

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

استفاده از ضایعات لاستیک جهت بهبود خواص مقاومتی لایه اساس

نگارنده:

عباس دریادل

استاد راهنما:

دکتر حسین قاسم‌زاده طهرانی

بهمن ۹۵

دانشگاه شاهرود

دانشکده : مهندسی عمران

گروه : راه و ترابری

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عباس دریادل به شماره دانشجویی: ۹۳۰۷۵۲۴

تحت عنوان: استفاده از ضایعات لاستیک جهت بهبود خواص مقاومتی لایه اساس

در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		دکتر حسین قاسم‌زاده طهرانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	مهندس عباس محمدی		دکتر ایمان آقایان
			دکتر محسن کرامتی

تقدیم به:

اسوه های امیدواری؛ پدر و مادرم

که شمع وجودشان روشنی بخش وجود من است

به مصداق «من لم یسکر الخلق لم یسکر الخالق» بی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر قاسم زاده طهرانی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم

و دانش را، با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیم و تسکین نمایم.

همچنین از مادر و خانواده ی عزیز، دلوز و مهربانم که آرایش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه تحصیلی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛

پاسگزار می نمایم.

سگر خدا که هر چه طلب کردم از خدا

بر رسته های بخت خود کامران شدم

عباس دیادل

تعهد نامه

اینجانب عباس دریادل دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان استفاده از ضایعات لاستیک جهت بهبود خواص مقاومتی لایه اساس تحت راهنمایی آقای دکتر قاسم‌زاده طهرانی 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 (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، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

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 ۲ تا ۴/۷۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین مصالح بین‌الک‌های نمره ۴ و ۱۰ 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 به ترتیب ۵/۷۵، ۱۵/۷۷ و ۲۶ درصد نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌یابد هم‌چنین در CBR اشباع، این میزان کاهش به ترتیب برابر با ۳/۵۷، ۱۱/۹ و ۲۸/۵۷ نسبت به نمونه کنترل محاسبه شد. در نهایت مشخص شده است که با توجه به حداقل CBR تعیین‌شده توسط آیین‌نامه که معادل ۸۰ است؛ جایگزینی حداکثر ۴۰ درصد خرده لاستیک در حالت خشک و ۲۰ درصد خرده لاستیک در حالت اشباع به دانه‌بندی خاک لایه‌ی اساس راه امکان‌پذیر است. هم‌چنین نتایج حاصل از آزمایش PFWD نشان داد که جایگزینی ۲۰ درصد خرده لاستیک به خاک لایه اساس مدول الاستیسیته خاک را در هر دو حالت خشک و اشباع نسبت به نمونه کنترلی آن به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۳ درصد افزایش می‌دهد که افزایش این پارامتر در خاک لایه اساس سبب کاهش خرابی‌های شیارشدگی و ترک‌های پوست‌سوسماری شده

و یا از شدت این نوع خرابی‌ها می‌کاهد.

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

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: کلیات ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- کاربردهای لاستیک فرسوده ۴
- ۱-۲-۱- کاربرد در کفپوش‌های ورزشی ۴
- ۲-۲-۱- در ساخت انواع عایق‌ها ۴
- ۱-۲-۲-۱- عایق صوتی ۴
- ۲-۲-۲-۱- عایق حرارتی ۵
- ۳-۲-۲-۱- عایق‌های صدایی دیوارهای مشترک و کف‌ها ۵
- ۳-۲-۱- انواع لرزه‌گیرهای پلیمری ۶
- ۴-۲-۱- استفاده در مهندسی ۷
- ۳-۱- اثرات منفی ضایعات لاستیک بر محیط‌زیست ۷
- ۴-۱- شرح مسئله ۸
- ۵-۱- ضرورت تحقیق ۹
- ۶-۱- نوآوری در تحقیق ۹
- ۷-۱- معرفی فصل‌های پایان‌نامه ۹
- ۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته ۱۱
- ۱-۲- مقدمه ۱۲
- ۲-۲- استفاده از لاستیک فرسوده در لایه‌ی آسفالتی راه ۱۲

۱۳	۱-۲-۲- محدودیت‌های خواص قیرهای معمولی
۱۴	۲-۲-۲- قیرهای اصلاح شده
۱۴	۳-۲-۲- تاریخچه‌ی اصلاح قیر
۱۶	۴-۲-۲- برهمکنش بین پودر لاستیک و قیر
۱۷	۵-۲-۲- تأثیر لاستیک فرسوده بر ویژگی‌های قیر
۲۱	۳-۲- استفاده از لاستیک در مخلوط‌های بتنی و سیمانی
۲۲	۱-۳-۲- اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی در بتن
۲۳	۲-۳-۲- تأثیر لاستیک فرسوده بر ویژگی‌های مخلوط‌های سیمانی
۲۶	۴-۲- تأثیر لاستیک فرسوده بر ویژگی خاک‌ها
۲۷	۱-۴-۲- تأثیر افزودن لاستیک بر خاک
۴۵	۳- فصل سوم: نحوه انجام آزمایش‌ها
۴۶	۱-۳- مقدمه
۴۶	۲-۳- لایه اساس راه
۴۶	۱-۲-۳- تعریف
۴۶	۲-۲-۳- عملکرد اساس در روسازی
۴۷	۳-۲-۳- انواع اساس
۴۸	۴-۲-۳- مشخصات فنی اساس
۴۸	۱-۴-۲-۳- دانه‌بندی
۴۸	۲-۴-۲-۳- سایر مشخصات

۴۹	..... ۳-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت‌دانه
۵۱	..... ۳-۴- آزمایش تعیین وزن مخصوص ریزدانه
۵۲	..... ۳-۵- وزن مخصوص پودر لاستیک
۵۳	..... ۳-۶- آزمایش دانه‌بندی
۵۳	..... ۳-۷- آزمایش تراکم
۵۴	..... ۳-۸- آزمایش لس آنجلس
۵۵	..... ۳-۹- آزمایش حد روانی و حد خمیری
۵۶	..... ۳-۱۰- آزمایش ارزش ماسه‌ای
۵۷	..... ۳-۱۱- آزمایش شکستگی در دو جبهه
۵۸	..... ۳-۱۲- آزمایش افت وزنی با سولفات سدیم
۵۹	..... ۳-۱۳- سنگ‌دانه‌های پهن و دراز
۶۰	..... ۳-۱۴- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)
۶۲	..... ۳-۱۵- آزمایش PFWD
۶۷	..... ۴- فصل چهارم: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها
۶۸	..... ۴-۱- مقدمه
۶۸	..... ۴-۲- نتایج حاصل از آزمایشات دانه‌بندی
۶۹	..... ۴-۳- نتایج آزمایش وزن مخصوص درشت‌دانه
۶۹	..... ۴-۴- نتایج آزمایش وزن مخصوص ریزدانه
۷۰	..... ۴-۵- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

۶-۴	نتایج حاصل از آزمایش لس آنجلس	۷۱
۷-۴	نتایج حاصل از آزمایش حد خمیری و روانی	۷۱
۸-۴	نتایج حاصل از آزمایش ارزش ماسه‌ای	۷۲
۹-۴	نتایج حاصل از آزمایش شکستگی در دو وجه	۷۲
۱۰-۴	نتایج حاصل از آزمایش افت وزنی با سولفات سدیم	۷۲
۱۱-۴	نتایج حاصل از آزمایش سنگدانه‌های پهن و دراز	۷۳
۱۲-۴	نتایج حاصل از آزمایش CBR	۷۴
۱-۱۲-۴	نتایج آزمایش CBR در حالت خشک	۷۴
۲-۱۲-۴	نتایج آزمایش CBR در حالت اشباع	۷۸
۳-۱۲-۴	جمع‌بندی نتایج آزمایش CBR	۸۲
۱۳-۴	نتایج حاصل از آزمایش PFWD	۸۳
۵-۵	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها	۸۵
۱-۵	مقدمه	۸۶
۲-۵	نتایج کلی	۸۶
۳-۵	پیشنهادها	۸۷
۸۸	منابع	۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ مقادیر استفاده از لاستیک‌های فرسوده در آمریکا ۳
- شکل ۱-۲ مقایسه مدول برجهندگی آسفالت معمولی و لاستیکی ۱۹
- شکل ۲-۲ مقایسه کشش غیرمستقیم آسفالت معمولی و لاستیکی ۲۰
- شکل ۳-۲ اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در بتن ۲۲
- شکل ۴-۲ گسیختگی نمونه‌های حاوی درشت‌دانه لاستیکی تحت فشار ۲۳
- شکل ۵-۲ رابطه بین فاکتور نفوذپذیری خاک و تنش نرمال وارده به‌ازای افزودن لاستیک ریز (a) و درشت (b) ۲۹
- شکل ۶-۲ حالت‌های مختلف مسلح‌سازی خاک ۳۰
- شکل ۷-۲ تأثیر افزودن ذرات لاستیک بر ماکزیمم وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری محصورنشده ۳۴
- شکل ۸-۲ تأثیر افزودن پودر لاستیک بر CBR خاک ۳۶
- شکل ۱-۳ دستگاه CBR ۶۲
- شکل ۲-۳ دستگاه PFWD ۶۵
- شکل ۱-۴ نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی ۶۸
- شکل ۲-۴ وزن مخصوص نمونه‌ها ۷۰
- شکل ۳-۴ رطوبت بهینه نمونه‌ها ۷۱
- شکل ۴-۴ تأثیر افزودن لاستیک بر مقدار CBR در حالت خشک ۷۵
- شکل ۵-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه کنترلی در حالت CBR خشک ۷۶
- شکل ۶-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۲۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک ۷۶
- شکل ۷-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۴۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک ۷۷
- شکل ۸-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۶۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک ۷۷

- شکل ۹-۴ تأثیر افزودن لاستیک بر مقدار CBR در حالت اشباع ۸۰
- شکل ۱۰-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه کنترلی در حالت CBR اشباع ۸۰
- شکل ۱۱-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۲۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع ۸۱
- شکل ۱۲-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۴۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع ۸۱
- شکل ۱۳-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۶۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع ۸۲

فهرست جدول

- جدول ۱-۲ مشخصات قیر مورد استفاده ۱۷
- جدول ۲-۲ مقایسه نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک قبل و بعد از RTFO ۱۸
- جدول ۳-۲ خصوصیات مصالح سنگی ۱۹
- جدول ۴-۲ ویژگی‌های خاک ماسه‌ای ۳۲
- جدول ۵-۲ مقادیر BCR به‌ازای ابعاد مختلف لاستیک ۳۲
- جدول ۶-۲ ابعاد و ویژگی‌های ذرات لاستیک ۳۵
- جدول ۷-۲ نتایج کامل آزمایشات نورزاد ۳۹
- جدول ۸-۲ خلاصه مطالعات گذشته ۴۱
- جدول ۱-۳ دانه‌بندی مصالح اساس ۴۸
- جدول ۲-۳ مشخصات مصالح اساس ۴۹
- جدول ۳-۳ مشخصات آزمایش تراکم اصلاح شده ۵۴
- جدول ۴-۳ تعیین میزان گرم جهت آزمایش لس آنجلس ۵۵
- جدول ۵-۳ تعیین تعداد گوی در آزمایش لس آنجلس ۵۵
- جدول ۶-۳ حداقل جرم نمونه مورد آزمایش ۵۷
- جدول ۷-۳ قطر مصالح مورد استفاده ۵۸
- جدول ۸-۳ اندازه الک‌های نهایی درشت‌دانه ۵۹
- جدول ۱-۴ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه ۶۹
- جدول ۲-۴ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی ریزدانه ۶۹
- جدول ۳-۴ مقدار گرم مصالح سنگی ریزدانه مانده بر روی الک‌ها ۷۳
- جدول ۴-۴ مقدار گرم مصالح سنگی درشت‌دانه مانده بر روی الک‌ها ۷۳
- جدول ۵-۴ مقادیر CBR به‌ازای درصد‌های مختلف لاستیک در حالت خشک ۷۵

جدول ۴-۶ مقادیر CBR به ازای درصدهای مختلف لاستیک در حالت اشباع..... ۷۹

جدول ۴-۷ میانگین نتایج حالت خشک از آزمایش PFWD..... ۸۳

جدول ۴-۸ میانگین نتایج حالت اشباع از آزمایش PFWD..... ۸۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

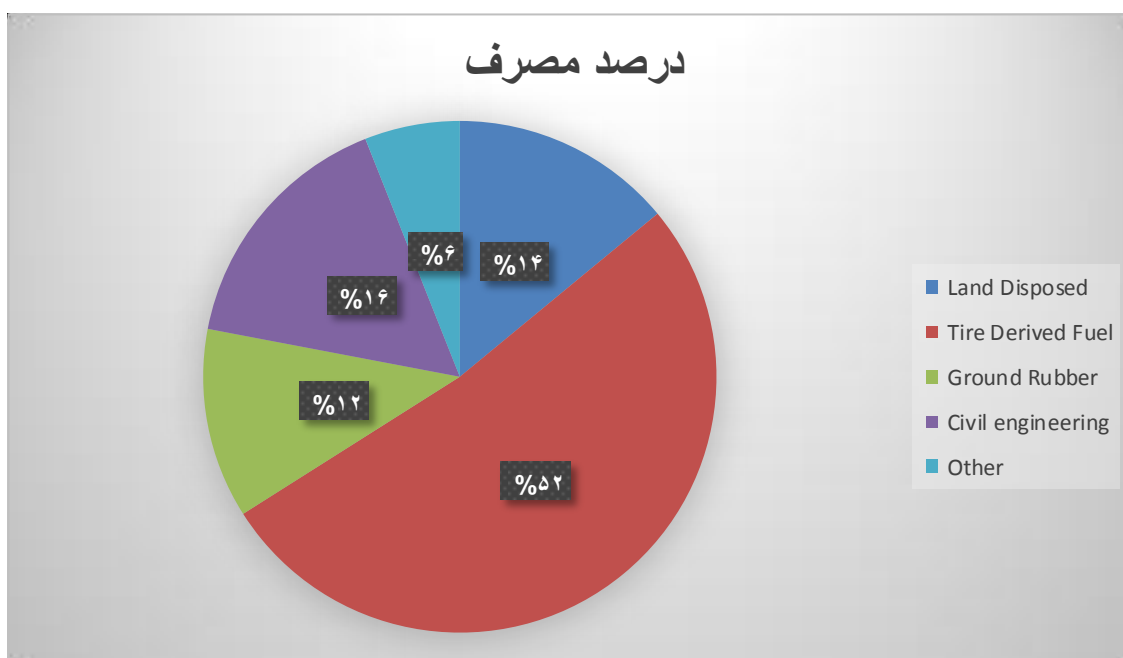
یکی از مشکلات بشر در قرن حاضر، مشکل دفع زباله‌ها و مواد زائد حاصل از تولیدات کارخانه‌ای و سایر فناوری‌های جدید است. افزایش تعداد وسایل نقلیه به‌نوبه خود باعث افزایش مواد اضافی نظیر لاستیک‌های فرسوده شده است که علاوه بر آلودگی‌های زیست‌محیطی باعث اشغال فضا در محیط گردیده است. سالیانه در دنیا میزان بسیار زیادی از لاستیک‌های مستعمل تولید می‌شوند؛ آمار ارائه شده در این مورد عددی بالغ بر شش میلیون تن در سال را نشان داده است که بیانگر دو درصد کل ضایعات جامد در دنیا می‌باشد.

استفاده سالیانه حدود ۱۶ میلیون حلقه لاستیک در ایران، توجه به بازیافت این ماده را در کشور اجتناب‌ناپذیر می‌کند. بررسی‌های آماری نشان داده است که حداقل در ۱۰ سال اول هزاره جدید آهنگ افزایش تایرهای فرسوده معادل ۲ درصد شده است. لاستیک‌های فرسوده هم‌اکنون کاربردهای زیادی دارند و استفاده از آن‌ها در تولید آسفالت و مقوله راه‌سازی یکی از این کاربردها است.

یک قاعده‌ی کلی برای تولید لاستیک فرسوده در کشورهای صنعتی این است که در هر سال به‌ازای هر نفر، یک لاستیک فرسوده تولید می‌شود، البته در کشورهای دیگر این عدد بسیار کوچک می‌باشد. بر اساس اطلاعات کسب شده از کارخانه‌ی بارز کرمان در سال ۱۳۸۳ لاستیک تولید شده در داخل کشور ۱۹۰ هزار تن و میزان واردات آن ۶۰ هزار تن بوده است. بر این اساس میزان مصرف لاستیک در کشور به ۲۵۰ هزار تن می‌رسد. اگر تولید لاستیک فرسوده برابر با مصرف لاستیک نو فرض شود و با توجه به میزان تولید لاستیک اتومبیل‌های سبک و سنگین و میزان وزن آن‌ها می‌توان یک وزن متوسط ۱۵-۱۰ کیلوگرم برای هر تایر در ایران در نظر گرفت، لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حدود ۲۰ میلیون تایر فرسوده در هر سال در کشور تولید می‌شود و قاعده‌ی ذکر شده برای تولید لاستیک فرسوده به‌ازای هر نفر در سال حدود

۰/۳ می باشد.

بنابراین همواره فکر به کارگیری لاستیک‌های فرسوده در جوامع صنعتی مطرح بوده است. به عنوان مثال در ایالت متحده آمریکا در سال ۲۰۰۵ میلادی حدود ۲۹۹ میلیون حلقه لاستیک زائد تولید شده است.



شکل ۱-۱ مقادیر استفاده از لاستیک‌های فرسوده در آمریکا

همچنین بر اساس اطلاعات کسب شده از کارخانه‌ی بارز کرمان، لاستیک‌های فرسوده‌ی مورد استفاده در کارخانجات روکش لاستیک حدود ۲۰۰۰ تن و کارخانه‌ی تولید پودر لاستیک یزد حدود ۴۰۰۰ تن است. لازم به ذکر است که پودر لاستیک تولید شده در کارخانه‌ی یزد، بیشتر در کارخانجات تولید لاستیک نو استفاده می‌شود. با توجه به اعداد فوق کمتر از ۳ درصد لاستیک‌های فرسوده به مصرف روکش کردن و تولید پودر لاستیک می‌رسند و مصارف دیگر آن چندان قابل توجه نمی‌باشند و به‌طور کلی می-

توان نتیجه گرفت که بیش از ۹۵ درصد لاستیک‌های فرسوده در ایران بدون استفاده باقی می‌ماند.

۱-۲- کاربردهای لاستیک فرسوده

۱-۲-۱- کاربرد در کفپوش‌های 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 خرد، مانند سطوح ملات‌ریزی شده دیگر است، با این تفاوت که به نحوه چشم‌گیری از آسیب‌دیدگی‌ها جلوگیری می‌کند. هم‌چنین لاستیک خرد شده به‌صورت بسیار ریز، برای پوشش زمین‌های زراعی، ورزشی و بازی به کار می‌رود. در زمین‌های بازی این پوشش می‌تواند محافظت بیشتری نسبت به چوب، سنگ‌ریزه و دیگر پوشش‌های متداول داشته باشد.

