ داده‌ها لازم، توزیع ذرات ریزتر از $75 \mu\text{m}$ به روش هیدرومتری تعیین می‌شود. [14]

با توجه به بند ۴-۴-۱-۲، نشریه‌ی ۲۳۴، مصالح مورد استفاده برای قشر اساس، باید با یکی از دانه بندی های جدول ۳-۱ باشد.

۳-۴-۴- آزمایش تراکم

این آزمایش طبق استاندارد شماره ASTM D1557 با کمک دستگاه تراکم دینامیکی به انجام رسید. برای نمونه های مورد نظر از روش C استفاده می‌شود به دلیل آنکه دانه‌بندی مورد نظر آن مانند دانه‌بندی این پژوهش است مشخصات کامل آزمایش تراکم استفاده شده در جدول ۳-۴ آمده است. به‌طورکلی این آزمایش جهت تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌های خاکی انجام می‌شود. در این آزمایش ذرات لاستیک با درصد های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به صورت حجمی جایگزین مصالح سنگی مانده روی الک نمره $\frac{3}{8}$ و ۴ و گذشته از الک نمره $\frac{3}{4}$ و $\frac{3}{8}$ شدند [۱۵].

جدول (۳-۴) مشخصات آزمایش تراکم اصلاح شده [۱۵]

خاک مورد آزمایش	تعداد لایه	تعداد ضربات در هر لایه	مشخصات چکش تراکم		مشخصات استوانه تراکم		
			ارتفاع سقوط (اینچ)	وزن چکش (پوند)	حجم قالب (سانتی متر مکعب)	ارتفاع قالب (اینچ)	قطر قالب (اینچ)
کمتر از ۳۰ درصد مانده روی الک $\frac{3}{4}$	5	56	18	10	2124	4/584	۶



شکل (۳-۳) آزمایش تراکم اصلاح شده

۳-۴-۵- آزمایش لس آنجلس

در این آزمایش مقاومت ساییدگی دانه‌های سنگی درشت‌دانه‌ی کوچک‌تر از ۳۷/۵ میلی‌متر به‌وسیله دستگاه لس آنجلس طبق استاندارد ASTM D131 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جهت انجام آزمایش ابتدا به کمک جدول ۳-۴ یکی از دانه‌بندی‌های مشخص شده را انتخاب کرده و سپس با توجه به دانه‌بندی انتخاب شده و جدول ۳-۵ تعداد گوی‌ها مورد نیاز جهت انجام آزمایش انتخاب شد. در این پژوهش از روش B و تعداد ۱۲ گوی استفاده شد. در ابتدای این آزمایش مقدار ۲۵۰۰ گرم از مصالح سنگی را در دستگاه ریخته و سپس ۵۰۰ دور چرخش به دستگاه اعمال می‌شود. پس از اتمام چرخش مصالح بر روی الک نمره ۱۲ شسته شده و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه ۳-۹ درصد سایش لس آنجلس به دست می‌آید [۱۶].

$$\text{درصد سایش لس آنجلس} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

جدول (۳-۵) میزان وزن در آزمایش لس آنجلس [۱۶]

وزن نمونه به گرم				اندازه الک به میلیمتر	
D	C	B	A	مانده روی الک	رد شده از الک
-	-	-	1250	25	۳۷/۵
-	-	-	1250	۱۹/۱	25
-	-	2500	1250	۱۲/۵	۱۹/۱
-	-	2500	1250	۹/۵	۱۲/۵
-	2500	-	-	۶/۳	۹/۵
-	2500	-	-	۴/۷۵	۶/۳
5000	-	-	-	۲/۳۶	۴/۷۵

۳-۴-۶- آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها در راهسازی آزمایش CBR که توسط دستگاه CBR انجام می‌گیرد. این آزمایش به دو صورت خشک و اشباع انجام می‌گیرد. دستگاه CBR خاک شامل دستگاه CBR دستی، CBR دیجیتالی - اتوماتیک می‌باشد. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش دستگاه CBR اتوماتیک می‌باشد. که مجهز به لود سل ۳۰ کیلو نیوتن به دقت ۱۰ نیوتن و دارای جابجایی سنج برای تعیین نفوذ با دقت ۰/۰۱ میلیمتر می‌باشد. عملکرد بارگذاری در این دستگاه با موتور گیربکس و خروجی یکنواخت بارگذاری می‌باشد و تمام مراحل بعد از قرار دادن قالب به صورت اتوماتیک انجام می‌پذیرد. اعداد نیرو و نفوذ در حین آزمایش بر روی مانیتور قابل مشاهده است که نیرو را با واحد نیوتن و نفوذ را بر حسب میلیمتر نمایش می‌دهد. تصویر دستگاه در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است.

به‌طور کلی آزمایش نفوذ کالیفرنیا شامل اعمال بار به سطح آزمونه تعریف می‌شود که نتایج این آزمایش‌ها جهت بررسی خاک مورد نظر برای طراحی روسازی کاربرد دارد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D1883 انجام می‌شود که شرح مختصری از نحوه انجام این استاندارد و ویژگی‌های آن در ادامه توضیح داده می‌شود. طبق بند 1,2,4 در این استاندارد، آزمایش‌های نفوذ CBR، در میزان رطوبت‌هایی به‌دست آمده از آزمایش تراکم طبق بند ۳-۷ صورت می‌گیرد.



شکل (۳-۴) دستگاه آزمایش CBR

طبق بند 1,1,7 استاندارد ASTM D1883 این آزمایش تنها بر روی خاک‌هایی انجام می‌شود که تمام مصالح آن از الک نمره $\frac{3}{4}$ گذشته باشد.

استاندارد ASTM D1883 نشان می‌دهد که به‌طور کلی این آزمایش به دو صورت خشک و اشباع صورت می‌پذیرد که در ادامه توضیح داده می‌شود:

الف) آزمایش روی نمونه خشک: در این روش حدود ۷ کیلوگرم از مصالح رد شده از الک با اندازه $\frac{19}{5}$ میلی‌متر، با توجه به دانه‌بندی انتخاب شده طبق بند ۳-۶ جدا شده و سپس با توجه به رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم، نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای با قطر داخلی ۶ و

ارتفاع ۷ آماده سازی می شوند. در ادامه نمونه به همراه ۵ کیلوگرم سربار زیر گیج بارگذاری دستگاه سی بی آر قرار می گیرد. روند آزمایش طبق بند ۳,۹ این استاندارد به گونه ای است که پیستون بارگذاری با نرخ ۱/۲۷ در حدود ۱ میلی متر (۰/۰۵ اینچ) بر دقیقه بر نمونه اعمال می شود. این روند تا نفوذ ۱۲ میلی متری پیستون در نمونه ادامه می یابد و جهت رسیدن به جواب صحیح تر برای هر درصد از جایگزینی لاستیک (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد جایگزین مصالح سنگی مانده روی الک $\frac{3}{8}$ و ۴ در خاک لایه اساس) حداقل سه نمونه ساخته شد.

در این آزمایش در نهایت مقدار CBR از رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{مقدار نیرو (کیلوگرم)} \times 100 = \frac{\text{مقدار CBR خاک در مقدار نفوذ } 0.1 \text{ اینچ پیستون}}{1366} \quad (1-3)$$

$$\text{مقدار نیرو (کیلوگرم)} \times 100 = \frac{\text{مقدار CBR خاک در مقدار نفوذ } 0.2 \text{ اینچ پیستون}}{2040} \quad (2-3)$$



شکل (۳-۵) فرآیند اشباع سازی نمونه ها جهت آزمایش CBR

ب) آزمایش روی نمونه اشباع: روند متراکم کردن این روش مشابه آنچه در روش خشک گفته شد می-باشد. پس از متراکم سازی، نمونه ها برای مدت ۹۶ ساعت درحالی که سرباری معادل ۵ کیلوگرم بر روی آنها قرار دارد در آب غوطه ور می شوند که روند آن در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. پس از اتمام مرحله غوطه وری، نمونه ها از آب خارج شده و برای مدت ۱۵ دقیقه صبر کرده تا آب اضافی موجود در نمونه ها از آنها خارج شود و سپس سایر موارد اعمال بار و غیره مطابق با روش سی بی آر خشک به انجام می رسد. در نهایت میزان مقاومت CBR نمونه مطابق روابط ۳-۱۳ و ۳-۱۴ به دست می آید. [۱۷].

۳-۴-۷- آزمایش بارگذاری استاتیکی

اجزای دستگاه مدل سازی فیزیکی جدید عبارتند از: محفظه ی آزمایش، سیستم و قاب بارگذاری و سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده ها. طراحی و عملکرد این قسمت ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۴-۷-۱- محفظه مورد استفاده

محفظة استفاده شده در این آزمایش قالب استوانه ای شکل به ارتفاع ۳۰ سانتی متر و قطر ۲۵ سانتی متر می باشد که بر روی یک پایه به ارتفاع ۹۰ سانتی متر قرار میگیرد. در این پژوهش هفت نمونه مورد بررسی قرار گرفت. مقدار لازم نمونه ها با استفاده از درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک که با آزمایش تراکم بدست آمد محاسبه شد. روش ساخت اینگونه بود که خاک در پنج لایه ریخته و هرلایه توسط چکش ۱۰ پوند ۱۰۰ ضربه کوبیده شد و سپس زیر بار قرار گرفت.

۳-۴-۷-۲- سیستم بارگذاری و سنسورها (LVDT):

به منظور اعمال بارهای استاتیکی و سیکلی مد نظر از سیستم اکچویاتور استفاده شده است. سیستم بارگذاری قابلیت اعمال بارهای دینامیکی و استاتیکی را دارد. با استفاده از این دستگاه می توان بارهای

مونوتونیک و هارمونیک سینوسی را تا فرکانس‌های مشخص روی سازه‌ی مورد نظر بارگذاری کرد، بارگذاری وارده می‌تواند هم به صورت کرنش کنترل و هم تنش کنترل باشد. این دستگاه دارای یک چارچوب فلزی H شکل بوده که در داخل بتن به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر به منظور نصب سیستم بارگذاری به صورت قائم و جانبی دفن شده است. سیستم بارگذاری شامل یک پمپ هیدرولیک (سیستم پاورپک) به منظور تامین فشار و یک اکچویتور می‌باشد. سیستم بارگذاری همچنین از یک سرووال، حسگر جابه‌جایی و اکومولاتور به منظور جبران کمبود دبی روغن در بارگذاری‌های دینامیکی تشکیل شده است. در این آزمایش بارگذاری به صورت استاتیکی به وسیله پیستون CBR با قطر ۵ سانتی‌متر و نرخ بارگذاری ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه همانند آزمایش CBR انجام گرفت. همچنین در این آزمایش از دو عدد سنسور در فواصل ۳/۵ و ۷ سانتی‌متر از دیواره قرار گرفت تا جابجایی‌های نقاط مختلف روی سطح خاک بین پیستون و دیواره اندازه‌گیری شود و جابجایی زیر پیستون نیز توسط خرده پیستون اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۴-۷-۳- سیستم کنترل، قرائت و ثبت داده‌ها :

به منظور سرعت بالای پردازش داده‌های دریافتی از مدل و همچنین دقت و صحت انجام آزمایش‌ها از سیستم کامپیوتری همراه با نرم‌افزار استفاده گردیده است. سیستم نرم‌افزاری قادر به کنترل بارگذاری از طریق اعمال بارهای استاتیکی تا میزان و سرعت معین و همچنین اعمال بارهای دینامیکی تا فرکانس و دامنه مشخص می‌باشد. دریافت داده‌ها از سنسورهای تعبیه شده در مدل با قابلیت اطمینان بالا و البته توانایی ذخیره‌سازی از دیگر دلایل استفاده از سیستم کامپیوتری می‌باشد. لازم به ذکر است بهره‌برداری‌ها و قرائت‌های دستی خطاهای آزمایش را زیاد می‌کند. اکچویتور خطی دارای یک سنسور موقعیت و یک فشارسنج می‌باشد. سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی (LVDT) جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها استفاده می‌شود. سنسور اندازه‌گیری بار محوری نیز load cell می‌باشد که دارای ظرفیت کششی و فشاری مشخص و دارای کیفیت و دقت مناسب برای انجام آزمایش‌های سیکی می‌باشد. دیتالاگر در نظر گرفته شده نیز وظیفه‌ی تبادل اطلاعات بین سیستم کنترلر و سنسورها را دارد. در انتها لازم به ذکر است وظیفه‌ی تامین برق سیستم بر عهده تابلو برق می‌باشد.



شکل (۳-۶) مراحل بارگذاری استاتیکی و محل قرارگیری LVDT

۳-۴-۸- آزمایش PFWD

تجهیزات افت و خیزسنج ضربه‌ای یکی از تجهیزات غیر مخرب متداول در ارزیابی مقاومت سازه‌ای روسازی‌های انعطاف‌پذیر هستند. آزمایش‌های انجام شده با این تجهیزات تحت عنوان آزمایش‌های سنجش خیز در اثر وزنه سقوطی یا FWD نامیده می‌شوند. این تجهیزات به‌طور گسترده‌ای در جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند چرا که بار وارده از چرخ وسیله نقلیه را بهتر از سایر تجهیزات غیر مخرب شبیه‌سازی می‌کنند.

عملکرد این تجهیزات به این گونه است که یک وزنه با جرم مشخصی از یک ارتفاع خاص بر روی یک صفحه فولادی سقوط می‌کند و ضربه حاصله به روسازی منتقل شده و پاسخ روسازی با ثبت شکل‌های سطحی عمودی در فواصلی مشخص از محل اعمال بار با استفاده از ژئوفون‌ها ثبت می‌شود. با توجه به تحقیقات زیاد صورت گرفته در زمینه به کارگیری دستگاه FWD برای ارزیابی روسازی آسفالتی، در حال حاضر FWD به‌عنوان یک دستگاه آزموده شده و قابل اطمینان شناخته می‌شود و از آن می‌توان به‌عنوان یک آزمایش استاندارد و مبنا برای سایر آزمایش‌های دینامیک صفحه‌ای استفاده نمود. ولی دستگاه FWD ممکن است برای ارزیابی روزمره روسازی‌های در حال ساخت مناسب نباشد؛ به خصوص در محل‌هایی که محدودیت دسترسی به علت کشنده بودن آن وجود دارد و یا مناطقی که از لحاظ مقیاس و تعداد آزمایش برای استفاده FWD غیر اقتصادی است. علاوه بر این، در ارزیابی‌هایی که تنش‌های پایین مدنظر می‌باشد و نیازی به حوضچه کامل افت و خیز نیست، استفاده از FWD به دلیل هزینه و پیچیدگی زیاد آن چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. به همین دلیل از سال ۲۰۰۰،

برای کنترل کیفیت ساخت خاکریزها و مصالح غیرچسبنده، دستگاه‌های PFWD ارائه شدند که فن‌آوری آن خیلی ساده‌تر از FWD بوده و قابلیت حمل دستی دارند. PFWD یک روش کنترل کیفی آسان، مفید و ابزار تحقیقاتی مناسبی برای روسازی است؛ البته کاربر باید یک فهم خوب از نحوه کارکرد دستگاه داشته باشد. با توجه به جدید بودن و تنوع این دستگاه‌ها، تحقیقات مختلفی در مورد به‌کارگیری PFWD در کنترل کیفیت لایه‌های غیر چسبنده روسازی در حال اجرا می‌باشد. یکی از خروجی‌های اصلی دستگاه PFWD، مدول ارتجاعی بستر می‌باشد.

روش آزمایش PFWD از نوع آزمون بارگذاری می‌باشد. بارگذاری به وسیله‌ی سقوط یک وزنه (جرم) بر روی یک سیستم ضربه‌گیر و انتقال پالس نیرویی تولید شده به صفحه بارگذاری واقع بر روی مصالح صورت می‌پذیرد. نحوه انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM E 2583-07 به شرح زیر می‌باشد:



شکل (۷-۳) دستگاه PFWD نمونه مورد آزمایش

در این آزمایش ابتدا سطح نمونه آزمایش باید تمیز و مسطح شود و تمامی سنگ‌دانه‌های شل و غیر متعارف از سطح آزمون برداشته شود. سپس صفحه بارگذاری و حسگرها به گونه‌ای پایدار بر روی سطح نمونه آزمایش قرار می‌گیرند که در شکل ۷-۳ نمایش داده شده است. در ادامه وزنه را تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بالا برده و سپس اجازه داده می‌شود تا وزنه آزادانه سقوط کند. پس از رها شدن وزنه، اعداد نمایش داده شده بر روی مانیتور که شامل E و K می‌باشد ثبت می‌شود.

این دستگاه مدول الاستیسیته را با استفاده از روش بوسینسک و مطابق با رابطه ۳-۳ محاسبه می‌کند.

$$E = \frac{S(1-\vartheta^2)P}{\pi aD} \quad (3-3)$$

در این رابطه D حداکثر خیز مصرفی، ضریب پواسون، a شعاع صفحه بارگذاری، P حداکثر نیروی وارده به صفحه و S برابر با ۲ می‌باشد.

جهت آماده سازی نمونه، در ابتدا خاک‌ها در پنج لایه در قالب آزمایش ریخته می‌شوند و هر لایه توسط ۱۰۰ ضربه در رطوبت بهینه کوبیده می‌شود. ارتفاع هر لایه خاک ریخته شده پس از تراکم تقریباً ۵ سانتی متر می‌باشد و آزمایش PFWD در حالت خشک صورت می‌گرفت [۱۸].

۳-۵- نامگذاری آزمایش‌ها و علائم اختصاری

نام آزمایش	نمونه مورد آزمایش و ساینز الک جایگزین شده	درصد خرده لاستیک	علامت اختصاری
تراکم	کنترل	0	MP- 0
تراکم	شماره ۴	20	MP - 4 -20
تراکم	شماره ۴	40	MP - 4 -40
تراکم	شماره ۴	60	MP - 4 -60
تراکم	شماره ۸/۳	20	MP - 3/8 -20
تراکم	شماره ۸/۳	40	MP - 3/8 -40
تراکم	شماره ۸/۳	60	MP - 3/8 -60
نسبت باربری کالیفرنیا	کنترل	0	CBR- 0
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۴	20	CBR - 4 -20
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۴	40	CBR - 4 -40
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۴	60	CBR - 4 -60
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۸/۳	20	CBR - 3/8 -20
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۸/۳	40	CBR - 3/8 -40
نسبت باربری کالیفرنیا	شماره ۸/۳	60	CBR - 3/8 -60
PFWD	کنترل	0	PFWD - 0
PFWD	شماره ۴	20	PFWD - 4 -20
PFWD	شماره ۴	40	PFWD - 4 -40
PFWD	شماره ۴	60	PFWD - 4 -60
PFWD	شماره ۸/۳	20	PFWD - 3/8 - 20
PFWD	شماره ۸/۳	40	PFWD - 3/8 - 40
PFWD	شماره ۸/۳	60	PFWD - 3/8 - 60
بارگذاری استاتیکی	کنترل	0	ESL - 0
بارگذاری استاتیکی	شماره ۴	20	ESL - 4 -20
بارگذاری استاتیکی	شماره ۴	40	ESL - 4 -40
بارگذاری استاتیکی	شماره ۴	60	ESL - 4 -60

ESL - 3/8 -20	20	شماره ۸/۳	بارگذاری استاتیکی
ESL - 3/8 -40	40	شماره ۸/۳	بارگذاری استاتیکی
ESL - 3/8 -60	60	شماره ۸/۳	بارگذاری استاتیکی

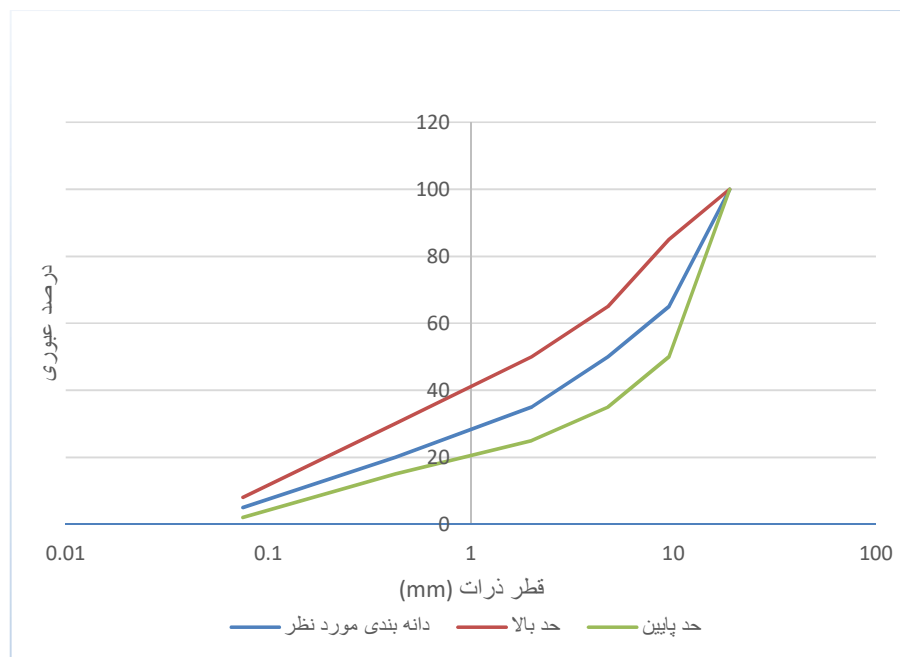
فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها

۴-۱- مقدمه

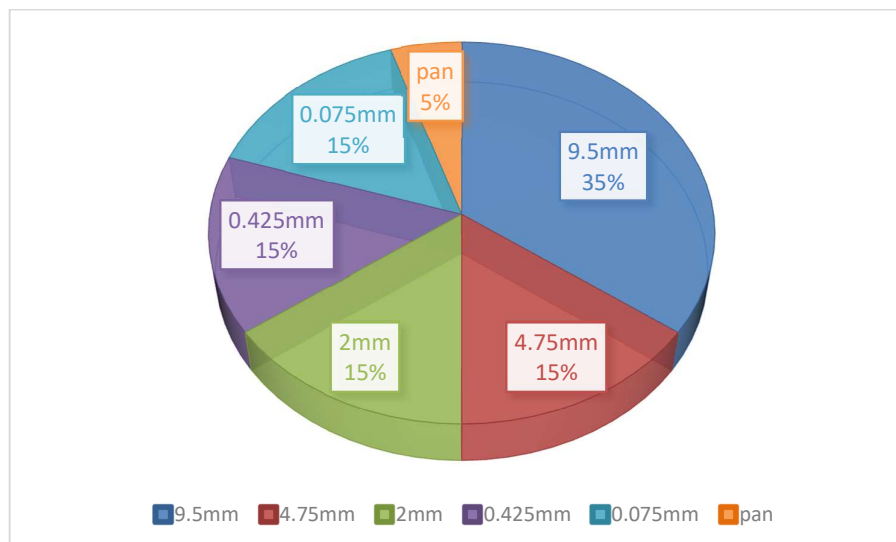
فصل‌های گذشته به مرور تحقیق‌های انجام شده توسط محققان و توضیح روند انجام آزمایشات صورت گرفته، اختصاص یافت. در این فصل به بیان نتایج حاصل از تمام آزمایشات صورت گرفته پرداخته و نتایج حاصل از افزودن خرده لاستیک بر ویژگی‌های لایه اساس راه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- تعریف آزمایش دانه بندی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع مصالح شن و ماسه کوهی می‌باشد که از منبع قرضه‌ای واقع در کیلومتر ۵ جاده میامی تهیه شد. نتایج حاصل از آزمایشات دانه‌بندی همان‌طور که از نمودار ۴-۱ مشخص است، نشان داد که مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش با دانه‌بندی نوع ۵ از جدول ۳-۱ مطابقت دارد.