۱-۲-۲- در ساخت انواع عایق‌ها

۱-۲-۲-۱- عایق صوتی

ابزار و تجهیزات دقیق اندازه‌گیری و ابزارهای آزمایشگاهی در ارتعاش‌های بسیار پایین آسیب‌پذیرند و باید درجه عایق‌بندی مناسبی برای آن‌ها فراهم کرد. این کار به‌وسیله عایق‌های صوتی متنوع انجام می‌پذیرد. وظایف اصلی یک لرزه‌گیر یا عایق‌کننده ارتعاش عبارت است از:

۱- کاهش قابلیت انتقال

۲- داشتن میرایی مناسب برای جذب انرژی

۳- انعطاف‌پذیری و داشتن الاستیسیته مناسب

۴- صلبیت و سختی به منظور تحمل بار استاتیکی سیستم

۱-۲-۲- عایق حرارتی

ضایعات لاستیکی مناسب عایق کاری، شامل فوم پلی یورتان و کالاهای لاستیکی (مثل تایر و قطعات لاستیکی) است. به طور کلی تمام مواد غیر هادی که حاوی مقدار زیادی هوا هستند، می توانند 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 می تواند محل تجمع حشره‌ها باشد.

استفاده از عایق‌های حرارتی در مناطق سردسیر، باعث کاهش استفاده از وسایل گرمایی می شود. عایق‌های وارداتی گران است در حالی که پلاستیک ضایعاتی مثل بطری‌ها و کیسه‌های خرید به وفور یافت می شوند. این گونه مواد پلاستیکی دورریز را می توان 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 فویل پلاستیکی (کیسه‌های خرید) تشکیل می دهند. بطری‌ها چون حاوی هوا هستند می توانند مستقیماً به عنوان عایق حرارتی استفاده شوند. در صنعت، استفاده از ضایعات لاستیکی می تواند جنبه‌ی سه منظوره‌ی حرارتی، صوتی و رطوبتی داشته باشد. ورق‌هایی که در کف و دیواره‌های خودرو و صنعت ریلی استفاده می شوند که از کلیه جنبه‌های یاد شده برخوردار هستند.

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

محصولات لاستیکی و پلاستیکی می توانند 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 ماشین‌آلات ارتعاش کننده؛ روش دوم

استفاده از محصولات لاستیکی یا پلاستیکی است که به‌طور کلی کنترل‌کننده‌ی 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، به‌عبارت‌دیگر دانسیته ویژه سطح باید $563 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ باشد. در این مورد حتی کوچک‌ترین اشتباه در ساخت، باعث انتقال صدای زیادی است. عایق‌کاری با کار گذاشتن یک پانل سبک‌وزن روی یک هسته جامد بنایی به دست می‌آید. میزان دقیق بهبود عایق‌کاری، به روش کار گذاشتن عایق دوم روی ساختار اصلی بستگی دارد. از این رو نیاز به محاسبه‌ی کارشناسی برای اجرای آن است.

۱-۲-۳- انواع لرزه‌گیرهای پلیمری

لرزه‌گیرهای پلیمری شامل کفیوش‌ها 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 به‌دلیل ساختار مناسبی که دارند قادر به استهلاک تنش‌های زیاد، جذب شوک و ضربه، تعدیل نیروهای فشاری، پیچشی و خمشی در مسیر خطوط انتقال سیال هستند.

لرزه‌گیرهای پلیمری به‌منظور ایزوله کردن پایه‌ها و پل‌ها طراحی می‌شوند. این عایق‌ها به‌دلیل جلوگیری از خسارت‌های مالی و تلفات جانی فراوانی که زلزله‌ها به بار می‌آورند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند و باید ویژگی‌های کلی زیر را داشته باشد:

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 به‌عنوان 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 محیط‌زیست

لاستیک‌های فرسوده به‌مانند بسیاری از زباله‌های دیگر تأثیرات مخرب بدی بر محیط‌زیست وارد می‌کنند. به‌عنوان مثال انبار کردن این زباله‌ها همواره مخاطره‌آمیز می‌باشد. در دهه‌ی اخیر، ۵۴ مورد آتش‌سوزی انبار لاستیک در آمریکا و کانادا ثبت شده است. ضایعات لاستیک در صورت آتش‌سوزی، دود غلیظ سیاهی را وارد هوا خواهند کرد که گاهی تا ساعت‌ها ادامه دارد. طی این فرآیند، مخلوطی از ذرات فوق‌العاده 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. آتش‌سوزی حتی می‌تواند فلزات سمی هم‌چون کرومیوم، آرسنیک، روی، باریوم، کبالت، مس، آهن، آلومینیوم، منگنز و وانادیوم را با توجه به میزان به‌کاررفته وارد محیط کند. درمجموع 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 کنترل شده نیستند، بروز چنین فجایعی دور از انتظار نخواهد بود.

۱-۴- 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 اشکال مختلف در خود استفاده کرده است. در بخش روسازی از صنعت عمران، به‌وفور تأثیرات مثبت و منفی لاستیک در قشر آسفالتی در سال‌های اخیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پایان‌نامه سعی شده است تا راه‌حلی دیگر جهت ارزیابی لاستیک، مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌طور کلی در این پایان‌نامه افزودن لاستیک در لایه اساس راه به‌عنوان جایگزین بخشی از دانه‌بندی لایه اساس مورد بررسی قرار گرفته است و جهت ارزیابی و بررسی تأثیرات این جایگزینی آزمایشاتی نظیر نسبت باربری کالیفرنیا (CBR^1)، $PFWD^2$ و سایر آزمایشات لازم جهت بررسی خصوصیات لایه اساس و سنگ‌دانه‌ها به انجام رسیده است.

¹ California Bearing Ratio

² Portable Falling Weight Deflectometer

۱-۵- ضرورت تحقیق

در بخش‌های قبل نشان داده شد که از لاستیک فرسوده به دلیل تأثیرات منفی که بر محیط‌زیست می‌گذارد و باعث بروز مشکلاتی نظیر آتش‌سوزی، انواع بیماری‌ها و غیره می‌شوند در قسمت‌های مختلف صنعت مانند عایق‌های حرارتی، عایق‌های صدایی، مهندسی عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حجم بالای این زباله صنعتی و روند رو به رشد تولید آن در دهه‌های اخیر از یک سو و استفاده محدود آن از سوی دیگر این نیاز را به وجود آورده است که محدوده‌ی کاربرد این ماده در سایر حوزه‌ها و زمینه‌های قابل استفاده گسترش داده شود.

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، پنجره‌ای دیگر جهت استفاده از این ماده در صنعت مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۷- معرفی فصل‌های پایان‌نامه

به‌طور کلی این پایان‌نامه از پنج فصل تشکیل شده است؛ در فصل اول صورت‌مسئله، ضرورت و نوآوری در پژوهش بیان شده، فصل دوم مروری بر کاربردهای عمده لاستیک فرسوده در مهندسی عمران و تحقیقات صورت گرفته در این باب را بیان می‌کند؛ در فصل سوم شرحی از ویژگی‌های لازم لایه اساس راه

و آزمایشات صورت گرفته به همراه استانداردهای آزمایش بیان شده است؛ فصل چهارم به بیان نتایج آزمایشات و بحث در مورد آنها اختصاص داده شده است؛ فصل پنجم به صورت خلاصه نتایج پژوهش و پیشنهاداتی در مورد زمینه‌های قابل بررسی توضیح داده می‌شود و در نهایت منابع استفاده شده در این پژوهش و پیوست آورده شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

همان‌گونه که در فصل اول به آن اشاره شد با توجه به حجم زیاد لاستیک‌های فرسوده در محیط و نرخ تولید روزافزون این ماده در دهه‌های اخیر هم‌زمان با پیشرفت صنعت، سعی شده است در سال‌های اخیر از این ماده در صنایع مختلف استفاده شود. مهندسی عمران یکی از صنایعی است که با توجه به ویژگی‌های خاص لاستیک از این ماده در آن استفاده می‌شود. به‌طور 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 می‌پردازیم.

۲-۲- استفاده از لاستیک فرسوده در لایه‌ی آسفالتی راه

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.

۲-۱- محدودیت‌های خواص قیرهای معمولی

به‌طور کلی محدودیت‌های خواص قیرهای معمولی موجود را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- در دماهای بالا و بارگذاری طولانی مدت، امکان جاری شدن قیر، قیر زدگی، تغییر شکل‌های دائم و شیار شدگی مخلوط آسفالتی وجود دارد؛

- عدم برآورده شدن نیازهای عملکردی مناطق آب و هوایی مختلف؛

- در دماهای پایین و بارگذاری‌های طولانی مدت، تحت اثر تنش‌های حرارتی، امکان بروز ترک در مخلوط آسفالتی وجود دارد؛

- در دماهای پایین و بارگذاری‌های کوتاه‌مدت، قیر شکننده شده و امکان ایجاد ترک‌های مکانیکی به وجود می‌آید؛

- عدم امکان استفاده در برخی از مخلوط‌های آسفالتی نظیر آسفالت متخلخل و یا ماستیک آسفالت؛

- عدم امکان استفاده در روکش‌های نازک که دارای کیفیت و دوام کافی نمی‌باشند.

محدودیت‌های قیر معمولی باعث گردید که در زمینه اصلاح خواص قیر و در نتیجه اصلاح عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، گام‌هایی برداشته شود. در این زمینه روش‌های مختلف و طیف گسترده‌ای از مواد اصلاح‌کننده و افزودنی به‌منظور بهبود خواص و رفتار قیر و در نتیجه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است که میزان و نوع تأثیرات این مواد در تغییرات رفتاری آسفالت کاملاً متفاوت بوده است.

در پاره‌ای از اوقات در حین فرآیند تولید قیر در پالایشگاه، اصلاح روی مشخصات قیر صورت می‌گیرد و قیر با ویژگی‌های مورد نظر تولید می‌شود؛ اما در اکثر مواقع برای رسیدن قیر به ویژگی‌های مورد نظر، از افزودنی‌هایی نظیر گوگرد، خرده لاستیک، انواع پلیمرها، مواد شیمیایی و الیاف‌ها استفاده می‌شود.

۲-۲-۲- قیرهای اصلاح شده

به‌طور کلی قیرهای حاوی مواد افزودنی را قیرهای اصلاح شده می‌نامند. این مواد افزودنی ساختار شیمیایی و فیزیکی قیر را تغییر داده و در نتیجه باعث تغییر خواص در قیر خالص می‌شود. دکاودن‌بری اولین شخصی بود که در سال ۱۸۹۹ میلادی، از کائوچو به‌عنوان افزودنی در قیر استفاده کرد. از قرن بیستم استفاده از قیرهای اصلاح شده در اروپا متداول شده است ولی در ایران برای اولین بار بین سال‌های ۱۳۴۶ - ۱۳۴۵ در یک پروژه در شمال کشور از کائوچوی لاتکس به‌عنوان افزودنی در قیر استفاده شد. در چند سال اخیر در سرتاسر دنیا به خصوص ایالت متحده آمریکا، مطالعات گسترده‌ای در مورد کاربرد استفاده از این قیرها صورت گرفته است. بر اساس استاندارد^۱ SHRP، خصوصیات و خواص قیر باید به نحوی باشد که معیار سختی قیر را در دماهای بالا و پایین برآورده سازد در حالی که اکثر قیرهای مرسوم، قادر به تأمین این ویژگی در شرایط آب و هوایی مختلف نیستند. به‌طور کلی هدف از اصلاح مشخصات قیر را می‌توان افزایش خدمت‌دهی و عمر مفید روسازی و بهبود عملکرد روسازی دانست. مشخص است که عملکرد بهتر روسازی باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری می‌شود ولی باید توجه داشت که به‌کارگیری مواد افزودنی سبب بالا رفتن مخارج اولیه پروژه می‌شود. در این صورت شاید بتوان با یک محاسبه‌ی دقیق اقتصادی و با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌های تعمیرات، افزایش مخارج اولیه در ساخت را توجیه کرد [۱].

۲-۲-۳- تاریخچه‌ی اصلاح قیر

در دهه‌ی ۱۹۳۰ در اروپا، پروژه‌های آزمایشی با قیرهای اصلاح‌شده انجام شد و در دهه‌ی ۱۹۵۰ استفاده از لاتکس نئوپرن در آمریکای شمالی و کانادا آغاز شد. در انگلستان استفاده از قیرهای اصلاح‌شده

^۱ Strategic Highway Research Program

از سال ۱۸۴۳ و با افزودن پودر لاستیک آغاز شده است. در آمریکا استفاده از گوگرد به منظور سخت کردن قیرهای بسیار نرم به سال ۱۸۶۰ برمی‌گردد و به دنبال آن، از اوایل دهه‌ی ۱۸۹۰، استفاده از فیلرهای معدنی آغاز شد.

مهندسين راه‌سازی از دهه‌ی ۱۹۵۰ سعی در تلفیق لاستیکِ تایر مستعمل و قیر کردند. اولین آزمایشاتِ دربرگیرنده‌ی ادغام لاستیکِ طبیعی با قیر، در دهه‌ی ۱۸۴۰ صورت گرفته بودند. آزمایش-کنندگان امیدوار بودند که ماهیت انعطاف‌پذیری لاستیک را به پوششِ سطح بیفزایند و با این عمل عمرِ روسازی را افزایش دهند ولی این کار بسیار سخت بود و فرمولاسیون‌های اولیه از مزیت‌های کمی برخوردار بودند. بالاخره در سال ۱۹۶۰ مک‌دونالد موفق شد به فرمولاسیونی خوب دست یابد. او فعالیت خود را در شهر فونیکس آریزونا، با افزودن لاستیک به قیرِ داغ برای ترمیم گودال‌ها و چاله‌ها، آغاز نمود. او به کمک تجربه دریافت، در صورتی که پودرِ لاستیک در مدت ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت با قیر مخلوط شود، ماده‌ی حاصل شده مشخصات متفاوتی خواهد داشت که او این ماده را لاستیک آسفالتی^۱ نامید [۱].

تحقیقات بر روی آسفالتِ لاستیکی از سال ۱۹۶۸ در مرکز تحقیقات حمل و نقل آریزونا آغاز شد. از سال ۱۹۷۵، پودرِ لاستیک، به‌عنوان ماده افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی به‌صورت فراگیر مورد استفاده - قرار گرفت. در سال ۱۹۸۸، انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM)^۲ مفهوم لاستیکِ آسفالتی را چاپ کرد، در ASTM D8_88 آمده است، مخلوطی از قیر، لاستیکِ بازیافت شده و افزودنی‌های دیگر که لاستیک حداقل ۱۵ درصد وزنِ کل آن مخلوط را تشکیل داده و به اندازه‌ی کافی در قیرِ داغ واکنش دهد تا اجزای لاستیکی متورم شده باشند. تحقیقات گسترده‌ای توسط گروه مهندسين نظامی آمریکا و بخش خصوصی در سال ۱۹۹۲ پایان یافت. در سال ۱۹۹۵ نیز بررسی افزودنیِ پودرِ لاستیک در روسازی آسفالتی توسط

^۱Asphalt Rubber

^۲American society for Testing and Materials

اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA¹) آغاز شد. اگرچه این بررسی پایان نپذیرفت ولی خلاصه‌ای از نتایج آن در سال ۱۹۹۶ توسط انستیتو تحقیقات حمل و نقل دانشگاه اورگون به چاپ رسید [۱].

۲-۲-۴- برهمکنش بین پودر لاستیک و قیر

برهمکنش داخلی بین ذرات پودر لاستیک و قیر از نوع فیزیکی است. ذرات پودر لاستیک در حین نفوذ، بخشی از آروماتیک‌ها (روغن) را در خود جذب می‌کند که سبب تورمشان می‌شود و اندازه‌ی آن‌ها بستگی به دما دارد. سطح پودر لاستیک قبل از اختلاط با قیر، آسیب‌دیده و پر از خلل و فرج می‌باشد. بعد از اختلاط سطح ذرات پودر لاستیک نامعلوم است و اثری از خلل و فرج دیده نمی‌شود. جذب روغن فاز مالتن توسط پودر لاستیک سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود. به‌منظور تأمین روغن کافی برای تورم پودر لاستیک و جلوگیری از افزایش شدید ویسکوزیته، روغن به قیر اضافه می‌شود. روغن‌هایی که به قیر اضافه می‌شوند، قیر را نرم می‌کنند. روغن‌هایی با جنس آروماتیک یا نفتی ترجیح داده می‌شوند.

فاکتورهای زیادی وجود دارد که نقشی اساسی در برهمکنش قیر با ذرات پودر لاستیک ایفا می‌کند. برهمکنش بستگی زیادی به جنس روغن‌های آروماتیک در قیر دارد، بنابراین منبع قیر تأثیر خاصی بر روی خواص قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک دارد. خواص پودر لاستیک که می‌تواند بر روی برهمکنش تأثیر بگذارند روش تولید، اندازه‌ی ذرات، سطح مخصوص و ترکیبات شیمیایی هستند. سطح ذرات پودر لاستیک بیشترین تأثیر را در برهمکنش دارد. با افزایش سطح ذرات، برهمکنش افزایش پیدا می‌کند. هر چه میزان خروج استن بیشتر باشد میزان رزین دوستی^۲ در پودر لاستیک بیشتر است. نفوذ پودر لاستیک در قیر بیشتر می‌شود و از طرف دیگر اشباع‌ها و آروماتیک‌ها می‌توانند آن را متورم کنند. تورم بیشتر پودر لاستیک هم‌زمان با نفوذ دو طرفه سبب افزایش بهبودیافتگی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک می‌شود [۲].

¹ Federal Highway Administration

² Resin Like

۲-۵- تأثیر لاستیک فرسوده بر ویژگی‌های قیر

آقاجانی و همکاران در سال ۱۳۹۰ در مقاله‌ای، تأثیرات افزودن لاستیک به قیر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود از قیر ۶۰-۷۰ AC استفاده نمودند؛ که مشخصات قیر مورد استفاده آن‌ها در جدول ۱-۲ آمده است. آن‌ها در این پژوهش پودر لاستیک را با نسبت‌های ۶-۲۶ درصد به قیر افزودند و آزمایشات خود را به نفوذپذیری، نقطه نرمی و دمای PG و غیره معطوف کردند.