شکل (۴-۱) دانه بندی انتخاب شده برای نمونه‌ها



شکل (۴-۲) درصد وزنی مانده روی هر الک

۴-۳- نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت دانه

با توجه به فرمول‌های ۱-۳ تا ۴-۳ وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت‌دانه برای مصالح مانده بر روی سه الک ۱۹ میلی‌متر، ۹/۵ میلی‌متر و ۴/۷۵ میلی‌متر به‌طور جداگانه به دست آمد و نتایج آن در جدول ۴-۱ آن آمده است.

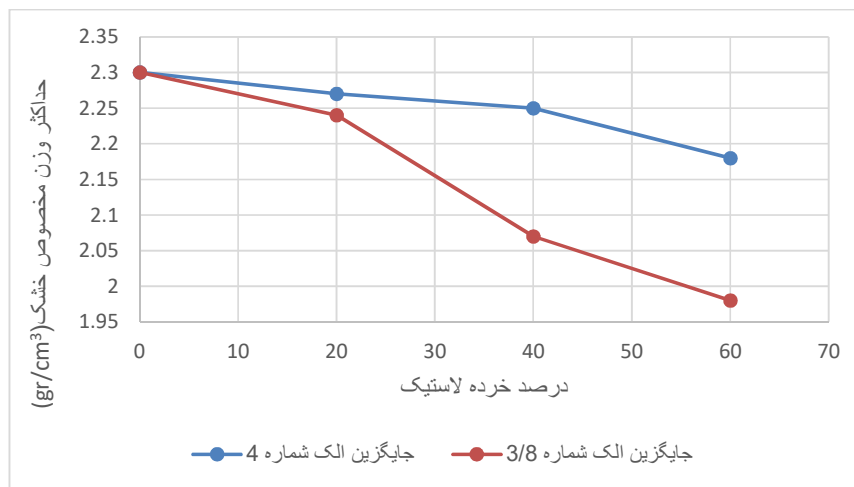
جدول (۴-۱) نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص

ابعاد مصالح	وزن مخصوص OD	وزن مخصوص SSD	وزن مخصوص ظاهری	درصد جذب آب
مانده بر روی الک ۹/۵ میلی‌متر	2688	2696	2711	۰/۳۱
مانده بر روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر	2693	2702	2719	۰/۳۴

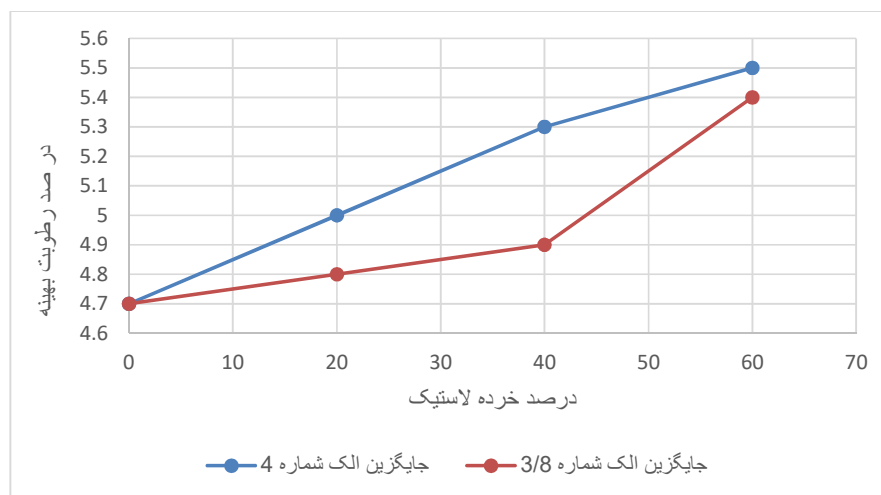
۴-۴- نتایج آزمایش تراکم با درصد‌های مختلف خرده لاستیک

این آزمایش به‌صورت کلی روی هفت نوع مختلف از نمونه‌های خاکی انجام شد که میزان درصد رطوبت بهینه و ماکزیمم وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در شکل‌های ۴-۲ و ۴-۳ آورده شده است.

همان‌طور که از شکل ۴-۲ مشخص است، افزودن تکه‌های لاستیک به دانه‌بندی لایه اساس موجب کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک می‌شود که علت این امر ناشی از وزن مخصوص کمتر قطعات لاستیک در مقایسه با ذرات سنگی است؛ از طرف دیگر شکل ۴-۳ نشان می‌دهد که با افزودن خرده لاستیک به خاک درصد رطوبت بهینه خاک افزایش یافته که علت این امر می‌تواند خاصیت جذب سطحی آب توسط خرده لاستیک‌ها باشد.



شکل (۴-۳) مقایسه حداکثر وزن مخصوص خشک با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک $\frac{3}{8}$ و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک



شکل (۴-۴) مقایسه درصد رطوبت بهینه با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک $\frac{3}{8}$ و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک

۴-۵- نتایج آزمایش لس آنجلس

در این آزمایش ۲۵۰۰ گرم از مصالح سنگی به همراه ۱۲ گوی فلزی در دستگاه لس آنجلس قرار داده شد و پس از اتمام آزمایش و شسته شدن مصالح سنگی بر روی الک مقدار ۱۹۵۳ گرم از مصالح باقی ماند که با توجه به رابطه ۳-۱۰ میزان درصد سایش لس آنجلس با مقدار ۲۱/۸۸ برابری می کند.

$$\text{درصد سایش لس آنجلس} = \frac{2500-1953}{2500} \times 100 = 21/88$$

۴-۶- نتایج حاصل از آزمایش CBR

آزمایش CBR در دو حالت خشک و اشباع انجام گرفت و در هر دو حالت نفوذ ۰/۱ و ۰/۲ اینچ پیستون اندازه گیری می شود و هر کدام که مقدار بیشتری را نشان دهد مبنای عدد CBR قرار می گیرد.

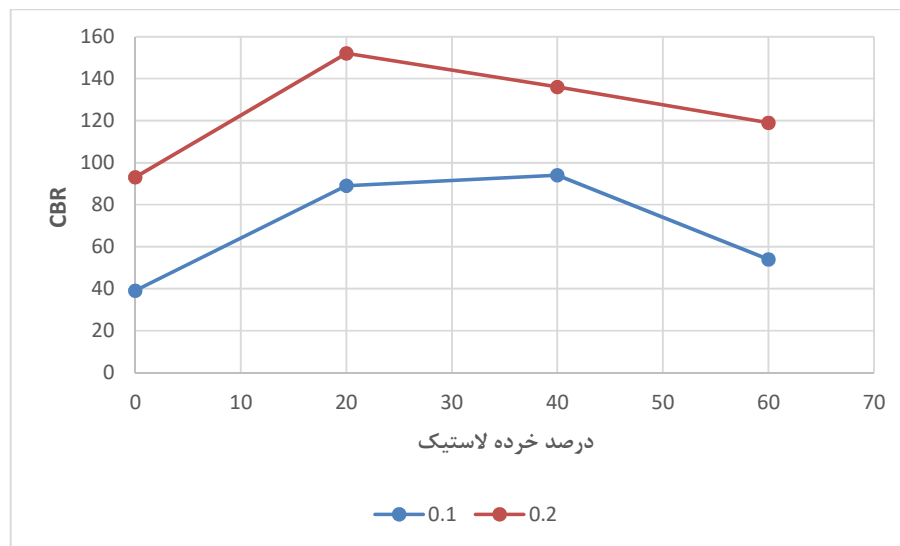
۴-۶-۱- نتایج آزمایش CBR در حالت خشک

بنا به استاندارد ASTM D1883 میزان CBR بر حسب نسبت بار واحد لازم برای نفوذ پیستون به اندازه ۲/۵ میلی متر (۰/۱ اینچ) و ۵ میلی متر (۰/۲ اینچ) در خاک مورد آزمایش به بار واحد لازم برای نفوذ مصالح استاندارد تعریف می شود. همان طور که گفته شد میزان CBR بر اساس دو میزان نفوذ ۲/۵ میلی متر و ۵ میلی متر محاسبه می شود و بنا به آیین نامه هر کدام که مقدار بیشتری را نشان داد به عنوان CBR نمونه خاکی باید گزارش کرد. با توجه به رابطه ۳-۱ و رابطه ۳-۲ مقدار CBR برای هفت نوع خاک با درصدهای مختلف لاستیک محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴-۲ تا ۴-۵ آمده است.

همان طور که از نتایج به دست آمده از آزمایش ها مشخص است، مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۲ اینچ (۵ میلی متر) پیستون از مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۱ اینچ (۲/۵ میلی متر) بیشتر شده و بنا به آیین نامه CBR مربوط به ۰/۲ اینچ به عنوان نسبت باربری کلی خاک باید در نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده در جدول ۴-۲ و ۴-۳ نشان می دهد که افزودن خرده لاستیک در هردو سایز به خاک باعث افزایش مقدار CBR خشک در مقدار ۲۰ درصد و سپس روند کاهشی در درصدهای بیشتر داشته است.