جدول ۱-۲ مشخصات قیر مورد استفاده [۲]

بازگشت‌پذیری الاستیک (%)	انگمی (cm)	نقطه نرمی (°C)	درجه نفوذ (°/1mm)	نوع قیر
۱۷	>۱۰۰	۵۰/۶	۶۴/۷	قیر ۶۰-۷۰

نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که افزودن ۲۶ درصد پودر لاستیک به قیر سبب کاهش ۳۲ درصدی درجه نفوذ قیر می‌شود و نقطه نرمی و بازگشت‌پذیری الاستیک را به ترتیب ۴۰ و ۳۶۶ درصد افزایش می‌دهد. در گام بعدی، نتایج حاصل از آزمایشات صورت گرفته توسط این پژوهشگران نشان داد که افزودن پودر لاستیک به قیر حساسیت حرارتی قیر را کاهش می‌دهد و نشانه درجه‌ی نفوذ قیر از مقدار ۱/۱۶- برای نمونه کنترل به ۱/۹۸ برای نمونه حاوی ۲۶ درصد پودر لاستیک می‌رسد.

آقاجانی خاصیت انگمی قیر را در سه درصد ۱۲، ۲۰ و ۲۶ درصد از افزودنی لاستیک مورد بررسی قرار داد و نتایج حاصل از آزمایشات آن‌ها نشان داد که خاصیت انگمی قیر برای نمونه‌های کنترل ۷۰ سانتی-متر و برای نمونه‌های حاوی ۱۲، ۲۰ و ۲۶ درصد پودر لاستیک به ترتیب ۱۷/۵، ۱۴/۳ و ۱۲/۷ گزارش شد؛ هم‌چنین دمای فراس از مقدار ۱۱- برای نمونه کنترل به ۴۲- برای نمونه حاوی ۲۶ درصد پودر

لاستیک کاهش یافت.

در ادامه روند آزمایشات، آقاجانی و همکاران آزمایشات خود را به قبل و بعد از پیرشدگی قیر معطوف کردند که نتایج حاصل از آزمایشات برگشت پذیری الاستیک و نقطه نرمی این مرحله از آزمایشات در جدول ۲-۲ آمده است.

در آخرین گام از این پژوهش دمای بالای PG قیرها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مرحله از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که افزایش درصد لاستیک در قیر سبب افزایش دمای بالای PG شده است. با توجه به کاهش دمای فراس که تخمین مناسبی از دمای پایین PG می باشد و افزایش دمای بالای PG، در نتیجه بازه دمایی PG به میزان زیادی افزایش یافته که نشان دهنده بهبود در دامنه دمایی و عملکردی قیر است [۲].

شاکری و همکاران در پژوهش خود در سال ۱۳۹۲ به مقایسه آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از قیر ۶۰-۷۰ AC با وزن مخصوص $\frac{gr}{cm^3}$ ۱/۰۳، خاصیت انگمی برابر با ۱۰۰ و درجه نفوذ معادل ۶۶ و سنگ‌دانه‌هایی با مشخصات نشان داده شده در جدول ۲-۳ استفاده کردند.

جدول ۲-۲ مقایسه نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک قبل و بعد از RTFO [۲]

بعد از RTFO			قبل از RTFO		
بازگشت پذیری الاستیک (%)	نقطه نرمی (°C)	نمونه	بازگشت پذیری الاستیک (%)	نقطه نرمی (°C)	نمونه
۱۶	۵۱/۱	کنترل	۱۵	۴۷	کنترل
۵۷	۵۶/۸	حاوی ۱۰ درصد لاستیک	۳۶	۵۳/۵	حاوی ۱۰ درصد لاستیک
۷۷	۶۴/۸	حاوی ۱۸ درصد لاستیک	۴۵	۵۷	حاوی ۱۸ درصد لاستیک
۸۲	۷۱/۹	حاوی ۲۶ درصد لاستیک	۷۰	۶۵/۷	حاوی ۲۶ درصد لاستیک

جدول ۲-۳ خصوصیات مصالح سنگی [۳]

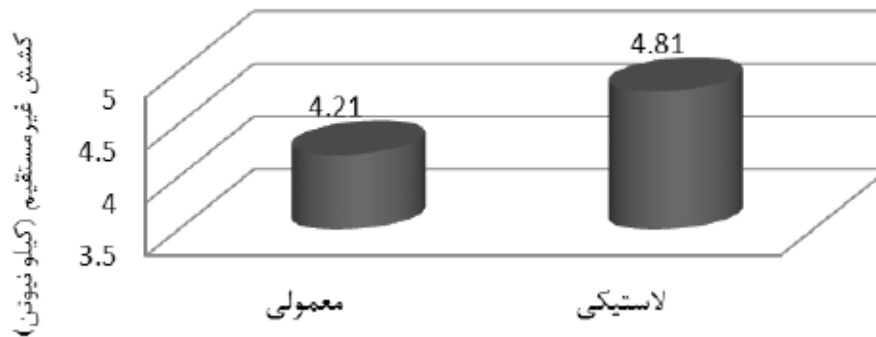
سایش لس آنجلس	ارزش ماسه‌ای	جذب آب	چگالی مصالح	مقاومت فشاری
%	%	%	$\frac{gr}{cm^3}$	$\frac{kg}{cm^2}$
۲۳	۶۳/۲	۰/۹۶	۲/۵۸	۴۰۰

نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که مقاومت مارشال آسفالت لاستیکی، در حدود ۳ درصد از آسفالت معمولی بیشتر شده است. از طرف دیگر نتایج آزمایشات مدول برجهندگی که یک معیار مهم در تعیین ضخامت و طراحی لایه‌های روسازی است، در شکل ۲-۱ آمده است و همان‌طور که از نمودار مشخص است در نمونه‌های دارای لاستیک افزایش ۳۴ درصدی در مدول برجهندگی دیده شد.



شکل ۲-۱ مقایسه مدول برجهندگی آسفالت معمولی و لاستیکی [۳]

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



شکل ۲-۲ مقایسه کشش غیرمستقیم آسفالت معمولی و لاستیکی [۳]

در آخرین گام از این پژوهش پدیده شیارشدهگی در آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. شاکری و همکاران برای انجام این پژوهش بیش از ۸۰۰۰ بار چرخشی شبیه به چرخ خودرو را از روی نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده عبور دادند. نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان از کاهش ۴۰ درصدی شیارشدهگی نمونه آسفالت لاستیکی در مقایسه با آسفالت معمولی داد [۳].

ممون^۱ و فرانکو^۲ در سال ۲۰۰۵ از قیر با درجه عملکرد PG-۳۴-۵۲ و خرده لاستیک اصلاح‌شده شیمیایی با درصدهای ۳، ۵، ۶/۵، ۸ و در دمای اختلاط ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد، تعداد دور rpm ۳۰۰۰ و زمان ۱/۵ ساعت استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش میزان پودر لاستیک درجه‌ی عملکرد قیر بهتر می‌شود [۴].

¹ Memon

² Franco

تحقیقات جونیور^۱ و اودا^۲ در سال ۲۰۰۱ نشان می‌دهد افزایش پودر لاستیک تا ۱۲ درصد باعث کاهش درجه‌ی نفوذ می‌گردد و بعد از این مقدار پایداری درجه‌ی نفوذ برای مقادیر پودر لاستیک ۱۸ تا ۲۴ درصد مشاهده می‌شود. نقطه‌ی نرمی قیر لاستیکی با افزایش درصد لاستیک افزایش می‌یابد. این مسأله عملاً مقاوم شدن مخلوط را در برابر شیارشدگی نشان می‌دهد [۵].

در تحقیق ناوارو^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۴، از قیر ۷۰-۶۰ و پودر لاستیک در دمای اختلاط ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۱/۵ ساعت و تعداد دور ۱۲۰۰ rpm استفاده شده است. ایشان نشان دادند که افزودن پودر لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته و افزایش انعطاف‌پذیری در دماهای پایین می‌شود [۶].

۲-۳- استفاده از لاستیک در مخلوط‌های بتنی و سیمانی

یکی از استفاده‌های لاستیک فرسوده 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، جمع‌شدگی بتن، عمل‌آوری و سخت‌شدگی بتن، جذب انرژی کم و غیره می‌باشد. بکار بردن مواد ضایعاتی در بتن در کشورهای جهان سوم هنوز رونق نیافته است و رونق این امر نیازمند تشویق پیمانکاران و اجبارات دولتی است. استفاده از لاستیک 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.

¹ Junior

² Oda

³ Navarro

۲-۳-۱- اشکال مختلف لاستیک تایر ضایعاتی در بتن

۱- ذرات لاستیک درشت‌دانه: برای جایگزینی به جای شن بکار می‌رود و اندازه ذرات آن بین ۹/۵ تا ۷۵ میلی‌متر می‌باشد.

۲- لاستیک به شکل الیاف: برای جایگزینی به جای شن بکار می‌رود به طوری که عرض و ضخامت آن حدود ۵ میلی‌متر و طول آن می‌تواند بین ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر باشد.

۳- ذرات لاستیک ریزدانه: برای جایگزینی به جای ریزدانه بکار می‌رود و دانه‌بندی آن بین ۰/۴۲۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد.

۴- پودر لاستیک: برای جایگزینی به جای سیمان به کار می‌رود و دانه‌بندی آن بین ۰/۰۷۵ تا ۰/۴۷۵ میلی‌متر می‌باشد [۷].



شکل ۲-۳ اشکال مختلف لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در بتن [۷]

۲-۳-۲- تأثیر لاستیکِ فرسوده بر ویژگی‌های مخلوط‌های سیمانی

هیون^۱ در سال ۱۹۹۶ خرده‌های لاستیک به ابعاد $4/75$ میلی‌متر را به مقدار ۱ تا ۱۰ درصد وزنی نسبت به سیمان به مخلوط بتن اضافه نمودند و نشان دادند که تغییرات چندانی در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود.

شکل ۲-۴ نمونه‌های بتن حاوی درشت‌دانه لاستیک تحت فشار را نشان می‌دهد. این عکس‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ها بار فشاری زیادی را بعد از گسیختگی تحمل می‌کنند و تغییر مکان‌های زیادی را بدون متلاشی شدن دارند. این جابجایی‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ، پس از باربرداری قابل بازگشت هستند. این رفتار نشان‌دهنده جذب انرژی بالای بتن حاوی لاستیک است [۸].



شکل ۲-۴ گسیختگی نمونه‌های حاوی درشت‌دانه لاستیکی تحت فشار [۸]

تاپکو^۲ در سال ۱۹۹۵ ریزدانه سنگی را با ریزدانه لاستیکی و درشت‌دانه سنگی را با درشت‌دانه لاستیکی جایگزین نمود. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که مقاومت فشاری استوانه‌های ۶ ماهه بتن شاهد $33/67$ مگا پاسکالی، با افزودن ۱۵، ۳۰، ۴۵ درصد ریزدانه لاستیکی به ترتیب به ۲۰/۲۳، ۱۱/۰۶،

¹ Huynh

² Topcu

۷/۱۶ مگا پاسکال و با افزودن همین مقدار درشت‌دانه لاستیکی به ۱۵/۷۵، ۱۰/۸۲ و ۷/۷۲ مگا پاسکال کاهش یافته است. این مسئله نشان می‌دهد که درشت‌دانه لاستیکی، کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به ریزدانه لاستیکی از خود نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین گزارش دادند که نمونه‌ها بعد از گسیختگی، بار قابل‌توجهی را تحمل می‌کنند و جابجایی‌های قابل‌توجهی را بدون از هم پاشیدن کامل متحمل می‌شوند؛ که این جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها، اغلب بعد از باربرداری، قابل بازگشت است [۹].

اسمادی و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی روی تأثیرات افزودن خاکستر لاستیک (TRA) به‌عنوان فیلر به ملات سیمانی انجام دادند. خاکستر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش از سوزاندن مقادیر عمده‌ای تراشه لاستیک در دمای 850°C برای مدت ۷۲ ساعت به دست آمده است. این پژوهشگران TRA را با درصد‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزین ماسه موجود در ملات سیمانی کردند.

در اولین گام از آزمایشات، این پژوهشگران درصد هوای موجود در نمونه‌ها را با هم مقایسه کردند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که به ترتیب به‌ازای افزودن ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد TRA به مخلوط، درصد هوای موجود در نمونه‌ها به ترتیب ۱۵، ۲۷، ۳۵ و ۴۰ درصد کاهش یافته است.

در گام دوم از آزمایشات زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان از افزایش ۵۱ و ۴۴ درصدی زمان گیرش نهایی و اولیه نمونه حاوی ۱۰ درصد TRA نسبت به نمونه کنترل داد. در گام بعدی از آزمایشات، تأثیرات افزودن خاکستر لاستیک بر فاکتور دوام و مدول دینامیکی الاستیسیته مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات اسمادی و همکاران نشان داد که افزودن TRA سبب افزایش مدول دینامیکی و فاکتور دوام ملات سیمانی می‌شود.

¹ Smadi et al

اسمادی در آخرین گام، مقاومت در برابر نفوذ یون کلر نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه حاوی ۵ و ۱۰ درصد TRA را با نمونه کنترل مقایسه کرد. نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که برای نمونه-های ۲۸ روزه، مقدار بار الکتریکی برای نمونه کنترل، نمونه حاوی ۵ درصد خاکستر لاستیک و نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر لاستیک به ترتیب ۳۲۰۰، ۸۷۰ و ۴۲۰ کولن به دست آمده است و این مقادیر برای نمونه‌های ۹۰ روزه به ترتیب ۱۸۷۵، ۵۲۰ و ۳۵۰ کولن می‌باشد [۱۰].

بهرنیا و همکاران در سال ۱۳۸۸ به بررسی تأثیرات افزودن پودر لاستیک در بتن پرداختند. در این تحقیق، لاستیک تایلر با اندازه ذرات ۰/۲۷-۰/۱۳ mm جایگزین ۱۲ و ۱۸ درصد سیمان در طرح اختلاط بتن شد. در این پژوهش طرح اختلاط بتن بر اساس BS صورت گرفت و نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ در نظر گرفته شد.

در اولین گام از آزمایشات بهرنیا و همکاران، مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ و ۷ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که مقدار مقاومت فشاری ۳ روزه بتن از مقدار $\frac{229}{9} \frac{kg}{cm^2}$ برای نمونه کنترل به $\frac{136}{85} \frac{kg}{cm^2}$ و $\frac{96}{65} \frac{kg}{cm^2}$ به ترتیب برای نمونه حاوی ۱۲ و ۱۸ درصد لاستیک رسیده است و مقدار مقاومت فشاری ۷ روزه از مقدار $\frac{310}{4} \frac{kg}{cm^2}$ برای نمونه کنترل به $\frac{229}{36} \frac{kg}{cm^2}$ و $\frac{162}{3} \frac{kg}{cm^2}$ به ترتیب برای نمونه حاوی ۱۲ و ۱۸ درصد لاستیک کاهش یافته است.

در گام دیگر از آزمایشات درصد جذب آب نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که جایگزینی ۱۲ درصد پودر لاستیک باعث کاهش ۲/۱ درصدی جذب آب شده است اما جایگزینی ۱۸ درصد سیمان با پودر لاستیک باعث افزایش حدود ۸ درصد جذب آب بتن گردید. در

آخرین گام از آزمایشات بهفرنیا، وزن مخصوص نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایشات نشان داد که افزودن لاستیک به بتن سبب کاهش ۶ درصدی وزن مخصوص بتن شده است [۷].

۲-۴- تأثیر لاستیک فرسوده بر ویژگی خاک‌ها

خاک بستر محل قرارگیری سازه‌های مهندسی است که ضعف در باربری و خواص مکانیکی آن برای پروژه‌های مهندسی مشکل‌آفرین است. بنابراین در مواردی که خاک موجود در محل اجرای یک پروژه، ویژگی‌های مورد نیاز مهندسی ژئوتکنیک را نداشته باشد، لازم است که کیفیت خاک محل برای تحمل بارهای وارده ارتقاء داده شود تا شالوده یا سازه در مدت‌زمان سرویس‌دهی دچار مشکل نشود. از این رو در دهه‌های اخیر، فعالیت‌هایی برای رفع این مشکل در خاک صورت گرفته است و پژوهشگران راه‌حل‌های مختلفی را برای رفع مشکلات، بیان کرده‌اند.

از جمله مهم‌ترین راه‌حل‌ها می‌توان به تثبیت و مسلح‌کردن خاک با روش‌های مختلف اشاره کرد. تثبیت و مسلح‌کردن خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک اطلاق می‌شود. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای اجرا و بهره‌برداری سریع پروژه‌های عمرانی، اصلاح خاک است که با روش‌های مختلف از جمله مکانیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و الکتریکی امکان‌پذیر است. مقاومت هر خاک وابسته به پیوند ذرات خاک می‌باشد، این مقاومت را در مقیاس‌های کوچک و بزرگ می‌توان بهبود بخشید. در مقیاس کوچک، مقاومت را باید از طریق ایجاد عاملی برای پیوند بین ذرات بالا برد. این کار را می‌توان به روش‌های گوناگون و با استفاده از مواد مختلف انجام داد که این روش‌ها تحت عنوان تثبیت خاک معرفی می‌شود. انتخاب نوع ماده تثبیت‌کننده تابع عوامل مختلفی از قبیل نوع خاک، آب و هوای منطقه، میزان آمد و شد، هدف از تثبیت، هزینه‌های عملیاتی و هزینه تهیه آن‌ها بستگی دارد. برای تثبیت خاک تاکنون مواد بسیاری استفاده شده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آهک، سیمان و قیر اشاره کرد

که بسیار پرکاربرد هستند. با گذر زمان و انجام پژوهش‌های متعدد، عیب‌ها و مزیت‌های این مواد مشخص شد، این امر باعث شد تا مهندسان به بررسی و کاربرد مواد دیگری، جهت تثبیت خاک روی بیاورند. در مقیاس بزرگ با استفاده از لوازم و تجهیزات، باید پیوند بین ذرات را استحکام بخشید که این روش غالباً مسلح‌سازی خاک نامیده می‌شود. روش دیگری که برای بالا بردن مقاومت وجود دارد بصورت ترکیبی است.

در سال‌های اخیر، توجه بیشتر به محیط‌زیست، سبب شد تا برخی از ضایعات صنعتی جهت تسلیح خاک مورد بررسی قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین این مواد، لاستیک فرسوده تایر خودروها می‌باشد که بدلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود در اندازه‌های مختلف، در انواع خاک‌ها به‌خصوص خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی، نشان از برخی تأثیرات این ماده در خاک می‌دهد. امکان استفاده از لاستیک‌های فرسوده در خاک، اولین بار در سال ۱۳۶۹ توسط ویدال^۱ بیان شد.