جدول (۴-۲) مقادیر CBR خشک بازای درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴

انواع نمونه	نفوذ ۰/۱ اینچ	نفوذ ۰/۲ اینچ
CBR - 0	۳۹	۹۳
CBR - 4 - 20	۸۹	۱۵۲
CBR - 4 - 40	۹۴	۱۳۶
CBR - 4 - 60	۵۴	۱۱۹

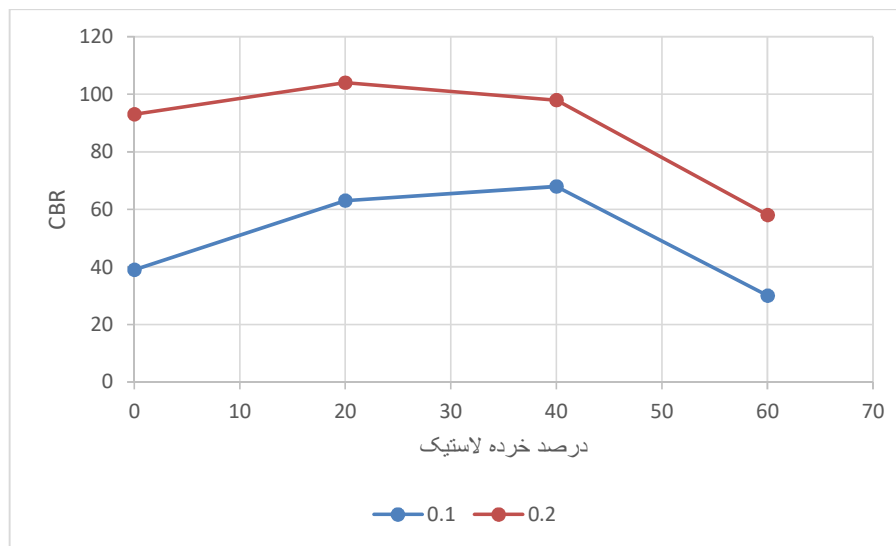


شکل (۴-۵) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR خشک با ۴۰، ۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴

مقدار CBR از ۹۳ برای نمونه کنترل به مقدار ۱۵۲، ۱۳۶ و ۱۱۹ به ترتیب به ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده بر روی الک نمره ۴ و به مقدار ۱۰۴، ۹۸ و ۵۸ به ترتیب بازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده روی الک $\frac{3}{8}$ شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۲-۴ و ۳-۴ نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک در هردو سایز به خاک باعث افزایش مقدار CBR خشک در تمامی سایزها گردیده و روند آن بعد از ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

جدول (۳-۴) مقادیر CBR خشک بازای درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$

انواع نمونه	نفوذ ۰/۱ اینچ	نفوذ ۰/۲ اینچ
CBR - 0	۳۹	۹۳
CBR - 4 - 20	۶۳	۱۰۴
CBR - 4 - 40	۶۸	۹۸
CBR - 4 - 60	۳۰	۵۸



شکل (۴-۶) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR خشک با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$

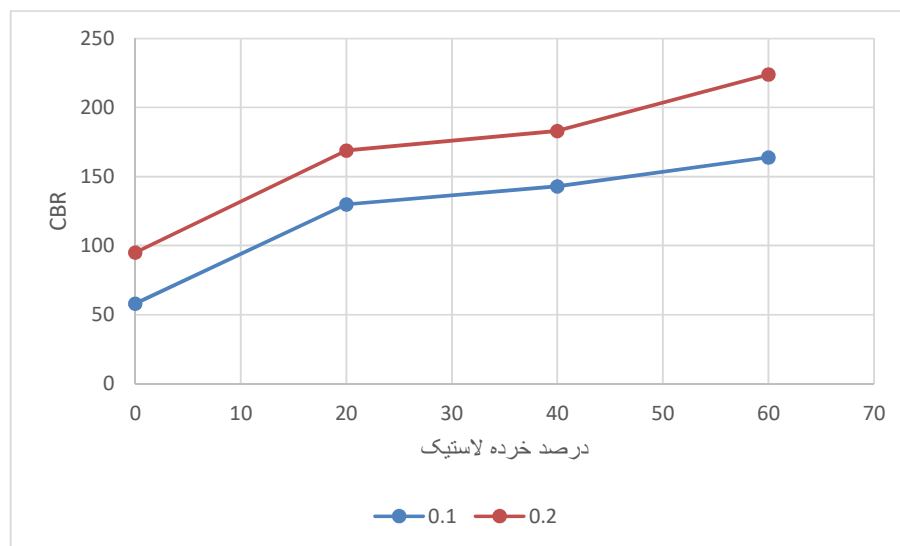
۴-۶-۲- نتایج آزمایش CBR در حالت اشباع

همان طور که در بخش ۴-۱۲-۱ گفته شد، نسبت باربری کالیفرنیا به ازای میزان نفوذ ۰/۱ و ۰/۲ اینچ پیستون در نمونه مورد بررسی قرار می گیرد و هر کدام که بیشتر باشد به عنوان میزان CBR نمونه خاکی گزارش می شود.

پس از ۹۶ ساعت عمل آوری نمونه، آن را از آب خارج کرده و پس از خروج آب از نمونه، نمونه زیر گیج بارگذاری دستگاه سی بی آر قرار داده می شود. نتایج کامل آزمایش CBR در حالت اشباع در جدول ۴-۴ و ۴-۵ آمده است.

جدول (۴-۴) مقادیر CBR اشباع بازی درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴

انواع نمونه	نفوذ ۱۰/۱ اینچ	نفوذ ۱۰/۲ اینچ
CBR - 0	۵۸	۹۵
CBR - 4 - 20	۱۳۰	۱۶۹
CBR - 4 - 40	۱۴۳	۱۸۳
CBR - 4 - 60	۱۶۴	۲۲۴



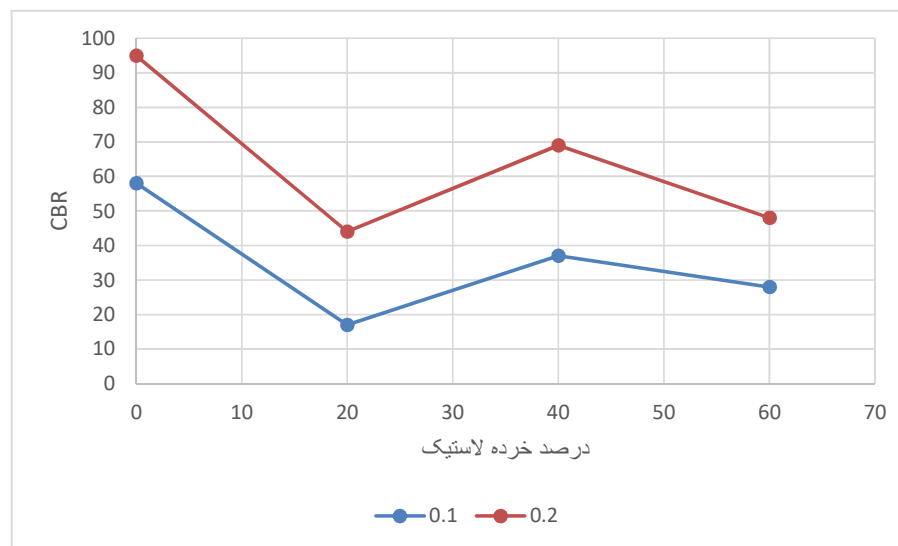
شکل (۴-۷) تاثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR اشباع با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) الک شماره ۴

نتایج به دست آمده در جدول ۴-۴ نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک در هردو ساینز به خاک باعث افزایش مقدار CBR اشباع در تمامی ساینزها شده است و این روند با افزایش درصد خرده لاستیک ادامه پیدا می‌کند. CBR از مقدار ۹۵ برای نمونه کنترل به مقدار ۱۶۹، ۱۸۳ و ۲۲۴ به ترتیب به‌ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده بر روی الک نمره ۴ شده است.

نتایج به دست آمده در جدول ۴-۵ نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک در هردو ساینز به خاک باعث کاهش مقدار CBR اشباع در تمامی ساینزها شده است و روند خاصی را دنبال نمی‌کند. CBR از مقدار ۹۵ برای نمونه کنترل به مقدار ۴۴، ۶۹ و ۴۸ به ترتیب به‌ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده بر روی الک نمره ۴ شده است.

جدول (۴-۵) مقادیر CBR بازای درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$

انواع نمونه	نفوذ ۰/۱ اینچ	نفوذ ۰/۲ اینچ
CBR - 0	۵۸	۹۵
$CBR - \frac{3}{8} - 20$	17	44
$CBR - \frac{3}{8} - 40$	37	69
$CBR - \frac{3}{8} - 60$	28	48



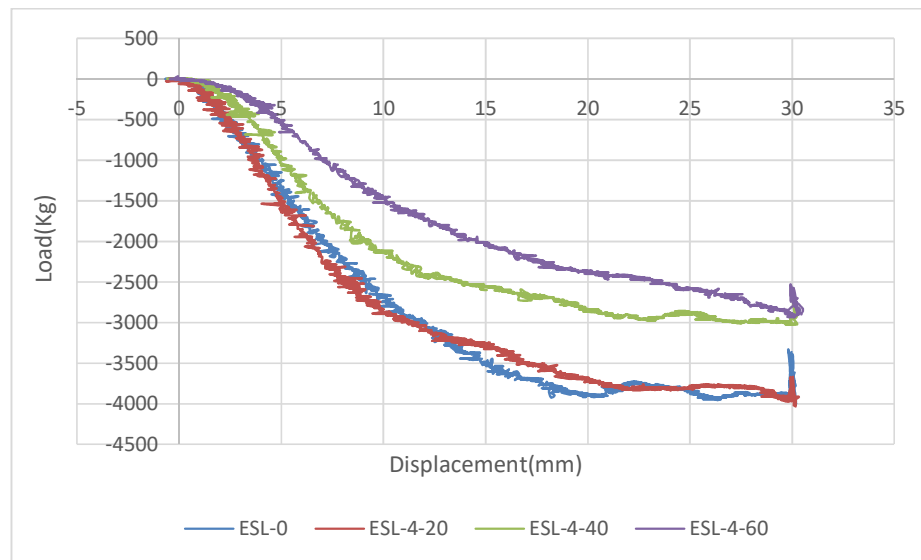
شکل (۴-۸) تأثیر خرده لاستیک بر مقدار CBR اشباع با ۴۰، ۶۰ و ۸۱ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$

۴-۷- نتایج حاصل از بارگذاری استاتیکی

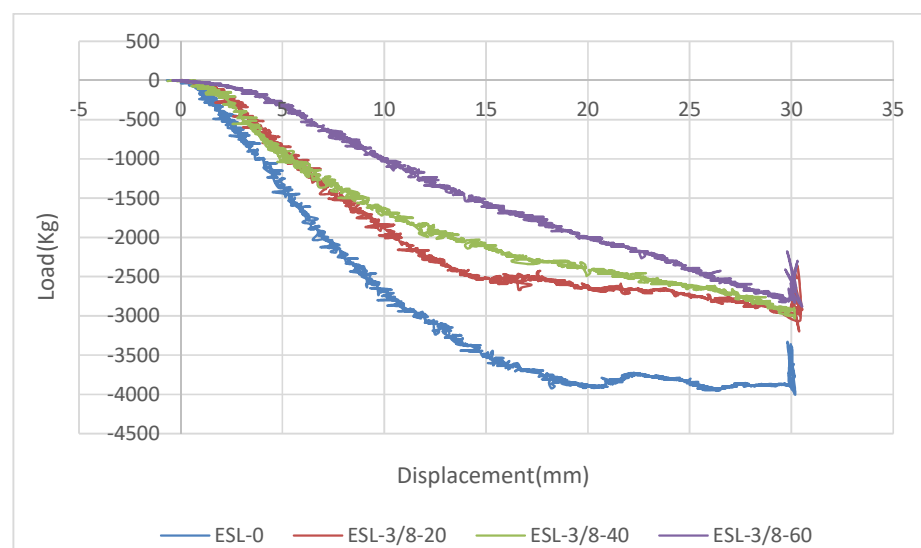
در این آزمایش با استفاده از دستگاه بارگذاری استاتیکی نشست زیر پیستون بارگذاری اندازه‌گیری شد. بعد از آن با استفاده از دو عدد LVDT که در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متر از دیواره قرار گرفت تا تغییر شکل‌ها را بر روی سطح خاک در نزدیک دیواره و نزدیک پیستون بعد از بارگذاری ثبت نماید. نرخ بارگذاری در این آزمایش دقیقاً مشابه آزمایش CBR یعنی جابجایی با نرخ ۱/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد که نتایج آن در ادامه قابل مشاهده می‌باشد.

۴-۷-۱- نتایج آزمایش بار-نشست حاصل از بارگذاری استاتیکی

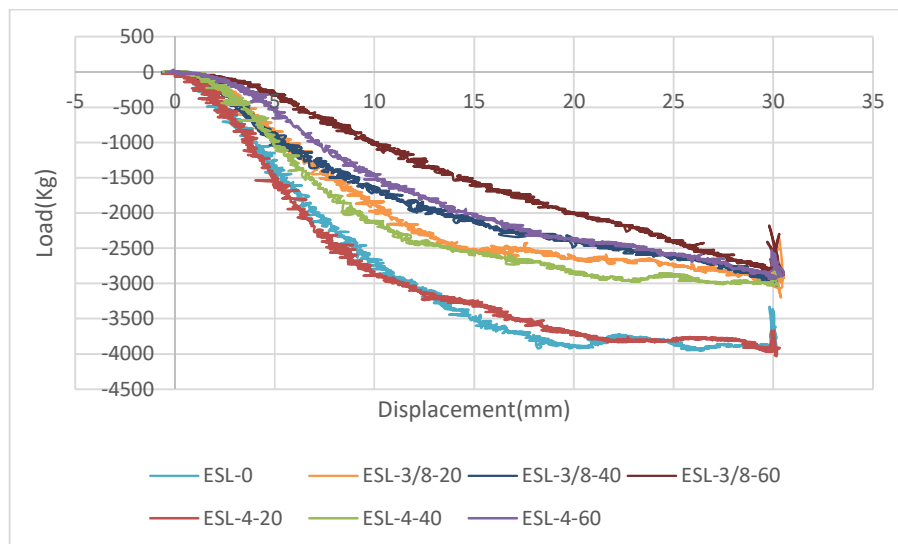
برای هفت نمونه مورد نظر با درصد خرده لاستیک های متفاوت نرخ بارگذاری $1/25$ میلیمتر بر دقیقه اعمال شد و با استفاده از سنسور که بر روی پیستون تعبیه شده بود مقدار جابجایی ثبت گردید. مقایسه نمودار حاصل از بار-نشست با درصد های مختلف خرده لاستیک در شکل ۴-۸ و ۴-۹ قابل مشاهده است.



شکل (۴-۹) نمودار بار-نشست بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴



شکل (۴-۱۰) نمودار بار-نشست بادرصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$

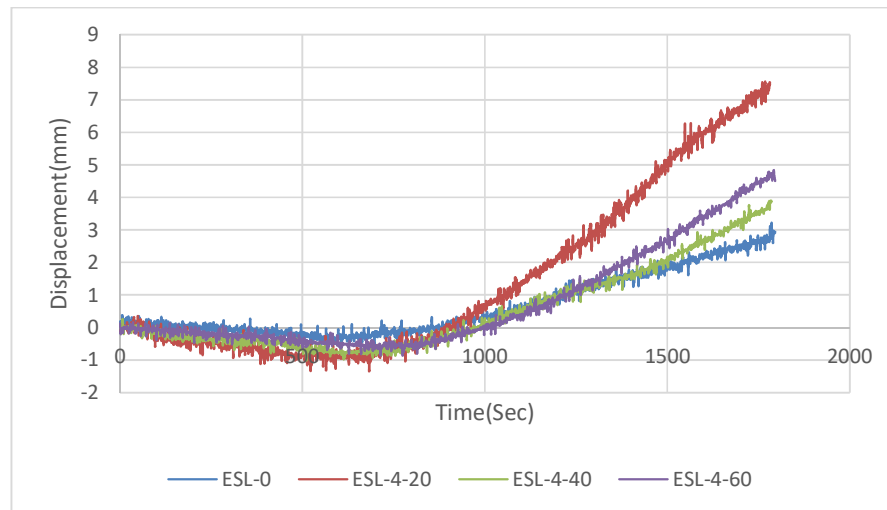


شکل (۴-۱۱) نمودار بار-نشست با درصدهای مختلف خرده لاستیک برای هردو سائز

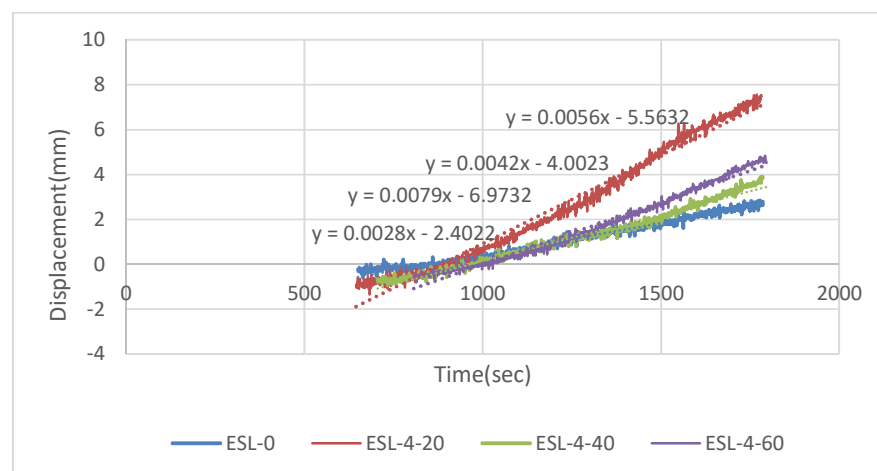
با توجه به شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ می‌توان دریافت که با اضافه کردن خرده لاستیک مقاومت خاک کمتر شده و با یک نیروی برابر، نمونه‌ای که درصد خرده لاستیک بیشتری دارد جابجایی بیشتری در آن اتفاق می‌افتد. مقدار این تغییر درمیزان نشست در نمونه حاوی خرده لاستیک با اندازه الک $\frac{3}{8}$ بیشتر است زیرا مقدار ۲۰ درصد حجمی در این نمونه مقدار خرده لاستیک بیشتری را نسبت به نمونه مشابه با اندازه الک شماره ۴ به خود اختصاص داده است.

۴-۷-۲- نتایج تغییر شکل در نقاط مختلف خاک با استفاده از LVDT

در این آزمایش با استفاده از دو عدد LVDT در فواصل $\frac{3}{5}$ و ۷ سانتی متر از کناره دیواره قرار گرفت و تغییر شکل (نشست و تورم) را در هنگام بارگذاری ثبت نمود. در این آزمایش LVDT شماره ۱ نزدیک دیواره و LVDT شماره ۲ نزدیک پیستون بارگذاری است. نتایج آن در ادامه بیان شده است. ابتدا به بررسی نتایج بدست آمده از LVDT نزدیک پیستون می‌پردازیم و بعد از آن نتایج بدست آمده از LVDT نزدیک دیواره را بررسی می‌کنیم.

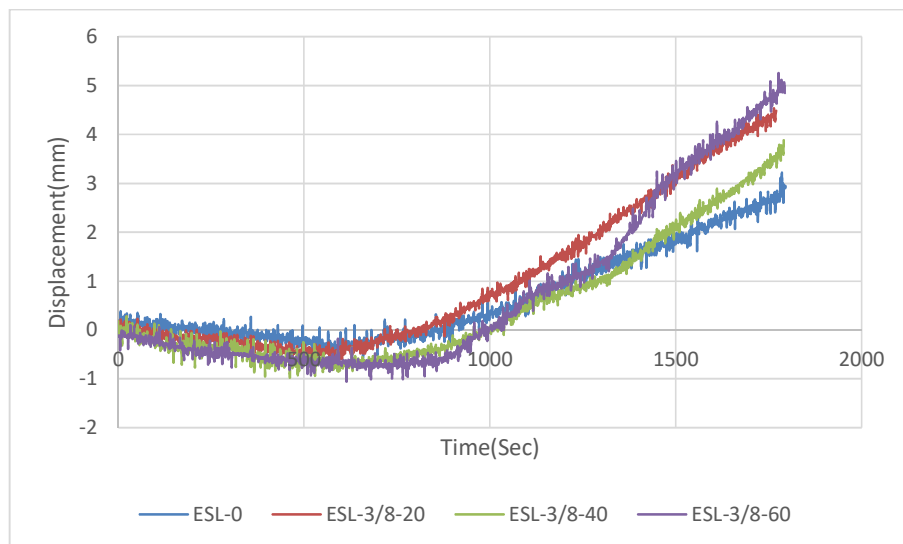


شکل (۱۲-۴) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT با درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴

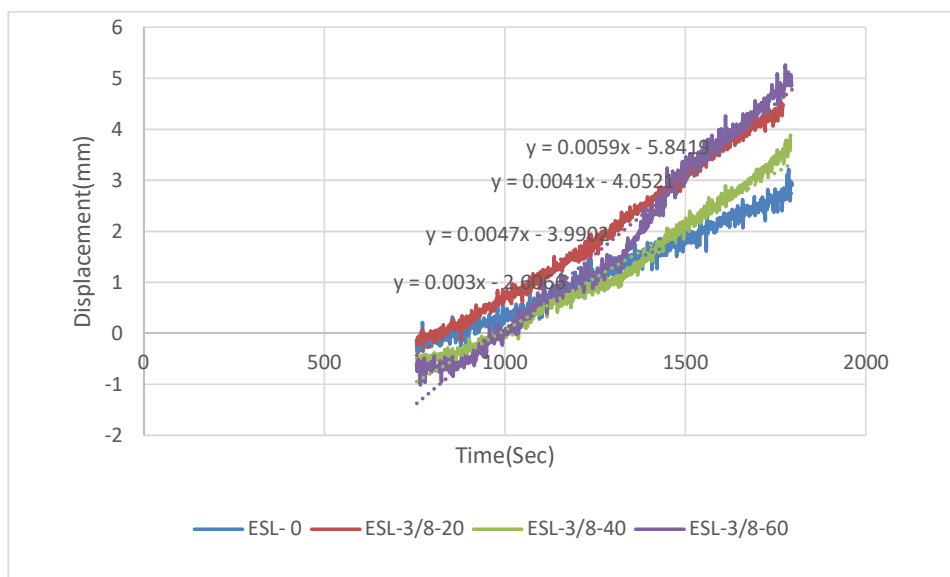


شکل (۱۳-۴) مقایسه شیب نمودارها (سرعت برگشت خاک) از لحظه تورم

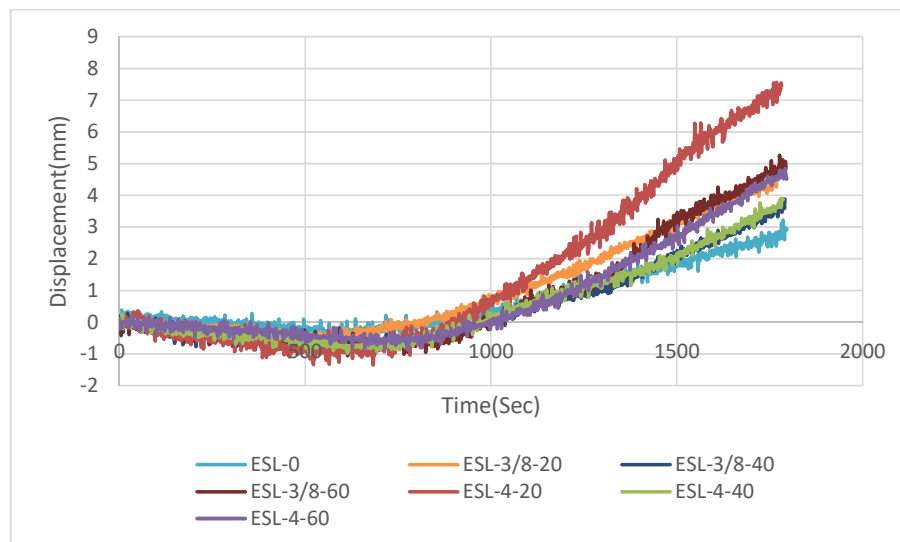
شکل‌های ۱۲-۴ و ۱۳-۴ مربوط به LVDT نزدیک پیستون بادرسدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴ را نشان می‌دهد. از نمودار ۱۲-۴ می‌توان دریافت که هرچه مقدار خرده لاستیک بیشتر شود نشست در اطراف پیستون بیشتر می‌شود و برگشت آن نیز سریعتر اتفاق می‌افتد. در گام بعد معادله خط هریک از نمودارها از جایی که خاک شروع به تورم کرد محاسبه شد و معلوم شد که هرچه درصد خرده لاستیک بیشتر باشد شیب خط برگشت نمودار بیشتر است. که در شکل ۴-۱۲ قابل ملاحظه است.