۲-۴-۱- تأثیر افزودن لاستیک بر خاک

کتین و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۶، تحقیقات خود را روی خاک رس چسبنده انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق ذرات تایر را به دو صورت ریز و درشت با نسبت‌های وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد به خاک افزودند. در این پژوهش تأثیرات ذرات ریز و درشت به‌صورت جداگانه توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفت. کتین و همکاران حدود اتربرگ، نفوذپذیری، مقاومت برشی، کرنش عمودی و حداکثر وزن مخصوص خشک را در این پژوهش مورد ارزیابی قرار دادند. خاک رس مورد استفاده در این پژوهش از نوع CL و دارای مشخصاتی چون $LL = 41/6$ ، $PL = 25/7$ و $G_S = 2/72$ بود.

¹ Vidal

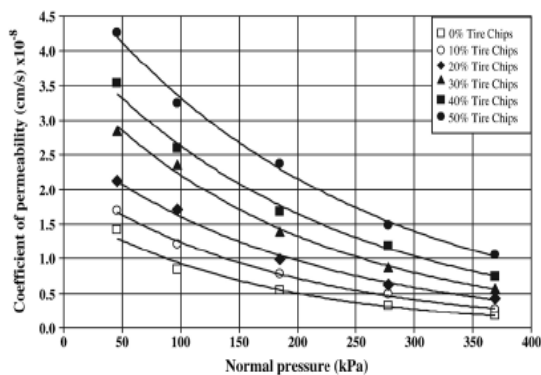
² Cetin et al

نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که افزودن ذرات ریز یا درشت لاستیک به خاک رس تا ۳۰ درصد تأثیر چندانی در LL ندارد ولی پس از ۳۰ درصد سبب کاهش LL خاک می‌شود. هم-چنین نشان دادند که افزودن تا ۴۰ درصد لاستیک، سبب کاهش PL خاک می‌شود و پس از آن PL رو به افزایش گام برمی‌دارد.

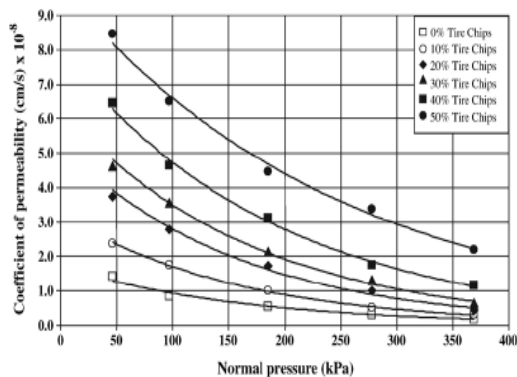
در گام دوم از تحقیقات صورت گرفته توسط این پژوهشگران فاکتور نفوذپذیری خاک مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در این تحقیق از روش هد افتان در تنش‌های نرمال ۴۶، ۹۳، ۱۸۵، ۲۸۷ و ۳۷۰ کیلو پاسکال استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایشات همان‌طور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، نشان داد که افزایش درصد لاستیک در خاک سبب افزایش شاخص نفوذ خاک می‌شود درحالی‌که افزایش تنش نرمال، شاخص نفوذ را کاهش می‌دهد. در نتیجه این پژوهشگران بیان کردند که خاک رس-لاستیک نباید در جاهایی که نفوذپذیری زیاد لازم است، مورد استفاده قرار گیرد.

در گام بعدی از این پژوهش، حداکثر وزن مخصوص نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایشات نشان داد که حداکثر وزن مخصوص خشک به دست آمده $\frac{kn}{m^3}$ ۱۵/۷۹ در درصد رطوبت ۱۹ برای نمونه بدون لاستیک به دست آمد.

در آخرین گام از این پژوهش کتین و همکاران به بررسی تغییر مکان قائم و تنش برشی پرداختند. نتایج آزمایشات کتین و همکاران نشان داد که مقاومت برشی تا ۳۰ درصد ریزدانه و ۲۰ درصد درشت‌دانه افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزودن حداکثر ۴۰ درصد لاستیک به صورت ریزدانه یا درشت‌دانه به خاک چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافت [۱۱].



b



a

شکل ۲-۵ رابطه بین فاکتور نفوذپذیری خاک و تنش نرمال وارده به ازای افزودن لاستیک ریز (a) و درشت (b) [۱۱]

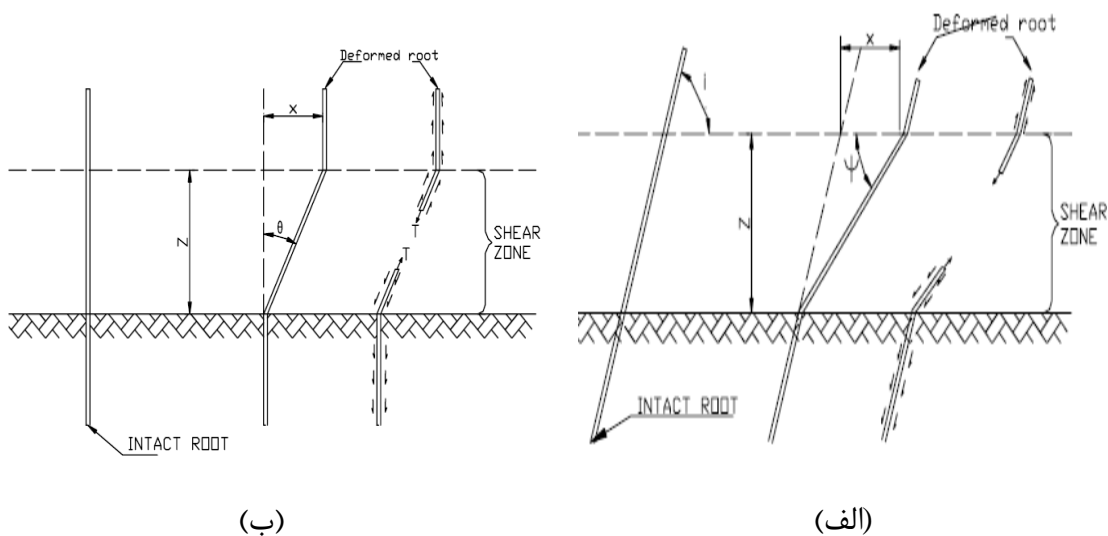
هاتف^۱ و رحیمی^۲ در سال ۲۰۰۶ در مقاله‌ای به بررسی تأثیر افزودن قطعات لاستیک در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. این پژوهشگران تئوری مسأله خود را این‌گونه بیان کردند؛ که مدل‌سازی حالت تنش و کرنش ماسه مسلح در حین شکست و تغییر شکل بسیار دشوار می‌باشد و دو روش تجزیه و تحلیل المان محدود پیشرفته و تعادل نیروها، در پیش‌بینی رفتار مقاومت برشی ماسه مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر روش دوم که توانایی شناسایی پارامترهای مهم در تحقیقات تجربی را دارد مورد بحث ما قرار می‌گیرد. حالت‌های مسلح‌سازی خاک در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۲-۶ مشخص است مسلح‌سازی خاک به دو صورت عمودی (۲-۶-الف) و یا مایل (۲-۶-ب) 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 نیروهای کششی (T) در عوامل تسلیح‌سازی خاک می‌شود که می‌توان این نیروی کششی به وجود آمده را به دو

¹ Hataf

² Rahimi

مؤلفه‌ی 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 مؤلفه‌ی قائم نیروی کششی موجود در عامل تسلیح سبب افزایش تنش محصورشدگی در خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش در مقاومت برشی خاک است [۱۲].



شکل ۶-۲ حالت‌های مختلف مسلح سازی خاک [۱۲]

بررسی رفتاری تقویت‌سازی خاک توسط سایر مواد تا حدود بسیار زیادی شبیه به بحث مسلح‌سازی خاک می‌باشد. میزان افزایش در مقاومت برشی خاک توسط مسلح‌کنندها می‌تواند از روابط زیر به دست آید:

$$\Delta s_R = t_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

$$\Delta s_R = t_R (\sin(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \tan \phi) \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k + (\tan \phi)^{-1}} \right] \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

$$K = \frac{X}{Z} \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

$$t_R = \left(\frac{A_R}{A}\right)\sigma_R \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

که در این روابط t_R کل مقاومت کششی اجزاء در واحد سطح خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، A مساحت مقطع عرضی برش در خاک، A_R مساحت کل مقطع عرضی تسلیح‌کننده‌ها، σ_R تنش کششی به وجود آمده در اجزاء در ناحیه برشی و ΔS_R بیان‌کننده افزایش مقاومت با استفاده از تسلیح‌کننده‌ها می‌باشند.

این دانشمندان جهت انجام پژوهش‌های خود از قطعات لاستیک با ویژگی‌هایی نظیر $C=0$ ، $\phi=23^\circ$ و وزن مخصوص برابر با $1/0.8$ و ماسه با ویژگی‌های نشان داده شده در جدول ۴-۲ استفاده کردند.

نتایج کامل آزمایشات این پژوهشگران در جدول ۵-۲ آمده است. همان‌طور که از جدول ۵-۲ مشخص است، کم‌ترین میزان BCR^1 مربوط به مسلح‌سازی خاک با ابعاد 2×4 سانتی‌متر لاستیک و بیشترین میزان BCR مربوط به تسلیح خاک با ابعاد 3×12 سانتی‌متری لاستیک است. هاتف و رحیمی دلیل کم بودن BCR ، برای خاک‌های دارای لاستیک با ابعاد 2×4 سانتی‌متری را کوچک بودن ابعاد لاستیک‌ها دانستند زیرا در این مواقع نیروی کششی به وجود آمده در قطعات لاستیک از نیروی مقاوم موجود در آن بیشتر می‌شود. در نهایت این پژوهشگران بهترین نسبت ابعادی برای قطعات لاستیک را ۴ معرفی کردند و نشان دادند که برای یک پهنای مشخص از لاستیک‌ها، افزایش طول قطعات نسبت به طول بهینه، سبب کاهش $\frac{A_R}{A}$ شده که نتیجه آن کاهش مقدار BCR می‌باشد [۱۲].

¹ bearing capacity ratio

جدول ۲-۴ ویژگی‌های خاک ماسه‌ای [۱۲]

ϕ	C	$\gamma_{dmax} \left(\frac{KN}{m^3} \right)$	C_c	C_u
۲۴	۰	۱۷/۸۵	۱	۸

جدول ۲-۵ مقادیر BCR به ازای ابعاد مختلف لاستیک [۱۲]

ابعاد لاستیک (cm)							درصد تاثیر
۳×۱۲	۳×۹	۳×۶	۲×۱۰	۲×۸	۲×۶	۲×۴	
۱/۸۳	۱/۷۳	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۱۷	۱۰
۲/۲	۲/۱۳	۱/۹	۱/۹۷	۲	۲/۰۳	۱/۶	۲۰
۳	۲/۸	۲/۶۹	۲/۸۴	۲/۸	۲/۷۳	۲/۱۵	۳۰
۳/۹	---	---	---	۳/۴	۳/۲	---	۴۰
۳/۹	---	---	---	۳/۳	۲/۹۵	---	۵۰

تابا^۱ و آراوینسن^۲ در سال ۱۹۹۸ مطالعات خود را روی خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته (کوپر مارل^۳) انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق، تکه‌های لاستیک در ابعاد ۴-۱ میلی‌متر و ۸-۴ میلی‌متر را به‌صورت درصد‌های وزنی ۱۵-۶ درصد به‌عنوان یک جزء تشکیل‌دهنده به خاک اضافه کردند. این پژوهشگران در تحقیق خود مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)، رفتار تنش- کرنش، نفوذپذیری و تورم آزاد در برابر آب، پارافین و غیره را مورد بررسی قرار دادند. خاک رس موجود در این تحقیق دارای ویژگی‌هایی چون

¹ Tabbaa

² Aravinthan

³ Kuper marl

$$G_S = 2/72 \frac{gr}{cm^3}, PH = 7/62, LL = 34, PL = 22 \text{ بود.}$$

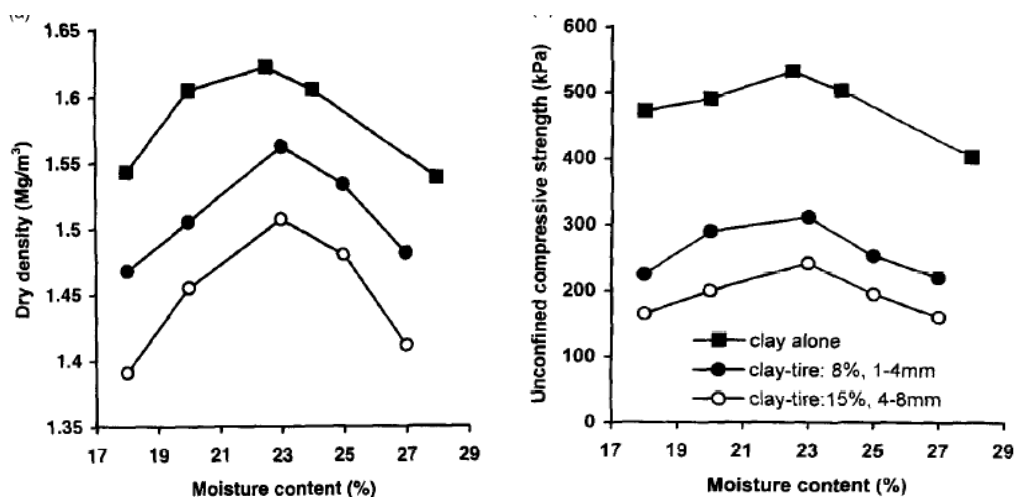
نتایج حاصل از آزمایشات (شکل ۲-۷) این پژوهشگران نشان داد که ماکزیمم چگالی خشک خاک رس با افزودن لاستیک به آن در حال کاهش است و مقاومت فشاری محصورشدگی خاک مخلوط با ذرات ۸-۴ میلی‌متر در حدود ۴۰ درصد نمونه رسی است. این پژوهشگران علت کاهش ماکزیمم چگالی خشک را وزن کمتر تکه‌های لاستیک در برابر ذرات خاک دانستند. آنان هم‌چنین بیان کردند که مقاومت فشاری محصورشدگی خاک وابسته به شکل و هندسه ذرات تشکیل دهنده لاستیک است ولی میزان کاهش آن به نوع خاک وابسته است.

در حین انجام آزمایش UCS، این محققین، رفتار تنش و کرنش نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که سختی در برابر شکست در اثر افزایش تایرها کاهش یافته است؛ این در حالی است که میزان کرنش در لحظه شکست در دو حالت رس به تنهایی و ترکیب آن با لاستیک تقریباً ثابت می‌ماند ولی نشان داده شد که حضور تایر سبب یک محدوده‌ی کرنش طولانی مدت بیش از حداکثر تنش گردیده است.

میزان نفوذپذیری در حالت آب مقطر، آب اسیدی و پارافین در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که میزان نفوذپذیری آب مقطر و آب اسیدی در خاک با افزودن لاستیک در حال افزایش است ولی نفوذپذیری پارافین با افزایش لاستیک کاهش می‌یابد و حدود ۵۰ برابر کمتر در مقایسه با آب می‌شود.

در آخرین گام این پژوهشگران میزان تورم آزاد در آب و پارافین را در سه رطوبت پیرامون رطوبت بهینه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که میزان تورم برای خاک رس به

تنهایی، خاک رس با ۸ درصد ذرات ۱-۴ میلی‌متر و خاک رس با ۱۵ درصد ذرات ۴-۸ میلی‌متری لاستیک در آب به ترتیب ۱/۲، ۰/۹ و ۰/۷ و در پارافین ۶/۵، ۴/۵ و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین میزان تورم در درصد رطوبت بهینه برای خاک‌های مختلف اتفاق افتاد [۱۳].



شکل ۲-۷ تأثیر افزودن ذرات لاستیک بر ماکزیمم وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری محصورنشده [۱۳]

پاشا و همکاران در سال ۱۳۹۲ مطالعات خود را روی خاک رس و تأثیرات افزودن لاستیک بر آن انجام دادند. آن‌ها برای انجام این پژوهش از خاک رس CL با $G_s=2/6$ ، $LL=48/4$ و $PL=22/9$ و قطعات لاستیک با ویژگی‌های نشان داده شده در جدول ۲-۶ بهره بردند. پاشا و همکاران جهت انجام آزمایش‌های تک‌محوری و برش مستقیم، تکه‌های لاستیک را در درصدهای ۱ تا ۵ به نمونه‌های خاکی افزودند.

نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که افزودن خرده لاستیک در ابعاد ۱-۵ میلی‌متر و ۵-۱۰ میلی‌متر سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌شود و بیشترین مقدار مقاومت

تک محوری در مقدار ۲ درصد لاستیک با طول ۱۰-۵ میلی متر به دست آمده است و پس از آن شروع به کاهش می کند.

در گام بعدی از آزمایشات پاشا و همکاران، نشان دادند که افزودن خرده لاستیک با طول ۵ میلی متر به خاک سبب کاهش چسبندی خاک می شود، اما افزودن ذرات تا ۱۰ میلی متر باعث افزایش چسبندگی خاک شده است. هم چنین نشان دادند که به صورت کلی افزودن لاستیک ها به خاک، سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است [۱۴].

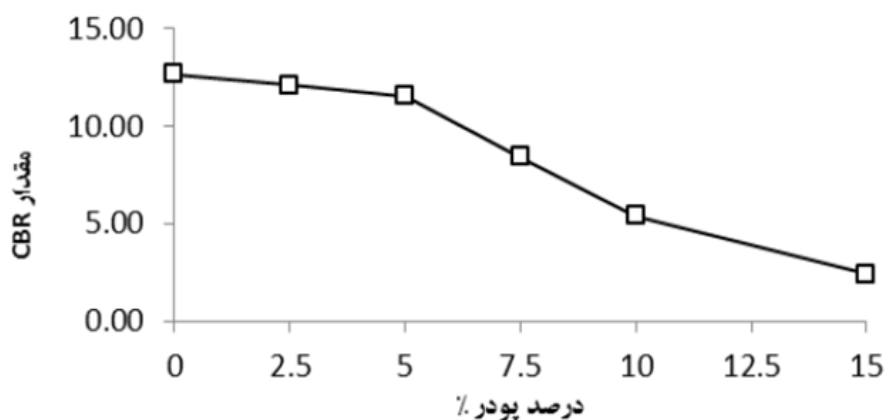
جدول ۲-۶ ابعاد و ویژگی های ذرات لاستیک [۱۴]

اندازه خرده لاستیک (mm)	چگالی ($\frac{Mg}{m^3}$)	مدول الاستیک (Mpa)
۱-۵	۱/۱۵۳	۲۲/۹۶
۵-۱۰	۱/۱۹۸	۲۸/۱

پزشکی و همکاران در سال ۱۳۹۳ با انجام آزمایشات تراکم خاک و نسبت باربری کالیفرنیا به بررسی تأثیرات افزودن قطعات لاستیک با اندازه ذرات کوچک تر از ۰/۲ میلی متر بر خاک پرداختند. این پژوهشگران جهت انجام آزمایشات خود از خاک با دانه بندی ذرات بین ۰/۱-۰/۰۰۱ میلی متر از نوع CL استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایشات تراکم طبق روش B از استاندارد ASTM D698 نشان داد که افزایش پودر لاستیک به خاک رس، سبب کاهش چگالی خشک ماکزیمم از ۲/۰۵ برای نمونه کنترل به ۱/۸۶ برای خاک حاوی ۷/۵ درصد پودر لاستیک در رطوبت بهینه ۱۹ درصد می شود.