شکل (۴-۱۴) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT با درصدهای مختلف خرده لاستیک جاگزین الک شماره $\frac{3}{8}$



شکل (۴-۱۵) مقایسه شیب نمودارها (سرعت برگشت خاک) از لحظه تورم

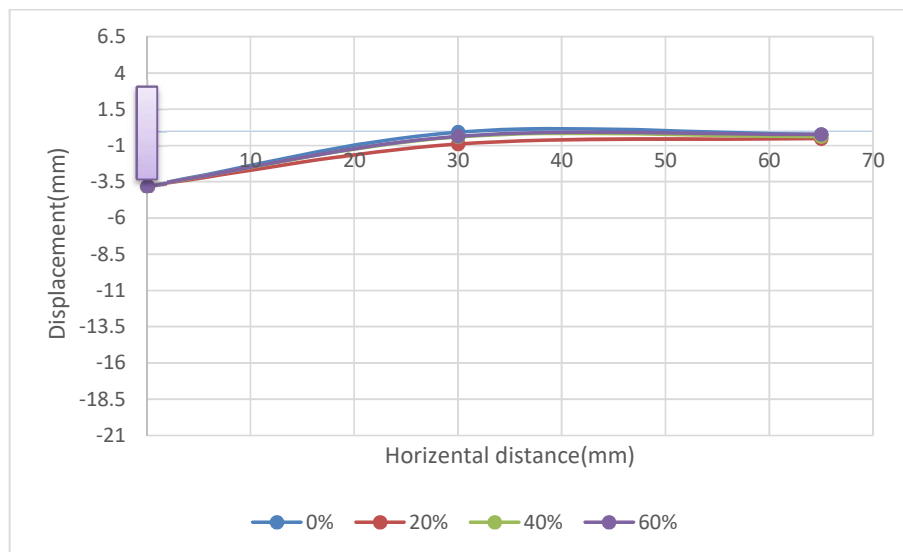


شکل (۴-۱۶) نمودار جابجایی-زمان ثبت شده توسط LVDT با درصدهای مختلف خرده لاستیک برای هردو ساین

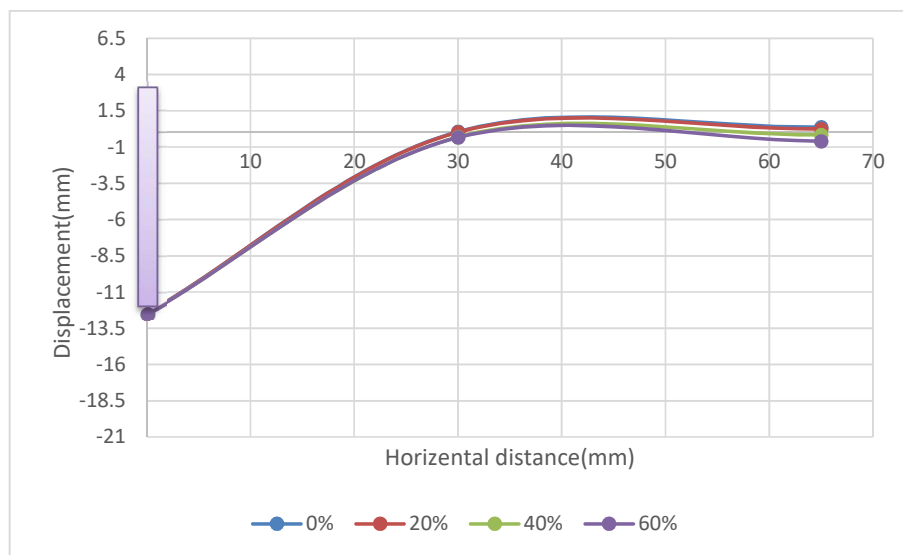
شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ مربوط به LVDT نزدیک پیستون با درصدهای مختلف خرده لاستیک جایگزین الک شماره $\frac{3}{8}$ را نشان می‌دهد. از نمودار ۴-۱۴ می‌توان دریافت که هرچه مقدار خرده لاستیک بیشتر شود نشست در اطراف پیستون بیشتر می‌شود و برگشت آن نیز سریعتر اتفاق می‌افتد. در گام بعد معادله خط هریک از نمودارها از جایی که خاک شروع به تورم کرد محاسبه شد و معلوم شد که هرچه درصد خرده لاستیک بیشتر باشد شیب خط برگشت نمودار بیشتر است. که در شکل ۴-۱۴ قابل ملاحظه است.

۴-۷-۳- مشاهده تغییر شکل‌های سطح خاک در زمان‌های متفاوت

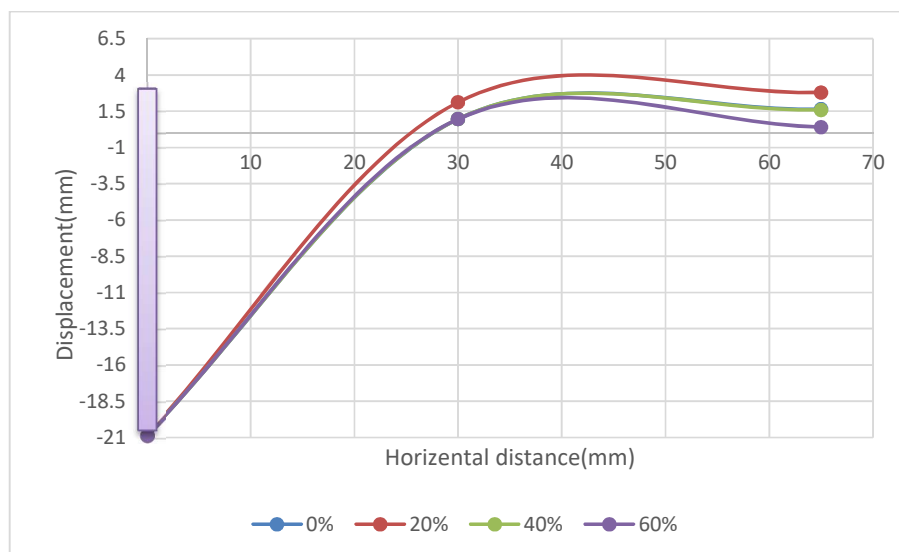
در شکل‌های ۴-۱۷ تا ۴-۲۲ می‌توان تغییر شکل‌های سطح خاک را در سه زمان ۴۴۰ ثانیه، ۸۸۰ ثانیه و ۱۳۲۰ ثانیه که توسط دو عدد LVDT ثبت شده است مشاهده کرد. ۸۸۰ ثانیه زمانی است که نفوذ پیستون برابر با مقدار نفوذ پیستون در آزمایش CBR بوده است. محور افقی در نمودارها فاصله LVDT از پیستون و محور قائم میزان جابجایی است. در واقع ۸۸۰ ثانیه مدت زمانی است که نفوذ پیستون به اندازه نفوذ پیستون CBR می‌رسد.



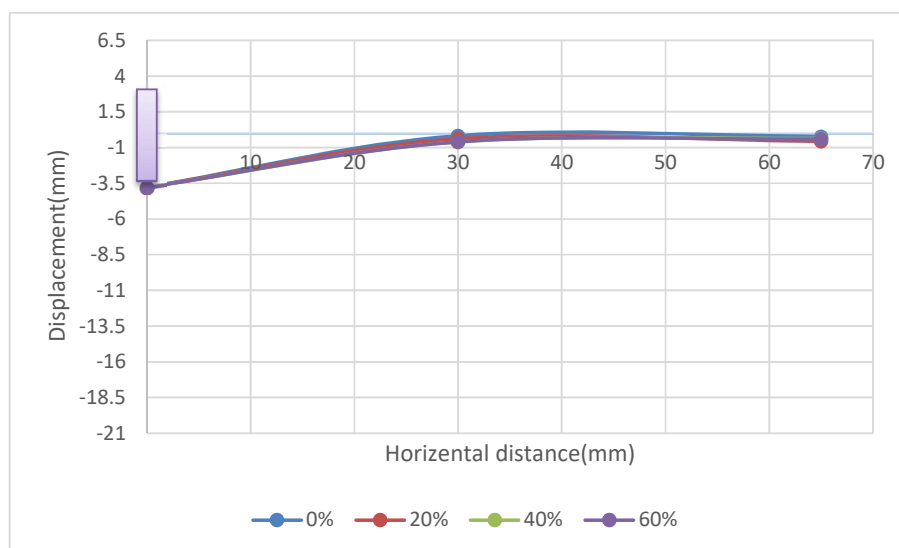
شکل (۴-۱۷) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۳/۵ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره ۴



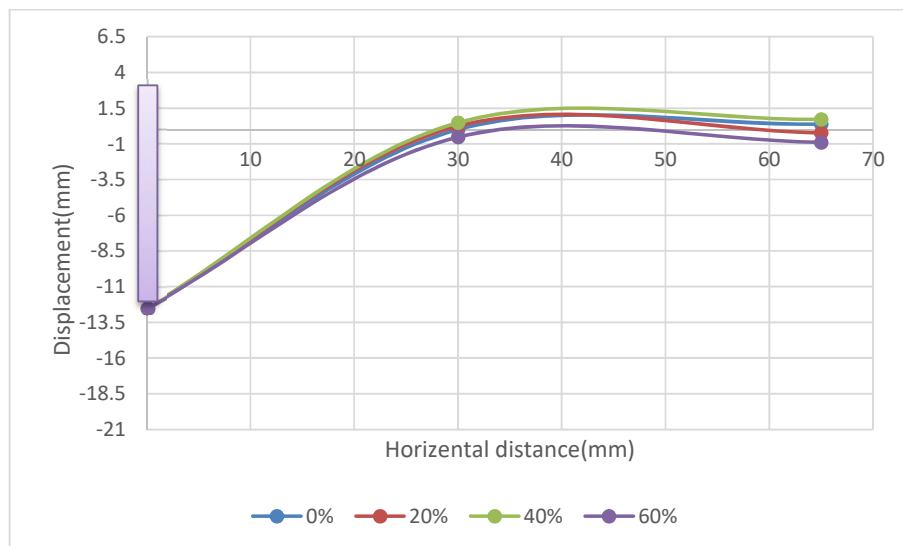
شکل (۴-۱۸) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۱۲/۵ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره ۴