در گام دیگر از این تحقیق نسبت باربری کالیفرنیا ی خاک مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهشگران

همان‌طور که از شکل ۸-۲ مشخص است، نشان دادند که افزودن ذرات ریز پودر لاستیک به خاک سبب کاهش CBR خاک می‌شود و علت این امر را کاهش اصطکاک میان دانه‌ها با افزودن لاستیک دانستند [۱۵].



شکل ۸-۲ تأثیر افزودن پودر لاستیک بر CBR خاک [۱۵]

رضا نورزاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ در مقاله‌ای با عنوان «بررسی رفتار آزمایشگاهی ماسه مسلح با خرده‌های لاستیک و پودر لاستیک» با انجام آزمایشات سه محوری CD به بررسی تأثیرات افزودن لاستیک بر خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. هدف اصلی آن‌ها از این پژوهش بررسی رفتار تنش-کرنش و مقاومت برشی ماسه-پودر لاستیک بود. این پژوهشگران در این پژوهش از ماسه با ویژگی‌هایی نظیر $G_S=2/74$ ، $C_G=1/0.3$ ، $C_U=1/8$ ، $\gamma_{dmin}=14/7 \frac{gr}{cm^3}$ و $\gamma_{dmax}=17/3 \frac{gr}{cm^3}$ و از ذرات لاستیک در ابعاد ۱-۶ میلی‌متر به‌عنوان خرده لاستیک و ابعاد کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر به‌عنوان پودر لاستیک استفاده کردند. قطعات لاستیک در این پژوهش با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به خاک ماسه‌ای اضافه شدند و جهت انجام آزمایشات فشار همه‌جانبه‌ای معادل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به نمونه‌ها اعمال کردند.

نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهشگران نشان داد که افزودن لاستیک به ماسه سبب افزایش کرنش گسیختگی و کاهش مقاومت بیشینه در نمونه‌ها می‌شود. همچنین وجود ۲۰ درصد لاستیک در خاک سبب کاهش کرنش حجمی می‌شود که نتیجه آن کاهش اتساع در نمونه‌های مسلح است.

در آخرین گام از آزمایشات این پژوهشگران زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایشات برش مستقیم نشان داد که افزودن تکه‌های لاستیک به خاک سبب کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی بین ذرات خاک می‌شود و این روند با افزایش درصد لاستیک تا ۳۰ درصد همچنان ادامه دارد. نتایج کامل حاصل از آزمایشات نوزاد و همکاران در جدول ۲-۷ آمده است [۱۶].

یانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲، آزمایشات خود را بر روی لاستیک‌های خردشده انجام دادند. این پژوهشگران در هیچ کدام از نمودارهای تنش برشی در برابر جابجایی‌های افقی تا انتهای آزمایش هیچ‌گونه حداکثر مقاومت برشی مشاهده نکردند. آن‌ها مقاومت برشی لاستیک‌های خرد شده را با استفاده از نظریه موهر - کولمب تحلیل کردند. به علت اینکه، هیچ‌گونه حداکثر تنش برشی مشاهده نشد، آن‌ها مقاومت برشی را در جابجایی‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد قطر جعبه برش در برابر تنش عمودی در هر آزمایش رسم کردند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که تمامی نمونه‌ها ابتدا منقبض شده و سپس منبسط می‌شوند. آن‌ها هنگامی که ۱۰ درصد جابجایی قطر جعبه برش را ملاک گسیختگی در نظر گرفتند، مقدار زاویه اصطکاک داخلی برابر با ۳۲ و مقدار چسبندگی نیز برابر با صفر به دست آمد ولی با در نظر گرفتن ۲۰ و ۳۰ درصد جابجایی قطر جعبه برش به‌عنوان ملاک گسیختگی به ترتیب مقادیر $c=5/7 \text{ kpa}$ و $\phi=42$ و $C=8/1 \text{ kpa}$ و $\phi=45$ درجه به دست آمدند [۱۷].

¹ Yong

در تفسیر و تعیین زاویه اصطکاک داخلی خرده لاستیک می توان از معیار دیگری نیز استفاده کرد؛ بدین صورت که رفتار تغییر شکلی نمونه ها مورد توجه قرار گیرد. در حین انجام آزمایشات مشاهده شد که در هنگام برش، ابتدا نمونه مقداری فشرده شده و سپس منبسط می شود؛ علت این امر آن است که در آزمایش های برش مستقیم، سطح برش افقی از قبل مشخص است. کمترین حجم نشان دهنده این مطلب است که در این نقطه لغزش اصطکاکی بین ذرات شروع شده و به طور کامل بسیج می شود. اگر از کمترین حجم به عنوان معیار گسیختگی استفاده شود، به وسیله بهترین خط مستقیم که از بین داده ها عبور می کند، مقدار $\Phi = 41$ درجه به دست می آید. یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۲، رابطه تجربی ۲-۶ را ارائه نمودند:

$$\beta = 1.6 \alpha^{0.75} \quad \text{رابطه ۲-۶}$$

که در این رابطه β مساوی با مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش مستقیم و α مساوی با فشار همه جانبه اعمالی است. آن ها همچنین پیشنهاد دادند که مقدار ضریب اصطکاک در تنش های عمودی تا حدود ۹۰ kpa مطابق با رابطه ی ۲-۷ قابل محاسبه است:

$$\tan\Phi = 1.2 \alpha^{-0.25} \quad \text{رابطه ۲-۷}$$

که در این رابطه Φ برابر با زاویه اصطکاک داخلی نمونه و α برابر با فشار همه جانبه اعمالی می باشد [۱۷].

جدول ۷-۲ نتایج کامل آزمایشات نوزاد [۱۶]

نوع مخلوط	درصد لاستیک	شماره آزمایش	فشار دور گیر (کیلوپاسکال)	کرنش محوری در گسیختگی (%)	مقاومت بیشینه (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک	چسبندگی (کیلوپاسکال)
ماسه	۰	۱	۵۰	۴	۳۰۱	۴۳	۲
		۲	۱۰۰	۵ تا ۴	۵۴۳		
		۳	۲۰۰	۶ تا ۵	۱۰۵۸		
ماسه و خرده لاستیک	۵	۴	۵۰	۵ تا ۴	۲۷۸	۴۳	۵
		۵	۱۰۰	۶	۵۲۶		
		۶	۲۰۰	۸ تا ۷	۱۰۰۷		
ماسه و خرده لاستیک	۱۰	۷	۵۰	۵	۲۶۶	۴۲	۸
		۸	۱۰۰	۷ تا ۶	۵۰۶		
		۹	۲۰۰	۹	۹۶۲		
ماسه و خرده لاستیک	۲۰	۱۰	۵۰	۶	۲۲۴	۴۲	۱۲
		۱۱	۱۰۰	۸	۴۸۹		
		۱۲	۲۰۰	۱۳ تا ۱۲	۹۵۰		
ماسه و خرده لاستیک	۳۰	۱۳	۵۰	۸	۱۹۹	۴۱	۲۳
		۱۴	۱۰۰	۱۰	۴۵۶		
		۱۵	۲۰۰	۱۵	۹۲۹		
ماسه و پودر لاستیک	۵	۱۶	۵۰	۶ تا ۵	۲۵۸	۴۱	۱۹
		۱۷	۱۰۰	۸	۴۸۳		
		۱۸	۲۰۰	۱۰	۸۹۸		
ماسه و پودر لاستیک	۱۰	۱۹	۵۰	۸ تا ۷	۲۳۲	۳۹	۲۶
		۲۰	۱۰۰	۱۲ تا ۱۰	۴۱۰		
		۲۱	۲۰۰	۱۵	۷۳۸		
ماسه و پودر لاستیک	۲۰	۲۲	۵۰	۱۳ تا ۱۲	۲۱۳	۳۶	۳۲
		۲۳	۱۰۰	۱۵	۳۶۰		
		۲۴	۲۰۰	۱۵	۶۳۸		
ماسه و پودر لاستیک	۳۰	۲۵	۵۰	۱۵	۱۸۸	۳۲	۴۱
		۲۶	۱۰۰	۱۵	۳۰۳		
		۲۷	۲۰۰	۱۵	۵۴۸		

در تحقیق صورت گرفته توسط گتلند^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۵، خواص مکانیکی خاک‌های مخلوط شده با لاستیک‌های بریده شده و خرد شده، در آزمایش سه محوری مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق ۴ نوع مختلف از آرایش تکه‌های لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. حالت‌های قرارگیری تکه‌های لاستیک به صورت‌های فقط افقی، فقط قائم، یکی در میان قائم و افقی و بدون جهت‌دهی‌های خاص بود. در این پژوهش گتلند و همکاران سعی کردند که وزن مخصوص نسبی مخلوط‌ها تقریباً برابر با هم باشند؛ بنابراین مقدار این وزن مخصوص برای حالت‌های مختلف آزمایش بین $17 - 16/3 \frac{KN}{m^3}$ متغیر بود. البته این محققین بیان کردند که مقدار وزن مخصوص نمونه‌ها به درصد لاستیک و جهت قرارگیری آن‌ها در مخلوط وابسته می‌باشد؛ به‌طور مثال در مواردی که ۵۰ درصد وزنی مخلوط از لاستیک تشکیل شده بود، مقدار وزن مخصوص به $0/5 \frac{KN}{m^3}$ هم می‌رسید. گتلند و همکاران آزمایشات خود را به‌صورت کنترل کرنش انجام دادند و مقدار کرنش مورد استفاده آن‌ها $2 \frac{mm}{min}$ بود. پایان آزمایشات آن‌ها به دو صورت بعد از حداکثر مقاومت برشی و دیگری قبل از حدود ۲۰ درصد کرنش در نظر گرفته شد. نتایج آزمایشات نشان داد که جهت قرارگیری لاستیک‌ها در نمونه‌ها، بر مقاومت برشی آن‌ها مؤثر است؛ به‌طوری‌که اگر لاستیک‌ها به‌طور افقی در نمونه قرار گیرند نسبت به حالت‌های دیگر، از مقاومت برشی بیشتری برخوردار هستند؛ هم‌چنین این پژوهشگران، مقدار بهینه محتوای لاستیک و وزن مخصوص خشک برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر را به ترتیب ۲۸ درصد و $13/2 \frac{KN}{m^3}$ بیان کردند [۱۸].

^۱ Gotteland

جدول ۸-۲ خلاصه مطالعات گذشته

نویسنده	عنوان مقاله	سال	نتایج
آقاجانی	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 الاستیک
شاکری	مقایسه خصوصیات مقاومتی آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی	۱۳۹۲	افزایش مقاومت مارشال، مدول برجهندگی و افزایش کشش غیر مستقیم کاهش شیارشدگی
ممون	Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt	۲۰۰۵	بهبود درجه عملکرد قیر
اودا	Technical Feasibility Of Using Scrap Tire Rubber For Asphalt Paving In Brazil	۲۰۰۱	افزایش نقطه نرمی و مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش درجه نفوذ
ناوارو	Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens	۲۰۰۴	افزایش ویسکوزیته و انعطاف پذیری در دمای پایین
هیون	Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials	۱۹۹۶	افزایش توانایی جذب انرژی توسط بتن
تاپکو	The properties of rubberized concretes	۱۹۹۵	کاهش مقاومت فشاری، تحمل بار زیاد بعد از شکست نمونه و برگشت پذیر بودن تغییر شکل-ها در بتن

جدول ۲-۸ خلاصه مطالعات گذشته

نویسنده	عنوان مقاله	سال	نتایج
اسمادی	Properties of tire rubber ash mortar	۲۰۰۴	افزایش زمان گیرش نهایی و ابتدایی، مدول دینامیکی، فاکتور دوام ملات سیمانی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر ملات سیمانی
بهفرنیا	بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی پودر لاستیک تاثیر ضایعاتی	۱۳۸۸	کاهش مقاومت ۳ و ۷ روزه، وزن مخصوص کاهش درصد جذب آب با جایگزینی ۱۲ درصد پودر لاستیک افزایش درصد جذب آب با جایگزینی ۱۸ درصد پودر لاستیک
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 بی‌زای ۴۰ درصد لاستیک ریز و درشت افزایش مقاومت برشی بی‌زای ۳۰ درصد ریزدانه و ۲۰ درصد درشت دانه افزایش چسبندگی خاک
هاتف	Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds	۲۰۰۶	افزایش شاخص BCR با افزودن تراشه‌های لاستیک بهترین نسبت ابعادی برای تراشه‌های لاستیک ۴ می‌باشد.
تابا	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

جدول ۲-۸ خلاصه مطالعات گذشته

نویسنده	عنوان مقاله	سال	نتایج
پاشا	بهبود مشخصات مکانیکی و فیزیکی خاک رس با استفاده	۱۳۹۲	افزایش مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی افزودن خرده لاستیک تا اندازه ۵ میلی‌متر سبب کاهش چسبندگی می‌شود و از این اندازه بزرگ‌تر روند برعکس به خود می‌گیرد
پزشکی	بررسی و قیاس اثر پودر لاستیک بر خاک با اثر ضایعات درشت‌تر لاستیک	۱۳۹۳	کاهش ماکزیمم چگالی خشک و مقدار CBR خاک
نورزاد	بررسی رفتار آزمایشگاهی ماسه مسلح با خرده‌های لاستیک و پودر لاستیک	۱۳۹۳	افزایش کرنش گسیختگی، چسبندگی خاک کاهش مقاومت بیشینه و زاویه اصطکاک داخلی
یانگ	Mechanical properties of shredded tires	۲۰۰۲	$\beta = 1.6 \alpha^{0.75}$ $\tan\phi = 1.2 \alpha^{-0.25}$
گتلند	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.

فصل سوم

نحوه انجام آزمایش‌ها

۳-۱- مقدمه

در ابتدای این فصل برخی ویژگی‌های لایه اساس راه بیان شده است و در ادامه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش شرح داده می‌شود.

۳-۲- لایه اساس راه

۳-۲-۱- تعریف

قشر اساس، دومین قشر از روسازی راه است که با مشخصات و ضخامت معین روی قشر زیراساس و در تمام عرض آن اجرا می‌شود.

۳-۲-۲- عملکرد اساس در روسازی

عملکرد قشر اساس در روسازی به شرح زیر می‌باشد:

۱- تحمل بارهای وارده: بارهای وارده از قشرهای بالاتر روسازی به وسیله این قشر تعدیل و به قشر زیراساس وارد می‌گردد، 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 می‌شود، دارای خاصیت تراوایی بیشتری نسبت به قشر زیراساس می‌باشد [۱۹].

۳-۲-۳- انواع اساس

۱- اساس شن و ماسه‌ای 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.

۲- اساس سنگ کوهی شکسته و یا قلوه‌سنگ شکسته: سنگ‌های استخراج شده از معادن سنگ و یا قلوه‌سنگ‌های درشت رودخانه‌ای در سنگ‌شکن‌ها، شکسته و سپس سرند می‌شود و بر اساس مشخصات تعیین شده در قشر اساس بکار می‌رود.

۳- 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.

۴- اساس قیری: این قشر به‌عنوان 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 به‌منظور تسریع در تخلیه آب‌های نفوذی به سیستم روسازی و یا جلوگیری از بازگشت ترک‌های آسفالت موجود در بهسازی‌ها با حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌های ۳۷/۵ تا ۵۰ میلی‌متر، متشکل از مصالح صد در صد شکسته، به‌عنوان لایه کنترل‌کننده ترک‌های انعکاسی استفاده می‌کنند [۱۹].

۳-۲-۴- مشخصات فنی اساس

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 [۱۹]:

۳-۲-۴-۱- دانه‌بندی

دانه‌بندی مصالح اساس، با توجه به شرایط پروژه، باید با یکی از دانه‌بندی‌های جدول ۱-۳ مطابقت داشته باشد. این دانه‌بندی باید به موازات منحنی میانی دانه‌بندی انتخابی بوده و پیوسته باشد.

۳-۲-۴-۲- سایر مشخصات

مصالح مورد استفاده برای قشر اساس باید مقاوم و بادوام بوده و مشخصات مندرج در جدول ۲-۳ را داشته باشد.

جدول ۱-۳ دانه‌بندی مصالح اساس [۱۹]

درصد وزنی رده شده از هر الک					شماره دانه بندی اندازه الک
V	IV	III	II	I	
---	---	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	۷۰-۹۲	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)*

جدول ۳-۲ مشخصات مصالح اساس [۱۹]

روش‌های آزمایش		مشخصات درصد	آزمایش	ردیف
ASTM	AASHTO			
D 4318	T 90	حداکثر ۴	دامنه خمیری	۱
D 4318	T 89	حداکثر ۲۵	حدروانی	۲
D 2419	T 176	حداقل ۴۰	ارزش ماسه‌ای	۳
C 535/C131	T 96	حداکثر ۴۵	سایش با روش لس آنجلس	۴
C 88	T 104	حداکثر ۱۲	افت وزنی با سولفات سدیم	۵
D 1883	T 193	حداقل ۸۰	سی بی آر در تراکم صد در صد آزمایشگاهی	۶
D 5821	----	حداقل ۷۵	شکستگی در دو جهت مانده بر روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر	۷
D 4791	----	حداکثر ۱۵	سنگ‌دانه‌های پهن و دراز مانده بر روی الک ۹/۵ میلی‌متری	۸

۳-۳- آزمایش تعیین وزن مخصوص درشت‌دانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت‌دانه از استاندارد ASTM C127 استفاده می‌شود. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص خشک (¹OD)، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (²SSD)، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، سبد سیمی با سوراخ‌های ۳/۳۵ میلی‌متری یا ریزتر، مخزن آب و الک‌های استاندارد می‌باشد. روش انجام

¹ Oven-Dry

² Saturated-Surface-Dry

آزمایش به صورتی است که ابتدا نمونه‌ها را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک کرده، سپس آن‌ها، برای مدت ۱ تا ۳ ساعت در دمای محیط قرار می‌گیرند تا خنک شوند. در ادامه سنگ‌دانه‌ها برای مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط قرار می‌گیرند و سپس نمونه‌ها را از آب بیرون آورده و روی یک پارچه جاذب رطوبت پهن کرده تا لایه سطحی آب روی سنگ‌دانه‌ها از بین برود. وزن نمونه که در حالت اشباع با سطح خشک می‌باشد محاسبه می‌شود. پس از تعیین وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، نمونه را درون سبد سیمی قرار داده و وزن ظاهری آن‌ها در آب ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شود. در نهایت نمونه تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و ۱ تا ۳ ساعت در هوای محیط خنک می‌شود. در پایان وزن خشک مصالح سنگی نیز ثبت می‌شود. با داشتن ۳ وزن ذکر شده و با استفاده از روابط ۱-۳ تا ۴-۳ موجود در استاندارد ASTM C127 وزن مخصوص‌ها و درصد جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه قابل محاسبه می‌باشد. این آزمایش برای سه نوع مصالح درشت-دانه شامل مانده بر روی الک‌های ۱۹، ۹/۵ و ۴/۷۵ میلی‌متر به صورت جداگانه به انجام رسید [۲۰].

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

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

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

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

۳-۴- آزمایش تعیین وزن مخصوص ریزدانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه از استاندارد ASTM C128 می‌شود. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص خشک (OD)، وزن مخصوص SSD، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگدانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، پیکنومتر، قالب مخروطی ناقص و میله‌ی متراکم‌کننده مخصوص و دستگاه دمنده هوای گرم می‌باشد. در این روش ابتدا نمونه در یک ظرف مناسب تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود و پس از سرد شدن نمونه، سنگدانه‌های ریز برای مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور می‌گردند. در ادامه آب اضافی روی سنگدانه‌ها به‌طوری‌که ریزدانه‌ها بیرون ریخته نشوند، تخلیه می‌شود. نمونه روی یک سطح صاف و غیر جاذب، پهن و صاف شده و در معرض جریان هوای گرم قرار می‌گیرد. این کار تا زمانی که نمونه اشباع به سطح خشک برسد ادامه می‌یابد. برای اطلاع از وضعیت اشباع با سطح خشک، مخروط قالب روی یک سطح صاف و غیر جاذب رطوبت از طرف قطر بزرگ قرار می‌گیرد. قسمتی از ریزدانه‌ها را به‌صورت سست داخل مخروط ریخته تا از مخروط سرریز کند. سنگدانه‌های ریز به آرامی با ۲۵ ضربه درون قالب، متراکم می‌شوند. برای هر ضربه میله تقریباً از فاصله ۵ میلی‌متری روی سنگدانه‌ها رها می‌شود. ماسه‌ی سست از روی قالب کنار زده و قالب را به‌صورت عمودی بالا کشیده می‌شود. اگر سنگدانه‌ها رطوبت سطحی داشته باشند به شکل قالب مانده و چنانچه ریزش کمی داشته باشند، یعنی ریزدانه به حالت اشباع با سطح خشک رسیده است. در ادامه قسمتی از پیکنومتر را با آب پر کرده و مقدار ۵۰۰ گرم از ریزدانه اشباع با سطح خشک را درون آن ریخته و با افزودن آب پیکنومتر تا ۹۰ درصد حجم آن پر می‌شود. سپس پیکنومتر به‌صورت دستی تکان داده شده و ۲۰ دقیقه منتظر مانده تا حباب‌های خارج شده و تا خط نشانه پر آب می‌شود. وزن نمونه حاوی آب و ریزدانه ثبت می‌شود. سپس سنگدانه‌های ریز را از پیکنومتر خارج کرده و در دمای

۱۱۰ درجه خشک می‌شود. پس از سرد شدن نمونه وزن خشک ریزدانه‌ها نیز ثبت می‌شود. وزن پیکنومتر با آب هم نیز در ادامه ثبت می‌شود. با داشتن وزن‌های ذکر شده و با استفاده از روابط ۵-۳ تا ۸-۳ وزن مخصوص‌های مورد نیاز و درصد جذب آب ریزدانه‌ها قابل محاسبه می‌باشد.

$$\text{رابطه ۵-۳} \quad \text{وزن مخصوص OD} = \frac{997.5A}{B+S-C}$$

$$\text{رابطه ۶-۳} \quad \text{وزن مخصوص SSD} = \frac{997.5S}{B+S-C}$$

$$\text{رابطه ۷-۳} \quad \text{وزن مخصوص ظاهری} = \frac{997.5A}{B+A-C}$$

$$\text{رابطه ۸-۳} \quad \text{درصد جذب آب} = \frac{S-A}{A} \times 100$$

که در این روابط A وزن نمونه خشک شده در گرم‌خانه، B وزن پیکنومتر با آب تا خط نشانه، C وزن پیکنومتر پر شده با آب و نمونه تا خط نشانه و D وزن نمونه اشباع با سطح خشک در حالت SSD می‌باشد [۲۱].

۳-۵- آزمایش تعیین وزن مخصوص پودر لاستیک

جهت محاسبه وزن مخصوص پودر لاستیک، گرم مشخصی از ذرات لاستیک را در ابتدا انتخاب می‌شود. در ادامه ظرف مشخص و دقیقی تا نقطه مشخص از آب پر شده به طوری که حجم آب داخل ظرف مشخص باشد (ظرف دارای نشانگر دقیق می‌باشد). سپس ذرات لاستیک به کمک توری و یک وزنه (به دلیل کمتر بودن وزن مخصوص خرده لاستیک نسبت به آب) در ظرف حاوی آب، مستغرق می‌شود. تغییر حجم آب 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.

۳-۶- آزمایش دانه‌بندی

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، درحالی‌که برای حفظ داده‌ها لازم، توزیع ذرات ریزتر از $75\ \mu\text{m}$ به روش هیدرومتری تعیین می‌شود.

با توجه به بند ۴-۴-۱-۲ نشریه‌ی ۲۳۴، مصالح مورد استفاده برای قشر اساس، باید با یکی از دانه-بندی‌های نشان داده شده در جدول ۳-۱ مطابقت داشته باشد [۲۲].

۳-۷- آزمایش تراکم

این آزمایش طبق استاندارد شماره ASTM D1557 با کمک دستگاه تراکم دینامیکی به انجام رسید. مشخصات کامل آزمایش تراکم استفاده شده در پژوهش در جدول ۳-۳ 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 درصدهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به‌صورت حجمی جایگزین مصالح سنگی مانده روی الک نمره ۱۰ و گذشته از الک نمره ۴ شدند [۲۳].

جدول ۳-۳ مشخصات آزمایش تراکم اصلاح شده [۲۳]

خاک مورد آزمایش	تعداد لایه	تعداد ضربات در هر لایه	مشخصات چکش تراکم		مشخصات استوانه تراکم		
			ارتفاع سقوط (اینچ)	وزن چکش (پوند)	حجم قالب (فوت مکعب)	ارتفاع قالب (اینچ)	قطر قالب (اینچ)
کمتر از ۳۰ درصد مانده روی الک ۳/۴	۵	۵۶	۱۸	۱۰	۲۱۲۴	۵۸۴/۴	۶

۳-۸- 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 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه ۳-۹ درصد سایش لس آنجلس به دست می‌آید [۲۴].

$$\text{رابطه ۳-۹} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100 = \text{درصد سایش لس آنجلس}$$

جدول ۳-۴ تعیین میزان گرم جهت آزمایش لس آنجلس [۲۴]

وزن نمونه به گرم				اندازه الک به میلی‌متر	
D	C	B	A	مانده روی الک	رد شده از الک
---	---	---	1250 ± 25	۲۵	۳۷/۵
---	---	---	1250 ± 25	۱۹/۱	۲۵
---	---	2500 ± 10	1250 ± 10	۱۲/۵	۱۹/۱
---	---	2500 ± 10	1250 ± 10	۹/۵	۱۲/۵
---	2500 ± 10	---	---	۶/۳	۹/۵
---	2500 ± 10	---	---	۴/۷۵	۶/۳
5000 ± 10	---	---	---	۲/۳۶	۴/۷۵

جدول ۳-۵ تعیین تعداد گوی در آزمایش لس آنجلس [۲۴]

گروه‌بندی D	گروه‌بندی C	گروه‌بندی B	گروه‌بندی A
۶	۸	۱۱	۱۲

۳-۹- آزمایش تعیین حد روانی و حد خمیری

این آزمایشات بر روی خاک لایه اساس با دانه‌بندی مشخص شده طبق استاندارد ASTM D4318

صورت می‌گیرد. حد روانی و خمیری خاک‌ها حدود اتربرگ نامیده می‌شوند. این حدود مرز میان حالت-

های مختلف سفتی خاک‌های خمیری را مشخص می‌کنند [۲۵].

۳-۱۰- آزمایش تعیین ارزش ماسه‌ای

آزمایش ارزش ماسه‌ای به اختصار هم ارز ماسه (S.E) را که در تعیین مرغوبیت مصالح جهت راه‌سازی، بتن‌سازی، آسفالت، لایه‌های زهکشی و غیره به کار می‌رود، می‌توان مکمل آزمایش دانه‌بندی دانست و عملاً برای تعیین نسبت حجم ماسه به کل حجم خاک (ماسه، لای و رس) و هم‌چنین تعیین میزان جذب آب توسط ریزدانه و تورم آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌طور خلاصه تعیین می‌نماید که ماسه تا چه حد تمیز است.

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D2419 بر روی ذرات کوچک‌تر از $4/75$ میلی‌متر انجام می‌شود. در این آزمایش ابتدا 100 گرم از مصالح سنگی را خشک کرده، سپس استوانه مدرج تا علامت ۴ اینچ از محلول شستشو (استوکس) پر شده و خاک خشک شده به آن اضافه می‌شود. در ادامه توسط چوب پنبه‌ای درب لوله را بسته و لوله به‌صورت افقی 90 بار در مدت 30 ثانیه که دامنه رفت و آمد 30 سانتی‌متر می‌باشد، تکان داده می‌شود. لوله را عمودی روی میز گذاشته و پس از برداشتن چوب پنبه، با آب پاشی به‌وسیله بطری پلاستیکی حاوی محلول شستشو، جداره لوله شسته شده و تا علامت 15 اینچ پر می‌شود. سپس محلول را به مدت 20 دقیقه بدون حرکت روی میز گذاشته و پس از سپری شدن زمان مورد نیاز، ارتفاع مخلوط داخل استوانه را قرائت می‌شود.

در انتها سنبه فولادی را به آهستگی پایین برده شده و انتهای آن بر روی ماسه قرار می‌گیرد و به کمک نشانه متصل به میله‌ی سنبه بر روی استوانه، عددی که نشانه مزبور روی آن قرار می‌گیرد قرائت می‌شود. مقدار ارزش ماسه‌ای نمونه‌ی خاکی با استفاده از رابطه ۳-۱۰ محاسبه می‌شود [۲۶].

$$\text{ارزش ماسه‌ای} = \frac{\text{ارتفاع ماسه}}{\text{ارتفاع کل رسوبات}} \times 100$$

۳-۱۱- آزمایش تعیین شکستگی در دو جبهه

به صورت کلی این آزمایش طبق استاندارد ASTM D5821 جهت تعیین شکستگی در چند وجه مصالح سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق این استاندارد، یک وجه وقتی شکسته در نظر گرفته می‌شود که مساحت تصویر سطح مورد نظر حداقل به اندازه‌ی یک چهارم مساحت تصویر بزرگ‌ترین مقطع سنگ‌دانه بوده و لبه‌های این وجه تیز و یا اندکی ساییده شده باشند.

جهت انجام این آزمایش پس از خشک کردن و الک نمودن مصالح سنگی با استفاده از جدول ۳-۶ مقدار لازم مصالح سنگی جهت انجام آزمایش را تعیین کرده و در ادامه شکستگی در دو جبهه مصالح مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۲۷].

جدول ۳-۶ حداقل جرم نمونه مورد آزمایش [۲۷]

حداقل جرم نمونه آزمایش (گرم)	حداکثر اندازه اسمی سوراخ‌های مربعی الک (میلی‌متر)
۲۰۰	۹/۵
۵۰۰	۱۲/۵
۱۵۰۰	۱۹
۳۰۰۰	۲۵
۷۵۰۰	۳۷/۵
۱۵۰۰۰	۵۰
۳۰۰۰۰	۶۳
۶۰۰۰۰	۷۵
۹۰۰۰۰	۹۰

۳-۱۲- آزمایش تعیین افت وزنی با سولفات سدیم

هدف از انجام آزمایش افت وزنی سولفات سدیم، تعیین روش آزمون سلامت سنگدانه در مقابل عوامل جوی می‌باشد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C88 به انجام می‌رسد. طبق آیین‌نامه این آزمایش برای هر دو نوع بخش از خاک که شامل ریزدانه و درشت‌دانه (معیار الک ۹/۵ میلی‌متر) می‌باشد، صورت می‌گیرد. در این آزمایش مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه مطابق جدول ۳-۷ انتخاب می‌شود. در ادامه مصالح برای مدت ۱۶ ساعت در محلول سولفات سدیم غوطه‌ور می‌گردد. پس از اتمام عمل غوطه‌وری، سنگدانه‌ها از محلول خارج شده و در گرم‌کن گذاشته می‌شوند و این عمل تا زمانی که وزن سنگدانه‌ها ثابت شود، ادامه می‌یابد. این روند غوطه‌وری و خشک کردن را چند مرحله ادامه می‌دهیم و در نهایت سنگدانه‌ها توسط کلرید باریوم شستشو داده می‌شود.

در ادامه سنگدانه‌های ریز را مطابق با همان الک‌های ابتدایی و سنگدانه‌های درشت را طبق جدول ۳-۸ الک می‌کنیم. در نهایت اختلاف بین هر یک از مقادیر وزن اولیه و نهایی (به‌صورت تجمعی برای هر الک) نسبت به وزن اولیه به‌عنوان افت وزنی خاک معرفی می‌شود [۲۸].

جدول ۳-۷ قطر مصالح مورد استفاده [۲۸]

درشت‌دانه (میلی‌متر)	ریزدانه	اندازه الک
۹/۵ الی ۴/۷۵	۳۰۰ میکرون	
۹/۵ الی ۱۹	۶۰۰ میکرون	
۳۷/۵ الی ۱۹	۱/۱۸ میلی‌متر	
۶۳ الی ۳۷/۵	۲/۳۶ میلی‌متر	

جدول ۳-۸ اندازه الک‌های نهایی درشت‌دانه [۲۸]

۴	۸	۱۶	۳۱/۵	۵۰	۶۳	۷۵	اندازه الک‌های مورد استفاده در تعیین کاهش وزن (میلی‌متر)
---	---	----	------	----	----	----	--

۳-۱۳- آزمایش تعیین سنگ‌دانه‌های پهن و دراز

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4791 جهت تعیین سنگ‌دانه‌های پولکی و دراز به انجام می‌رسد. طبق تعریف دانه‌های سوزنی سنگ‌دانه‌هایی هستند که بزرگ‌ترین بعد آن‌ها، بزرگ‌تر از ۱/۸ اندازه قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها باشند و دانه‌های پولکی سنگ‌دانه‌هایی هستند که کوچک‌ترین بعد آن‌ها کوچک‌تر از ۰/۶ اندازه قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها باشند. در این آزمایش طبق آیین‌نامه مقدار ۲ کیلوگرم از مصالح سنگی مانده بر روی الک ۹/۵ میلی‌متر، جدا شده و سپس آن مصالح سنگی را شسته و در اوون برای مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شود. در ادامه باید سنگ‌دانه‌ها از الک‌های تطویل و تورق عبور داده شود. در نهایت باید توجه داشت که اگر سنگ‌دانه‌ها از شکاف گیج تطویل عبور نکنند، دانه سوزنی است و اگر دانه‌ها از شکاف گیج تورق عبور کند، دانه پولکی است. به نسبت وزنی سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی به وزن کل دانه‌ها، درصد سوزنی و پولکی سنگ‌دانه‌ها گفته می‌شود [۲۹].

$$\text{رابطه ۳-۱۱} = \frac{\text{وزن دانه‌های پولکی هر یک از قطرهای متوسط}}{\text{وزن کل نمونه}} = \text{درصد دانه‌های پولکی}$$

$$\text{رابطه ۳-۱۲} = \frac{\text{وزن دانه‌های سوزنی هر یک از قطرهای متوسط}}{\text{کل وزن نمونه}} = \text{درصد دانه‌های سوزنی}$$

۳-۱۴- آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)^۱

به‌طور کلی آزمایش نفوذ کالیفرنیا شامل اعمال بار به سطح آزمون‌ه تعریف می‌شود که نتایج این آزمایشات 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 ۱.۲.۴ در این استاندارد، آزمایش‌های نفوذ CBR، در میزان رطوبت‌های به‌دست آمده از آزمایش تراکم طبق بند ۳-۷ صورت می‌گیرد.

طبق بند ۱.۱.۷ استاندارد ASTM D1883 این آزمایش تنها بر روی خاک‌هایی انجام می‌شود که تمام مصالح آن از الک نمره $\frac{3}{4}$ گذشته باشد. با توجه به دارا بودن خاک مورد آزمایش از ذرات مانده روی الک $\frac{3}{4}$ و بر اساس متن این استاندارد، این ذرات توسط ذرات مانده روی الک $\frac{3}{8}$ جایگزین شد.

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 ۸ کیلوگرم از مصالح رد شده از الک با اندازه ۱۹/۵ 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 ۰.۲۶ ± ۰.۰۶ و ارتفاع ۰.۱۸ ± ۰.۰۷ آماده‌سازی می‌شوند. در ادامه نمونه به همراه ۵ کیلوگرم سربار زیر گچی بارگذاری دستگاه

^۱ Colifornia Bearing Ratio

سی‌بی‌آر قرار می‌گیرد.

روند آزمایش طبق بند ۳.۹ این استاندارد به‌گونه‌ای است که پیستون بارگذاری با نرخ ۱/۲۷ میلی‌متر (۰/۰۵ اینچ) بر دقیقه بر نمونه اعمال می‌شود. این روند تا نفوذ ۱۲ میلی‌متری پیستون در نمونه ادامه می‌یابد و جهت رسیدن به جواب صحیح‌تر برای هر درصد از جایگزینی لاستیک (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد جایگزین مصالح سنگی مانده روی الک ۱۰ در خاک لایه اساس) حداقل سه نمونه ساخته شد.

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

$$\text{رابطه ۳-۱۳} \quad \text{مقدار CBR خاک در مقدار نفوذ } 0/1 \text{ اینچ پیستون} = \frac{100 \times \text{مقدار نیرو (کیلوگرم)}}{1366}$$

$$\text{رابطه ۳-۱۴} \quad \text{مقدار CBR خاک در مقدار نفوذ } 0/2 \text{ اینچ پیستون} = \frac{100 \times \text{مقدار نیرو (کیلوگرم)}}{2040}$$

ب) آزمایش روی نمونه اشباع: روند متراکم کردن این روش مشابه آنچه در روش خشک گفته شد می‌باشد. پس از متراکم‌سازی، نمونه‌ها برای مدت ۹۶ ساعت درحالی‌که سرباری معادل ۵ کیلوگرم بر روی آن‌ها قرار دارد در آب غوطه‌ور می‌شوند. پس از اتمام مرحله غوطه‌وری، نمونه‌ها از آب خارج شده و برای مدت ۱۵ دقیقه صبر کرده تا آب اضافی موجود در نمونه‌ها از آن‌ها خارج شود و سپس سایر موارد اعمال بار و غیره مطابق با روش سی‌بی‌آر خشک به انجام می‌رسد. در نهایت میزان مقاومت CBR نمونه مطابق روابط ۳-۱۳ و ۳-۱۴ به دست می‌آید.