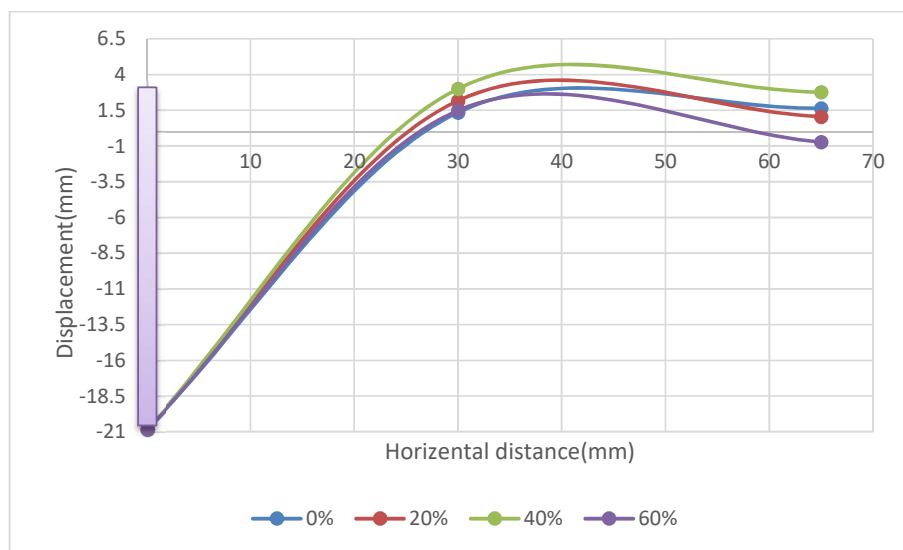
شکل (۴-۱۹) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۲۰/۸ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره ۴



شکل (۴-۲۰) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۳/۸ میلیمتر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره ۳/۸



شکل (۴-۲۱) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۱۲/۵ میلی‌متر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره $\frac{3}{8}$

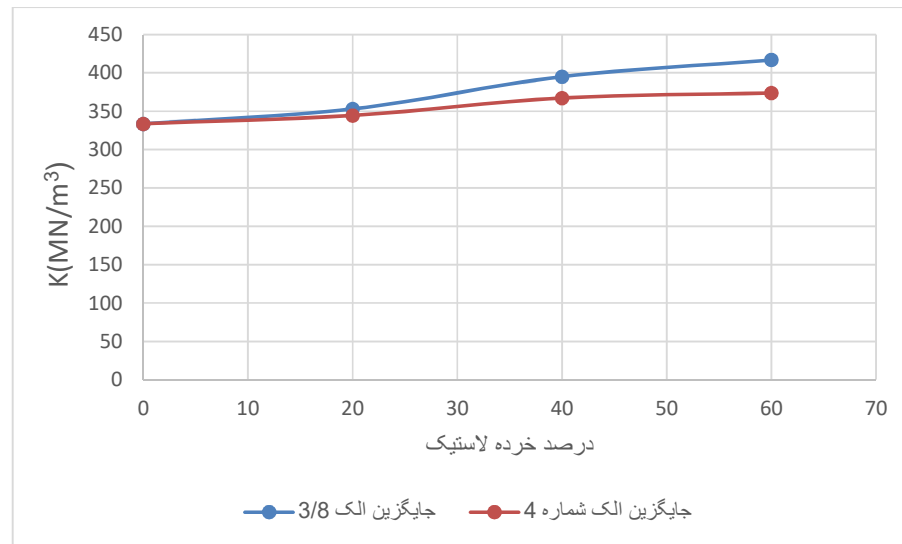


شکل (۴-۲۲) تغییر شکل سطح خاک در زمان ۲۰/۸ میلی‌متر نفوذ پیستون در نمونه با خرده لاستیک الک شماره $\frac{3}{8}$

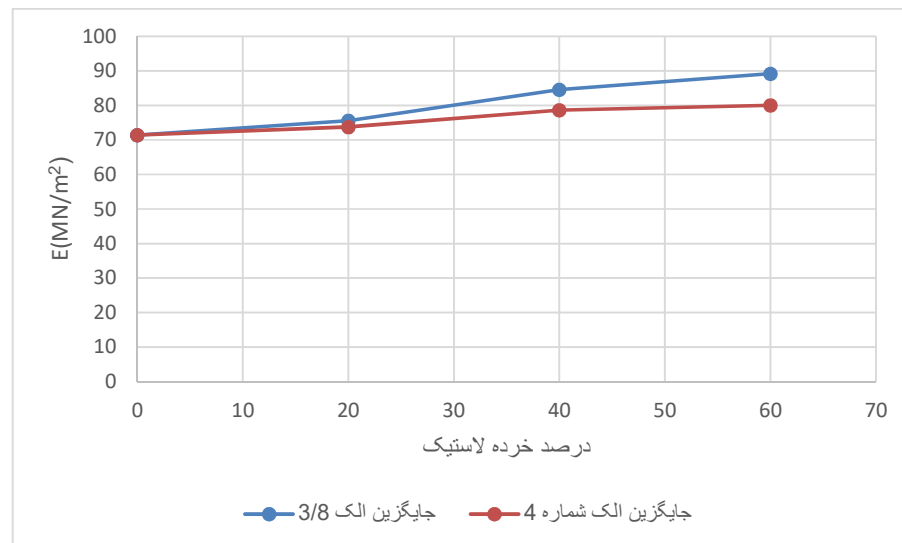
از نمودار ۴-۱۷ تا ۴-۲۲ می‌توان دریافت با اضافه کردن خرده لاستیک سیستم یکپارچه‌تر عمل می‌کند و با نفوذ پیستون خاک دارای خرده لاستیک دچار نشست بیشتری می‌شود و برگشت خاک به حالت اول و تورم سریع‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج این نمودارها دقیقاً نتایج نمودار ۴-۱۶ را تأیید می‌کند.

۸-۴- نتایج آزمایش PFWD

در مرحله آخر این پایان نامه آزمایش PFWD انجام گرفت که نتایج آن در زیر قابل مشاهده است.



شکل (۴-۲۳) ضریب عکس العمل خاک بستر با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک $\frac{3}{8}$ و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک



شکل (۴-۲۴) مدول الاستیسیته با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۳۴۱/۵، ۶۸۱ و ۱۰۲۴ گرم) جایگزین الک $\frac{3}{8}$ و با ۴۰،۲۰ و ۶۰ درصد (۱۴۵/۳، ۲۸۹/۸ و ۴۳۲/۶ گرم) جایگزین الک شماره ۴ خرده لاستیک

با توجه به نتایج آزمایش PFWD که در شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ قابل مشاهده است می‌توان نتیجه گرفت با اضافه کردن خرده لاستیک مدول الاستیسیته در تمامی درصدها افزایش پیدا می‌کند.

۴-۹- بررسی و تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی و تحلیل تمامی نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود و علل این اتفاقات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۹-۱- اثر خرده لاستیک بر وزن مخصوص خشک اساس

برای بدست آوردن وزن مخصوص خشک برای هر نمونه از آزمایش تراکم اصلاح شده استفاده شد. وزن مخصوص در تمامی نمونه‌ها با استفاده از خرده لاستیک کاهش پیدا کرد که علت این امر کمتر بودن وزن مخصوص خرده لاستیک نسبت به سنگدانه است. وزن مخصوص در نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز $\frac{3}{8}$ کاهش بیشتری نسبت به وزن مخصوص نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز شماره ۴ داشت. این کاهش به این دلیل می‌تواند باشد که سهم وزنی الک $\frac{3}{8}$ در دانه بندی خاک حدود دوبرابر سهم الک شماره ۴ است و ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد حجمی آن نیز مقدار بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. مقدار کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک به ترتیب $\frac{1}{3}$ ، $\frac{2}{1}$ و $\frac{5}{1}$ درصد کاهش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره ۴ شده است و این کاهش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ به ترتیب $\frac{2}{6}$ ، ۱۰ و $\frac{13}{9}$ درصد بوده است.

۴-۹-۲- اثر خرده لاستیک بر درصد رطوبت بهینه اساس

برای بدست آوردن درصد رطوبت بهینه برای هر نمونه از آزمایش تراکم اصلاح شده استفاده شد. و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد خرده لاستیک برای هر نمونه مقدار درصد رطوبت بهینه افزایش پیدا می‌کند که این امر به دلیل جذب رطوبت بیشتر توسط خرده لاستیک نسبت به

سنگدانه‌هاست. فرو رفتن دانه‌ها داخل خرده لاستیک و افزایش چسبندگی باعث می‌شود به رطوبت بیشتری برای روغن‌کاری، جابجایی و تراکم دانه‌ها نیاز باشد. مقدار افزایش درصد رطوبت بهینه به ترتیب $\frac{6}{3}$ ، $\frac{12}{7}$ و $\frac{17}{4}$ درصد افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره ۴ شده است و این افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ به ترتیب $\frac{2}{1}$ ، $\frac{4}{2}$ و $\frac{14}{8}$ درصد بوده است. میزان افزایش درصد رطوبت بهینه در نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز الک شماره ۴ بیشتر از نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز الک $\frac{3}{8}$ می‌باشد و این نشانه جذب رطوبت بیشتر در این نمونه‌ها است. هرچند مقدار وزنی سایز الک $\frac{3}{8}$ نسبت به سایز الک شماره ۴ بیشتر است اما به دلیل کوچکتر بودن اندازه دانه‌ها در سایز الک شماره ۴ سطح تماس بیشتر است به همین دلیل جذب آب بیشتر و درصد رطوبت بهینه بیشتر است.

۴-۹-۳- اثر خرده لاستیک بر CBR اساس

طرح روسازی در آیین نامه ایران و در آیین نامه آشتو برای سطح سه براساس CBR انجام می‌شود. بنابراین با افزودن خرده لاستیک سایز الک شماره ۴، CBR افزایش و موجب بهتر شدن طرح روسازی و با افزودن خرده لاستیک سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ ، CBR کاهش و موجب بدتر شدن طرح روسازی می‌شود.

نتایج آزمایش CBR نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی را تأیید نمی‌کند یعنی با توجه به آزمایش CBR ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده و بارگذاری استاتیکی کاهش ظرفیت باربری را نشان می‌دهد که دلیل آن تغییر در سایز قالب است در بارگذاری استاتیکی از قالب با سایز بزرگتر استفاده شده است و فرو رفتن پیستون داخل خاک باعث گسیختگی در سطح خاک می‌شود اما در قالب CBR به دلیل کوچکتر بودن قالب بین خاک و قالب چسبندگی وجود دارد و موجب افزایش CBR می‌شود.

زمانی که به خاک خرده لاستیک اضافه می‌شود سطح تماس بیشتر می‌شود و میزان نفوذپذیری کم می‌شود و در زمان رطوبت اشباع به دلیل وجود آب محبوس شده بین دانه‌ها فشار آب حفره ای با افزایش تنش افزایش می‌یابد و باعث افزایش CBR می‌شود.

۴-۹-۴- اثر خرده لاستیک بر PFWD لایه اساس

همان طور که از شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ مشخص است آزمایش PFWD مقدار مدول الاستیسیته خاک با افزودن لاستیک نسبت به نمونه کنترل در همان حالت افزایش یافته است. مقدار افزایش مدول الاستیسیته به ترتیب ۳/۲، ۱۰/۱ و ۱۲ در صد افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره ۴ شده است و این افزایش برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ به ترتیب ۵/۸، ۱۸/۴ و ۲۴/۹ درصد بوده است. میزان افزایش مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز الک شماره $\frac{3}{8}$ بیشتر از نمونه‌های حاوی خرده لاستیک با سایز الک ۴ می‌باشد که این تفاوت می‌تواند به دلیل افزایش سایز و مقدار خرده لاستیک بیشتر در این سایز باشد.