شکل ۱-۳ دستگاه CBR

در این آزمایش پودر لاستیک مورد استفاده به صورت درصد‌های حجمی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ جایگزین مصالح سنگی مانده بر روی الک نمره ۱۰ شد. جهت تعیین نسبت حجمی صحیح از پودر لاستیک جایگزینی، میزان گرم ذرات سنگی را در کسر $\frac{\text{وزن مخصوص لاستیک}}{\text{وزن مخصوص مصالح سنگی}}$ ضرب نموده تا پودر لاستیک به صورت هم حجم با مصالح سنگی در نمونه‌ها جایگزین شود [۳۰].

۳-۱۵- آزمایش PFWD^۱

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 می‌-

^۱ Portable Falling Weight Deflectometer

کنند.

عملکرد این تجهیزات به این گونه است که یک وزنه با جرم مشخصی از یک ارتفاع خاص بر روی یک صفحه فولادی سقوط می کند و ضریب حاصله به روسازی منتقل شده و پاسخ روسازی با ثبت شکل های سطحی عمودی در فواصلی مشخص از محل اعمال بار با استفاده از ژئوفون ها ثبت می شود. با توجه به تحقیقات زیاد صورت گرفته در زمینه به کارگیری دستگاه FWD برای ارزیابی روسازی آسفالتی، در حال حاضر FWD به عنوان یک دستگاه آزموده شده و قابل اطمینان شناخته می شود و از آن می توان به عنوان یک آزمایش استاندارد و مبنا برای سایر آزمایش های دینامیک صفحه ای استفاده نمود. ولی دستگاه FWD ممکن است برای ارزیابی روزمره روسازی های در حال ساخت مناسب نباشد؛ به خصوص در محل هایی 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 ارزیابی هایی که تنش های پایین مدنظر می باشد و نیازی به حوضچه کامل افت و خیز نیست، استفاده از FWD به دلیل هزینه و پیچیدگی زیاد آن چندان منطقی به نظر نمی رسد. به همین دلیل از سال ۲۰۰۰، برای کنترل کیفیت ساخت خاکریزها و مصالح غیر چسبنده، دستگاه های PFWD ارائه شدند که فن آوری آن خیلی ساده تر 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 دستگاه ها، تحقیقات مختلفی در مورد به کارگیری PFWD در کنترل کیفیت لایه های غیر چسبنده روسازی در حال اجرا می باشد. یکی از خروجی های اصلی دستگاه PFWD، مدول ارتجاعی بستر می باشد. روش آزمایش PFWD از نوع آزمون بارگذاری می باشد. بارگذاری به وسیله ی سقوط یک وزنه (جرم) بر روی یک سیستم ضربه گیر و انتقال پالس نیرویی تولید شده به صفحه بارگذاری واقع بر روی مصالح

صورت می‌پذیرد. نحوه‌ی انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM E 2583-07 به شرح زیر می‌باشد:

در این آزمایش ابتدا سطح نمونه آزمایش باید تمیز و مسطح شود و تمامی سنگ‌دانه‌های شل و غیر متعارف از سطح آزمونه برداشته شود. سپس صفحه بارگذاری و حسگرها به‌گونه‌ای پایدار بر روی سطح نمونه آزمایش قرار می‌گیرند. 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^1 و K می‌باشد ثبت می‌شود.

این دستگاه مدول الاستیسیته را با استفاده از روش بوسینسک و مطابق با رابطه ۳-۱۵ محاسبه می‌کند.

$$E = \frac{S(1-\theta^2)P}{\pi aD} \quad \text{رابطه ۳-۱۵}$$

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

جهت آماده‌سازی نمونه، در ابتدا خاک‌ها در دو لایه در قالب آزمایش ریخته می‌شوند و هر لایه توسط ۱۵۰ ضربه در رطوبت بهینه کوبیده می‌شود. ارتفاع هر لایه خاک ریخته شده پس از تراکم تقریباً ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد و آزمایش PFWD بر روی هر دو لایه در حالت خشک و لایه دوم در حالت اشباع صورت می‌گرفت [۳۱].

¹ Modulus of elasticity



شکل ۲-۳ دستگاه PFWD

فصل چهارم

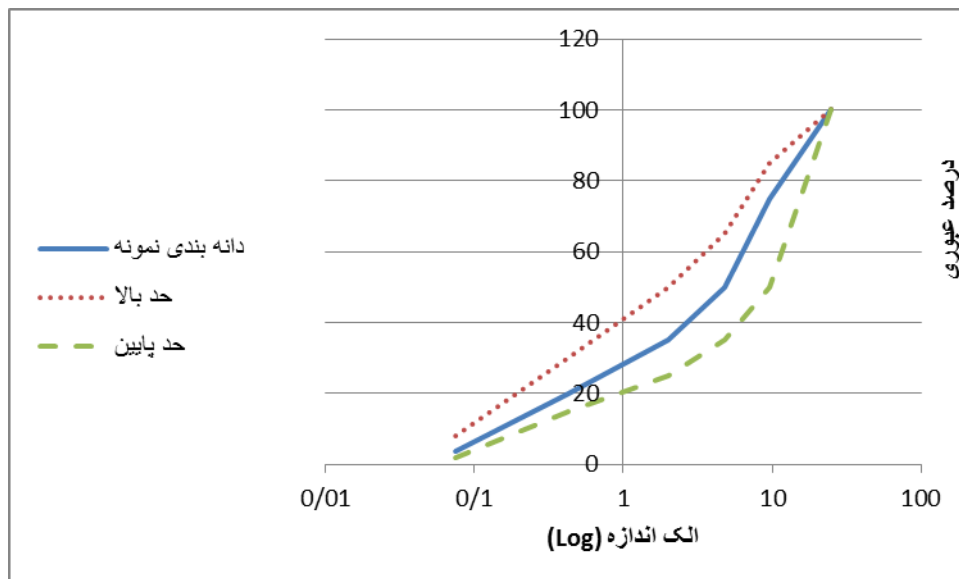
نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

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 آزمایشات مختلف پرداخته و نتایج حاصل از افزودن خرده لاستیک بر ویژگی‌های لایه اساس راه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- نتایج حاصل از آزمایشات دانه‌بندی

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 نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

۳-۴- نتایج آزمایش وزن مخصوص درشت‌دانه

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 ۱-۴ آن آمده است.

جدول ۱-۴ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه

ابعاد مصالح	وزن مخصوص $OD(\frac{kg}{m^3})$	وزن مخصوص $SSD(\frac{kg}{m^3})$	وزن مخصوص ظاهری $(\frac{kg}{m^3})$	درصد جذب آب
مانده بر روی الک ۱۹ میلی‌متر	۲۷۲۴	۲۷۳۳	۲۷۴۸	۰/۳۲۶
مانده بر روی الک ۹/۵ میلی‌متر	۲۶۷۱	۲۶۸۵	۲۷۰۹	۰/۵۱۷
مانده بر روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر	۲۶۸۲	۲۶۹۶	۲۷۱۹	۰/۵۰۲

۴-۴- نتایج آزمایش وزن مخصوص ریزدانه

با توجه به فرمول‌های ۳-۵ تا ۳-۸ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح ریزدانه به دست آمد که نتایج آن در جدول ۲-۴ آمده است.

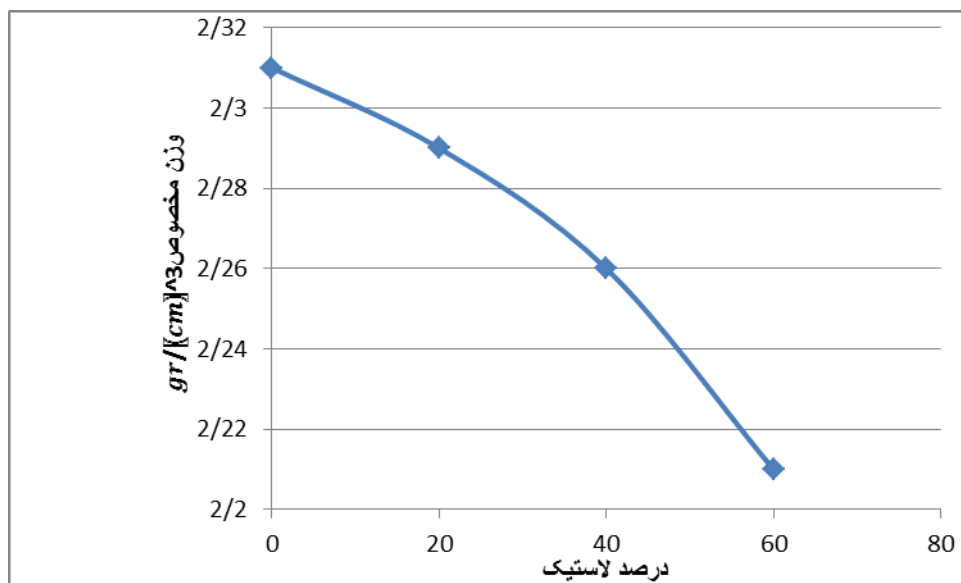
جدول ۲-۴ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی ریزدانه

ابعاد مصالح	وزن مخصوص $OD(\frac{kg}{m^3})$	وزن مخصوص $SSD(\frac{kg}{m^3})$	وزن مخصوص ظاهری $(\frac{kg}{m^3})$	درصد جذب آب
رد شده از الک ۴/۷۵ میلی‌متر	۲۵۴۸	۲۶۰۶	۲۷۰۴	۲/۲۵

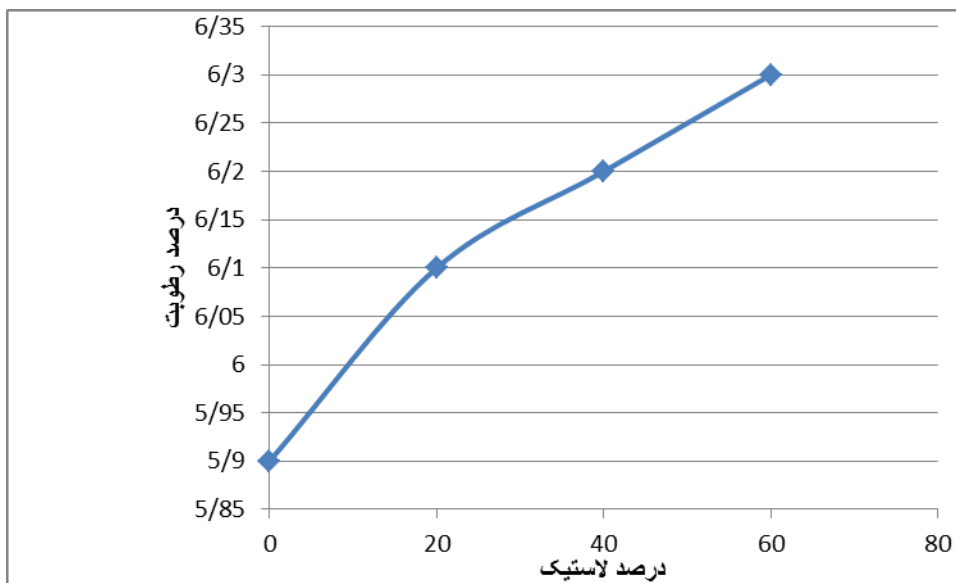
۴-۵- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

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

همان‌طور که از شکل ۲-۴ مشخص است، افزودن تکه‌های لاستیک به دانه‌بندی لایه اساس موجب کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک می‌شود که علت این امر ناشی از وزن کمتر قطعات لاستیک در مقایسه با ذرات سنگی است؛ از طرف دیگر شکل ۳-۴ 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 ۲-۴ وزن مخصوص نمونه‌ها



شکل ۳-۴ رطوبت بهینه نمونه‌ها

۴-۶- نتایج حاصل از 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 ۱۹۳۵ گرم از مصالح باقی ماند که با توجه به رابطه ۳-۱۰ میزان درصد سایش لس آنجلس با مقدار ۲۲/۶ برابری می‌کند.

$$\text{درصد سایش لس آنجلس} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} = \frac{2500 - 1935}{2500} = 22.6$$

۴-۷- نتایج حاصل از آزمایش حد خمیری و روانی

با توجه به اینکه حد خمیری و حد روانی برای خاک‌های خمیری تعریف می‌شود و اینکه خاک مورد آزمایش در این پژوهش از نوع خاک‌های خمیری نیست، حد خمیری و روانی برای این خاک تعریف نمی‌شود.

۴-۸- نتایج حاصل از آزمایش ارزش ماسه‌ای

حین انجام این آزمایش ارتفاع ماسه و کل رسوبات با کمک گیج اندازه‌گیری به دست آمد و میزان درصد ارزش ماسه‌ای برابر با مقدار ۷۸ تعیین گردید.

۴-۹- نتایج حاصل از آزمایش شکستگی در دو وجه

با توجه به جدول ۳-۶ مقدار ۱۵۰۰ گرم از مصالح مانده بر روی الک ۴ جدا شد و درصد شکستگی در دو وجه مصالح سنگی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی مصالح سنگی مشخص شد که میزان درصد مصالح سنگی شکسته شده در دو وجه ۸۶ درصد است.

۴-۱۰- نتایج حاصل از آزمایش افت وزنی با سولفات سدیم

مصالح سنگی مورد استفاده در این آزمایش با توجه به جدول ۳-۷ انتخاب شد که میزان گرم مربوط به الک‌های مورد استفاده مربوط به ریزدانه و درشت‌دانه استفاده شده در این آزمایش در جدول ۴-۴

جدول ۳-۴ و جدول ۴-۴ آمده است.

با توجه به نتایج نشان داده شده در

جدول ۳-۴ و جدول ۴-۴ میزان افت وزنی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد افت وزنی ریزدانه} = \frac{\text{مجموع گرم کم شده مصالح ریزدانه}}{\text{مجموع کل گرم مصالح ریزدانه}} = \frac{30}{400} = 7/5$$

$$\text{درصد افت وزنی درشت‌دانه} = \frac{\text{مجموع گرم کم شده مصالح درشت‌دانه}}{\text{مجموع کل گرم مصالح درشت‌دانه}} = \frac{143}{1700} = 8/4$$

جدول ۳-۴ مقدار گرم مصالح سنگی ریزدانه مانده بر روی الک‌ها

اندازه الک	میزان گرم مانده قبل از آزمایش	میزان گرم مانده پس از آزمایش
۳۰۰ میکرون	۱۰۰	۹۲
۶۰۰ میکرون	۱۰۰	۹۴
۱/۱۸ میلی‌متر	۱۰۰	۹۳
۲/۳۶ میلی‌متر	۱۰۰	۹۱

جدول ۴-۴ مقدار گرم مصالح سنگی درشت‌دانه مانده بر روی الک‌ها

اندازه الک	میزان گرم مانده قبل از آزمایش	میزان گرم مانده پس از آزمایش
۱۹ میلی‌متر	۵۰۰	۴۶۳
۱۲/۵ میلی‌متر	۶۷۰	۶۲۱
۹/۵ میلی‌متر	۳۳۰	۲۹۸
۴/۷۵ میلی‌متر	۲۰۰	۱۷۵

۴-۱۱- نتایج حاصل از آزمایش سنگ‌دانه‌های پهن و دراز

با استفاده از بند ۳-۱۳ از این پژوهش مشخص شد که از مجموع ۲ کیلوگرم از مصالح سنگی مانده بر روی الک ۹/۵ میلی‌متر، تنها مقدار ۱۹۰ گرم از این مصالح، از گیج تطویل عبور نکرده است و میزان ۱۶۰ گرم از گیج تورق عبور کردند که میزان درصد سنگ‌دانه‌های پهن و دراز در ذیل به دست می‌آید.

$$\text{درصد سنگ‌دانه‌های پهن} = \frac{190}{2000} \times 100 = 9/5$$

$$\text{درصد سنگ‌دانه‌های دراز} = \frac{160}{2000} \times 100 = 8$$

۴-۱۲- نتایج حاصل از آزمایش CBR

۴-۱۲-۱- نتایج آزمایش CBR در حالت خشک

بنا به استاندارد ASTM D1883 میزان CBR بر حسب نسبت بار واحد لازم برای نفوذ پیستون به اندازه‌ی ۲/۵ میلی‌متر (۰/۱ اینچ) و ۵ میلی‌متر (۰/۲ اینچ) در خاک مورد آزمایش به بار واحد لازم برای نفوذ مصالح استاندارد تعریف می‌شود.

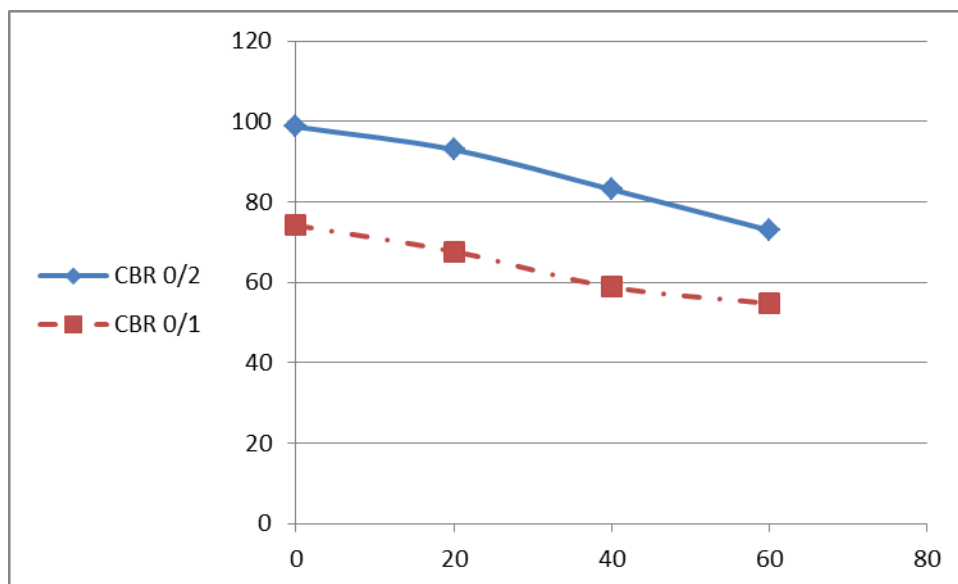
همان‌طور که گفته شد میزان CBR بر اساس دو میزان نفوذ ۲/۵ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر محاسبه می‌شود و بنا به آیین‌نامه هر کدام که مقدار بیشتری را نشان داد به‌عنوان CBR نمونه خاکی باید گزارش کرد. با توجه به رابطه ۳-۱۳ و رابطه ۳-۱۴ مقدار CBR برای چهار نوع خاک با درصد‌های مختلف لاستیک محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴-۵ آمده است.