پس در حالت کلی می‌توان گفت که افزایش خرده لاستیک به خاک پارامتر E خاک را بهبود می‌بخشد. افزایش پارامتر E در حالت خشک به جنس مصالح لاستیکی ربط داده می‌شود اما علت افزایش این پارامتر در نمونه اشباع نسبت به نمونه خشک علاوه بر جنس مصالح لاستیکی به نوع بارگذاری (ضربه‌ای) مربوط است چراکه تحت اثر بار ضربه‌ای به نمونه‌ها، بین ذرات نمونه نیروی فشار آب حفره‌ای به وجود می‌آید که وجود این نیرو سختی خاک در برابر نیروهای وارده را بیشتر می‌کند. شیارشدگی و ترک‌های پوست‌سوسماری از خرابی‌های مهم و سازهای در روسازی راه محسوب می‌شوند. شیارشدگی بر اثر تغییر شکل‌های دائمی یکی از لایه‌های روسازی بر اثر اعمال بار یا تحکیم به وجود می‌آید. افزایش پارامتر E خاک که نتیجه افزودن لاستیک بر لایه‌ی اساس راه است باعث می‌شود که تغییر شکل‌های دائمی خاک بر اثر اعمال نیرو کم شود و این کاهش سبب کاهش پدیده شیارشدگی راه و یا کاهش شدت آن می‌شود. کاهش عمق شیار به وجود آمده در خاک در ادامه می‌تواند ترک‌های پوست‌سوسماری به وجود آمده را کاهش دهد و یا باعث کاهش شدت این ترک‌ها شود که در هر دو حالت هزینه‌های ترمیم روسازی را با کاهش مواجه می‌کند.

طرح روسازی در سطح یک در آشتو براساس ضریب برجهندگی است که با FWD یا PFWD اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین با افزودن خرده لاستیک مقدار E و یا K (ضریب عکس‌العمل خاک بستر) خاک بیشتر می‌شود و موجب بهبود طرح روسازی می‌شود.

۴-۹-۵- اثر خرده لاستیک بر ظرفیت باربری لایه اساس

در آزمایش بارگذاری استاتیکی سه پارامتر مورد بررسی قرار گرفت که عبارت‌اند از ظرفیت باربری خاک، تغییر شکل در نزدیکی پیستون و تغییر شکل در نزدیکی دیواره.

با توجه به شکل ۴-۱۱ می‌توان گفت با اضافه کردن خرده لاستیک ظرفیت باربری کاهش پیدا کرده است و این کاهش ارتباط مستقیم با مقدار و سایز خرده لاستیک جایگزین شده دارد. به طوریکه با افزایش درصد خرده لاستیک ظرفیت باربری کمتر شده و با افزایش سایز نیز همین روند قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۴-۱۶ جابجایی‌های سطح خاک در نزدیک پیستون می‌باشد می‌توان گفت بعد از بارگذاری در ابتدا خاک دچار نشست می‌شود و بعد از آن تورم اتفاق می‌افتد که این موضوع به وضوح در شکل قابل مشاهده است. اما این تغییرات برای نمونه دارای خرده لاستیک و نمونه کنترل متفاوت است. به نحوی که وقتی خرده لاستیک به خاک اضافه می‌شود نشستی که در ابتدا اتفاق می‌افتد بیشتر است و تورمی هم که در ادامه اتفاق می‌افتد نیز بیشتر است و همچنین با استفاده از شیب نمودار از لحظه شروع تورم می‌توان گفت نمونه دارای خرده لاستیک دارای شیب برگشت بیشتر نسبت به نمونه کنترل است که به دلیل خاصیت ارتجاعی برگشت زودتری در آن اتفاق می‌افتد و می‌توان گفت با اضافه کردن خرده لاستیک سیستم یکپارچه‌تر عمل می‌کند. البته نمونه دارای ۲۰ درصد خرده لاستیک سایز الک شماره ۴ از این روند پیروی نمی‌کند که این تفاوت می‌تواند به دلیل خطای آزمایش صورت گرفته باشد.

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

هدف اصلی در این تحقیق بررسی تأثیر جایگزینی لاستیک به جای بخشی از مصالح سنگی موجود در دانه بندی لایه اساس راه بوده است. از این رو خرده لاستیک با درصد های متفاوت جایگزین بخشی از سنگ دانه های موجود در لایه اساس راه شده و آزمایش های مختلف جهت بررسی تأثیر این افزودن به انجام رسید. در ادامه به نتایج کلی به دست آمده از آزمایش ها پرداخته خواهد شد.

۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش حاصل مطالعات آزمایشگاهی می باشد. بررسی این نتایج نقش به سزایی در ارزیابی رفتار خرده لاستیک در لایه اساس راه دارا می باشد.

- با انجام آزمایش تراکم مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، وزن مخصوص در تمام نمونه ها نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. مقدار وزن مخصوص $2/3$ گرم بر سانتی متر مکعب برای نمونه کنترل است که به مقدار $2/27$ ، $2/25$ و $2/18$ گرم بر سانتی متر مکعب به ترتیب به ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک شماره 4 و $2/24$ ، $2/07$ و $1/98$ گرم بر سانتی متر مکعب به ترتیب به ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک $\frac{3}{8}$ تقلیل یافته است.
- با انجام آزمایش تراکم مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، درصد رطوبت بهینه در تمام نمونه ها نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است. مقدار درصد رطوبت بهینه $4/7$ درصد برای نمونه کنترل است که به مقدار 5 ، $5/3$ و $5/5$ درصد به ترتیب به ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک شماره 4 و $4/8$ ، $4/9$ و $5/4$ درصد به ترتیب به ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک $\frac{3}{8}$ افزایش یافته است.

- با انجام آزمایش CBR مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، CBR خشک در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است و CBR اشباع در نمونه حاوی خرده لاستیک الک ۴ افزایش و حاوی خرده لاستیک الک $\frac{3}{8}$ کاهش یافته است.
- با انجام آزمایش PFWD مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، مقدار مدول الاستیسیته در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است. مقدار مدول الاستیسیته $71/4$ مگانیوتن بر مترمربع برای نمونه کنترل است که به مقدار $73/7$ ، $78/5$ و $80/2$ مگانیوتن بر مترمربع به ترتیب به‌ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک شماره ۴ و $77/2$ ، $81/3$ و $89/2$ مگانیوتن بر مترمربع به ترتیب به‌ازای 20 ، 40 و 60 درصد خرده لاستیک جایگزین الک $\frac{3}{8}$ افزایش یافته است.
- با انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، مقدار ظرفیت باربری در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. و خاصیت ارتجاعی نیز در تمامی نمونه‌ها افزایش یافته است یعنی با اضافه کردن خرده لاستیک نشست‌ها در اطراف پیستون بیشتر و تورم نیز سریع‌تر اتفاق افتاد.

۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

استفاده از ذرات لاستیک با قطر الک ۱۰ و ۴۰ جایگزین مصالح موجود در لایه اساس راه جهت تقویت سازی؛

استفاده از ذرات لاستیک به‌صورت تراشه در لایه اساس راه جهت تقویت سازی؛

بررسی مدول برجهندگی لایه اساس راه با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلیک که پارامتری مهم در طراحی و کنترل کیفیت راه می‌باشد.

مراجع

مراجع

- [1] ب. آقاجانی and ف. مقدس نژاد, "اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک", ۱۳۹۰.
- [2] ا. شاکری, ف. مقدس نژاد and ا. کشاورزاد, "مقایسه خصوصیات مقاومتی آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی", ۱۳۹۲.
- [3] N. M. Al-Akhras and M. M. Smadi, "Properties of tire rubber ash mortar," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 821–826, Oct. 2004.
- [4] A. Al-Tabbaa and T. Aravinthan, "Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials," *Waste Manag.*, vol. 18, no. 1, pp. 9–16, Jan. 1998.
- [5] P. Gotteland, S. Lambert, and L. Balachowsky, "Strength Characteristics of Tyre Chips – Sand Mixtures," *Stud. Geotech. Mech.*, vol. XXVII, no. 1, pp. 55–66, 2005.
- [6] H. Cetin, M. Fener, and O. Gunaydin, "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material," *Eng. Geol.*, vol. 88, no. 1–2, pp. 110–120, Nov. 2006.
- [7] N. Hataf and M. M. Rahimi, "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 910–916, Dec. 2006.
- [8] S. Kumar Tiwari, J. Prasad Sharma, and J. Singh Yadav, "Geotechnical Properties of Dune sand-Waste Tires Composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 9, pp. 9851–9855, Jan. 2017.
- [9] S. M. Anvari, I. Shooshpasha, and S. S. Kutanaei, "Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 936–944, Oct. 2017.
- [10] ر. نورزاد and م. روشنی, "بررسی رفتار آزمایشگاهی ماسه مسلح با خرده لاستیک و پودر لاستیک", ۱۳۹۳, p. 8.
- [11] ا. پزشکی and م. امینی فر, "بررسی و قیاس اثر پودر لاستیک بر خاک با اثر ضایعات درشتتر لاستیک", ۱۳۹۳.
- [12] م. لشته نشایی, م. کریم پور فرد, ع. فرهنگ خواه and و. نجفی مقدم گیلانی, "ارزیابی مقاومت مخلوطهای پودر لاستیک و ماسه در دستگاه برش مستقیم سیکلیک بزرگمقیاس", ۱۳۹۳.
- [۱۳] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, C127, "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate ".
- [14] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D422, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils ".
- [۱۵] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D1557, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort ".
- [۱۶] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D131, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort ".
- [۱۷] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D1883, "Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils ".
- [۱۸] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D4791, "Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD) ".

ABSTRACT:

The broken down tires of old cars are recognized as one of the most important industrial waste and factory waste that has been increased rapidly and as a result ,many problems have been appeared for human societies.in recent decades, Recycling of this material has been considered in other industries, especially civil engineering. In recent years, researchers have examined the possibility of using this material in concrete, soil and asphalt mixtures and have shown that the combination of this material with these materials improves some of their properties. in this issue we are about to examine the possibility of replacing rubber substitutes, instead of a part of the rock materials in the base layer of road and studying its effects on this layer. So, , CBR and PFWD tests have been carried out. and their results are two important factors in the design and control of road pavement quality. In this study, sub-particles with 9.5 to 4.75mm in size were used as substituting materials which includes sieves between 4 and $\frac{3}{8}$.

The results of the CBR test in dry state showed that, with the replacement of 20, 40 and 60 percent of the crumb rubber with a part of the portion of bedding of rocky material from base layer of the road, the amount of CBR of the samples increases, moreover in saturated CBR by replacing the crude rubber with sieve which is number 4 Increases. But by the replacing crumb rubber with sieve which is number $\frac{3}{8}$ in size it decreases. The results of the PFWD test showed that the increase in the elastic modulus was 3.2%, 10.1% and 12% respectively for samples containing crumb rubber are 20%, 40% and 60% respectively with sieve which its number 4, and this increase for the sample The crude rubber containing 20, 40 and 60% respectively and with sieve which its size is $\frac{3}{8}$ are 5.8, 18.4 and 24.9%. The increase of this

parameter in the base layer of the soil caused the decrease of slurry and cracks or reduces the severity of these damages. According to the Statsqui loading test, it can be said that with the addition of sub-tires, the load capacity has decreased, and this decrease is directly related to the amount and size of the sub-rubber substitute. As with the increase in the percentage of the crumb rubber, the capacity of the load decreases and with the increase in size, the same trend can be observed

Keywords: bearing capacity of micropile, laboratory modeling, physical modeling, apparatus, injection radius, wall cohesion, spss analysis



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Evaluating the effect of crumb rubber on behavioral characteristics of
the base layer**

By:

Mohammad Amirabdollahian

Supervisors:

Dr. Hossein Ghasem zadeh tehrani

Dr. Mohsen Keramati

July 2019