همان‌طور که از نتایج به دست آمده از آزمایشات مشخص است، مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۲ اینچ (۵ میلی‌متر) پیستون از مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۱ اینچ (۲/۵ میلی‌متر) بیشتر شده و بنا به آیین‌نامه CBR مربوط به ۰/۲ اینچ به‌عنوان نسبت باربری کلی خاک باید در نظر گرفته شود.

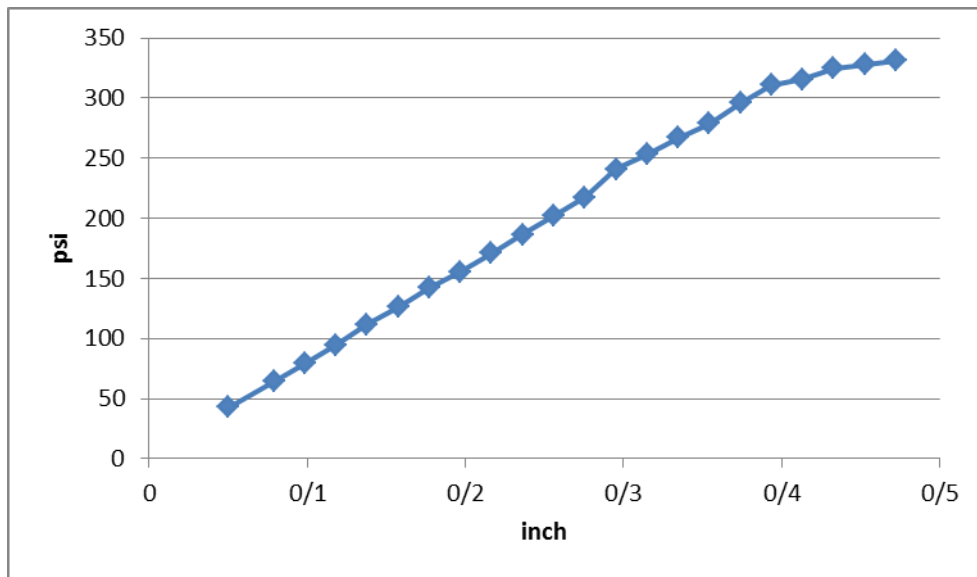
نتایج به دست آمده در جدول ۴-۵ نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک به خاک باعث کاهش مقدار CBR از مقدار ۹۸/۶۸ برای نمونه کنترل به مقدار ۹۳، ۸۳/۱۱ و ۷۲/۹۶ به ترتیب به‌ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده بر روی الک نمره ۱۰، شده است که روند کاهش مقدار CBR در شکل ۴-۴ و نمودارهای تنش بر حسب نفوذ در اشکال ۴-۵ تا ۴-۸ قابل مشاهده است.

جدول ۴-۵ مقادیر CBR به ازای درصدهای مختلف لاستیک در حالت خشک

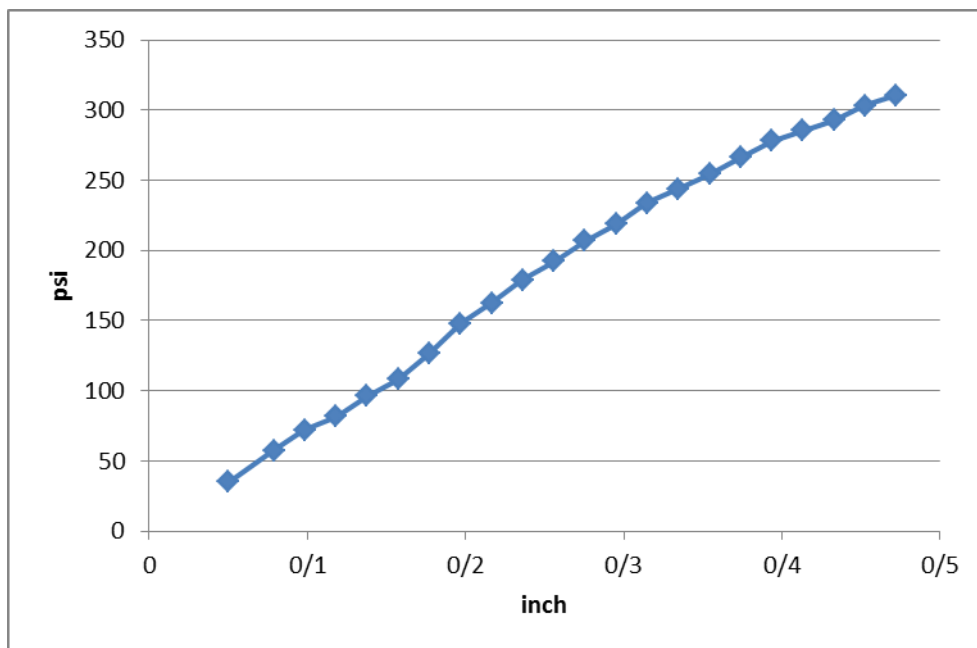
مقدار CBR به ازای نفوذ ۰/۲ اینچ	مقدار CBR به ازای نفوذ ۰/۱ اینچ	نمونه
۹۸/۶۸	۷۴/۱۵	کنترل
۹۳	۶۷/۷	حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰
۸۳/۱۱	۵۸/۸۴	حاوی ۴۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰
۷۲/۹۶	۵۴/۸	حاوی ۶۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰



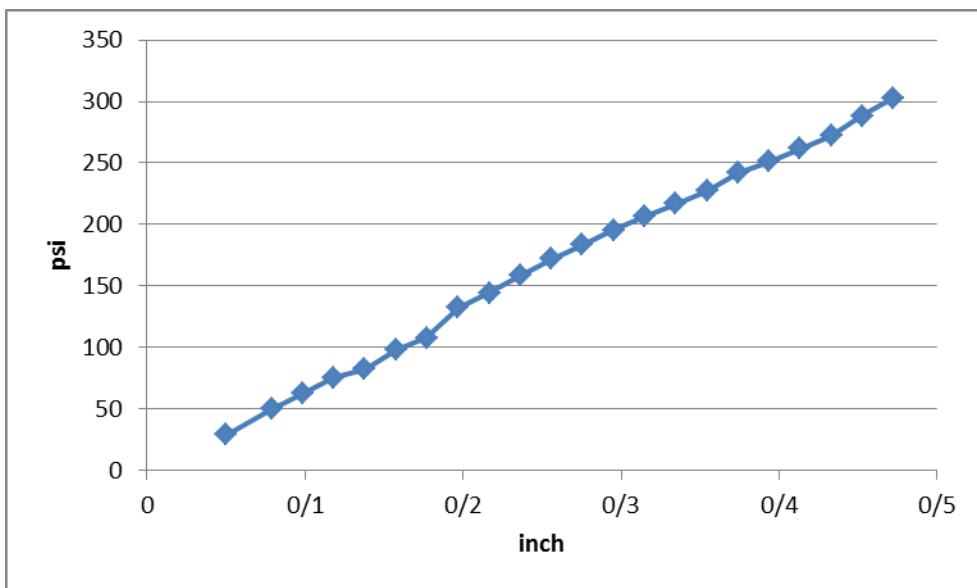
شکل ۴-۴ تأثیر افزودن لاستیک بر مقدار CBR در حالت خشک



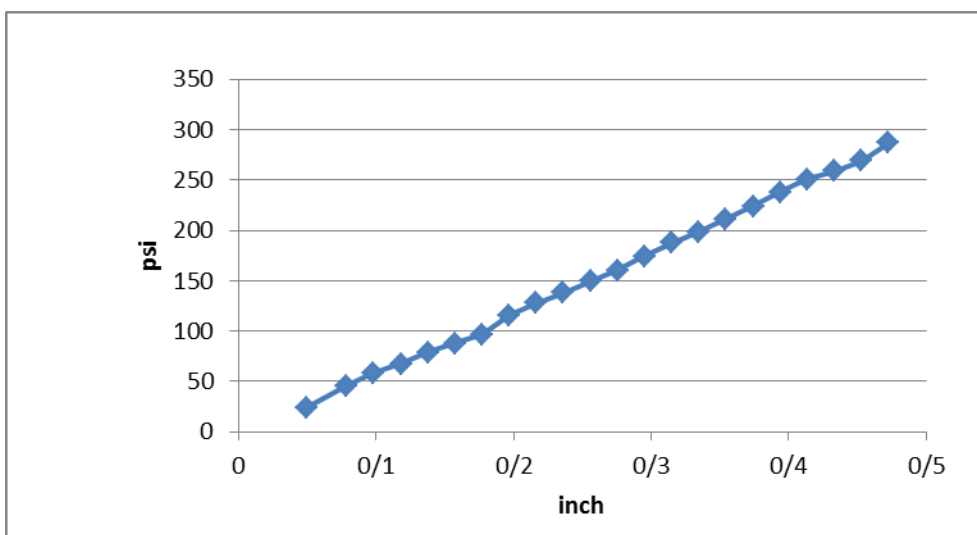
شکل ۴-۵ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه کنترلی در حالت CBR خشک



شکل ۴-۶ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۲۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک



شکل ۷-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۴۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک



شکل ۸-۴ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۶۰ درصد لاستیک در حالت CBR خشک

همان‌طور که می‌دانیم مقدار مقاومت CBR خاک وابسته به جنس و سختی مصالح تشکیل دهنده خاک و چگونگی ارتباط و پیوستگی میان ذرات آن می‌باشد. از علت‌های کاهش مقدار CBR با جایگزینی خرده لاستیک در خاک می‌توان به سختی و مقاومت کمتر ذرات خرده لاستیک در مقایسه با مصالح سنگی و میزان پیوستگی بیشتر ذرات سنگی با هم نسبت به ذرات سنگی و خرده لاستیک اشاره کرد به بیان دیگر افزودن خرده لاستیک به خاک سبب کاهش اصطکاک داخلی ذرات خاک شده است.

نتایج این آزمایشات هم‌چنین نشان می‌دهد که نرخ کاهش مقدار CBR با افزایش درصد خرده لاستیک در خاک، در حال افزایش است و تأثیرات منفی افزودن خرده لاستیک در خاک بیشتر می‌شود.

همان‌طور که گفته شد؛ آیین‌نامه حداقل مقدار CBR خاک را برای استفاده در لایه‌ی اساس، ۸۰ مشخص کرده است پس می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی حداکثر ۴۰ درصد از خرده لاستیک به جای مصالح مانده بر روی الک ۱۰ امکان‌پذیر است و مقدار بیشتر خرده لاستیک الزامات آیین‌نامه را برقرار نمی‌کند.

۴-۱۲-۲- نتایج آزمایش CBR در حالت اشباع

همان‌طور که در بخش ۴-۱۲-۱ گفته شد، نسبت باربری کالیفرنیا به‌ازای میزان نفوذ ۰/۱ و ۰/۲ اینچ پیستون در نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد و هر کدام که بیشتر باشد به‌عنوان میزان CBR نمونه خاکی گزارش می‌شود.

پس از ۹۶ ساعت عمل‌آوری نمونه، آن را از آب خارج کرده و پس از خروج آب از نمونه، نمونه زیر گیج بارگذاری دستگاه سی بی آر قرار داده می‌شود. نتایج کامل آزمایش CBR در حالت اشباع در جدول ۴-۶ آمده است.

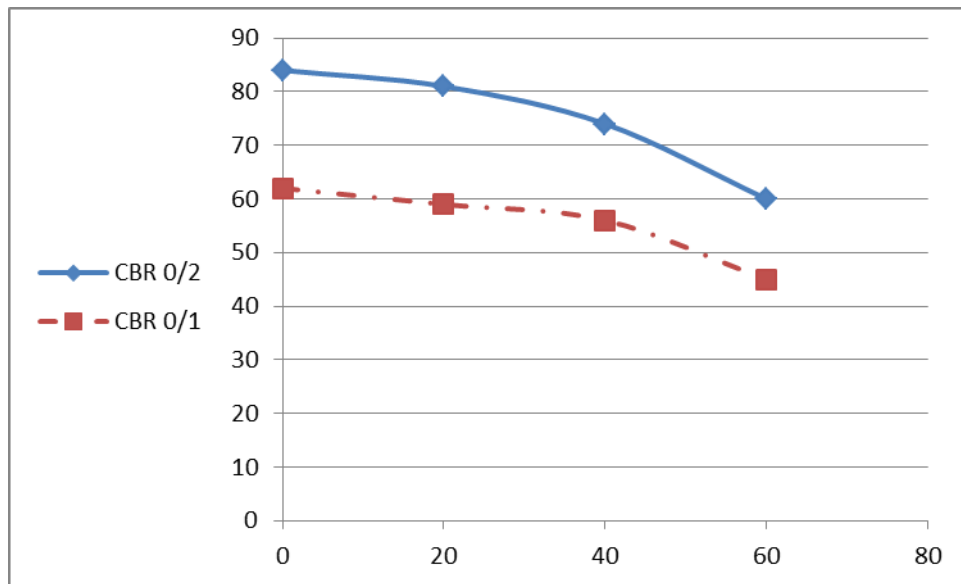
جدول ۴-۶ مقادیر CBR به ازای درصد‌های مختلف لاستیک در حالت اشباع

مقدار CBR به ازای نفوذ ۰/۲ اینچ	مقدار CBR به ازای نفوذ ۰/۱ اینچ	نمونه
۸۴	۶۲	کنترل
۸۱	۵۹	حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰
۷۴	۵۶	حاوی ۴۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰
۶۰	۴۵	حاوی ۶۰ درصد پودر لاستیک مانده روی الک ۱۰

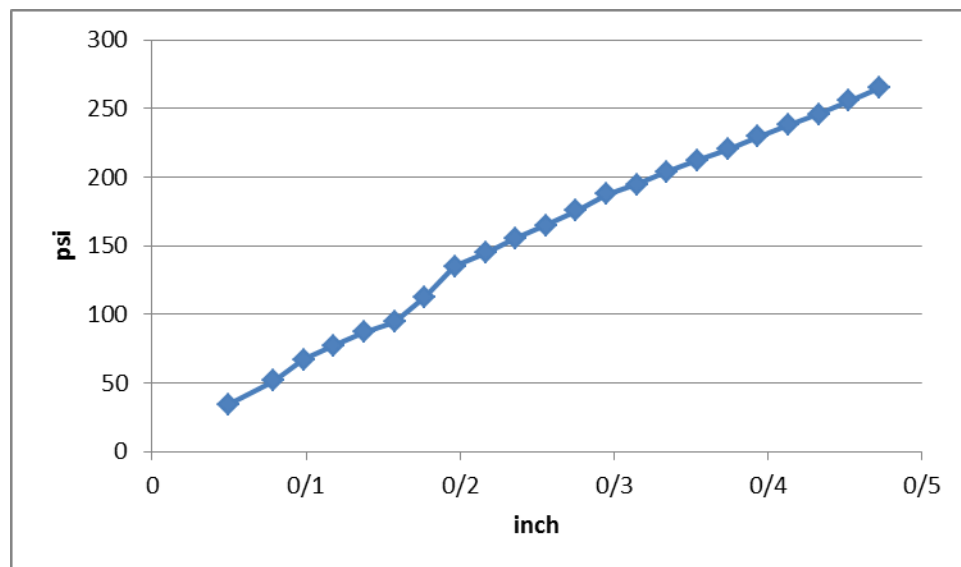
همان‌طور که از نتایج به دست آمده از آزمایشات مشخص است، مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۲ اینچ پیستون از مقدار CBR خاک مربوط به نفوذ ۰/۱ اینچ بیشتر شده و بنا به آیین‌نامه CBR مربوط به ۰/۲ اینچ به‌عنوان نسبت باربری کلی خاک باید در نظر گرفته شود.

نتایج به دست آمده در جدول ۴-۶ نشان می‌دهد که افزودن خرده لاستیک به خاک باعث کاهش مقدار CBR از مقدار ۸۴ برای نمونه کنترل به مقدار ۸۱، ۷۴ و ۶۰ به ترتیب به‌ازای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک مانده بر روی الک نمره ۱۰ شده است که روند کاهش مقدار CBR را در شکل ۴-۹ قابل مشاهده می‌باشد.

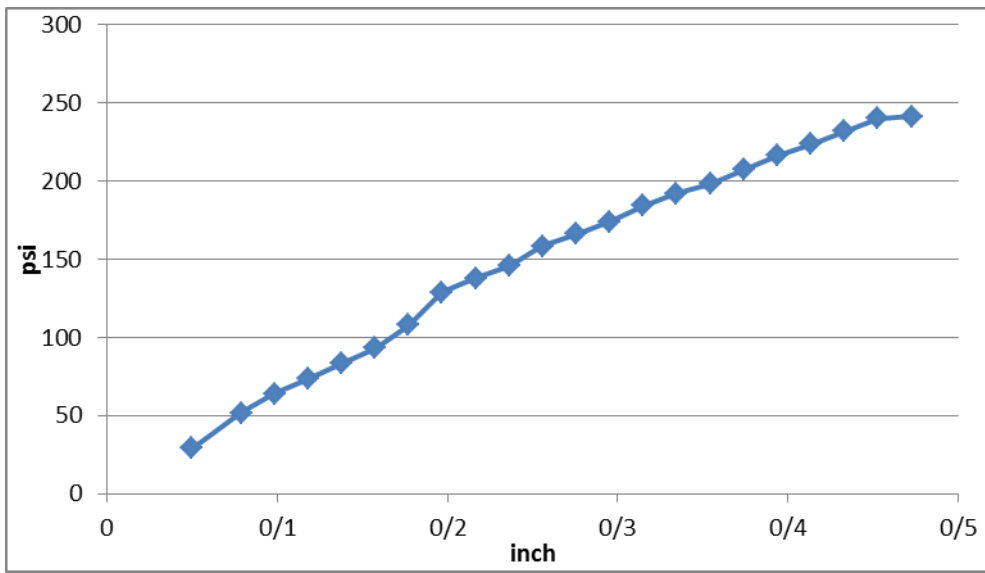
در بخش ۴-۱۲-۱ گفته شد که جنس مصالح خاک و چگونگی پیوستگی میان ذرات خاک دو فاکتور مهم در مقدار CBR هستند. دلایل کاهش میزان CBR در نمونه‌های اشباع هم‌چون حالت خشک مربوط به مقاومت کمتر ذرات لاستیک در مقایسه با نمونه‌های خاکی و پیوستگی بیشتر ذرات خاک با هم نسبت به ذرات خاک و خرده لاستیک می‌باشد.



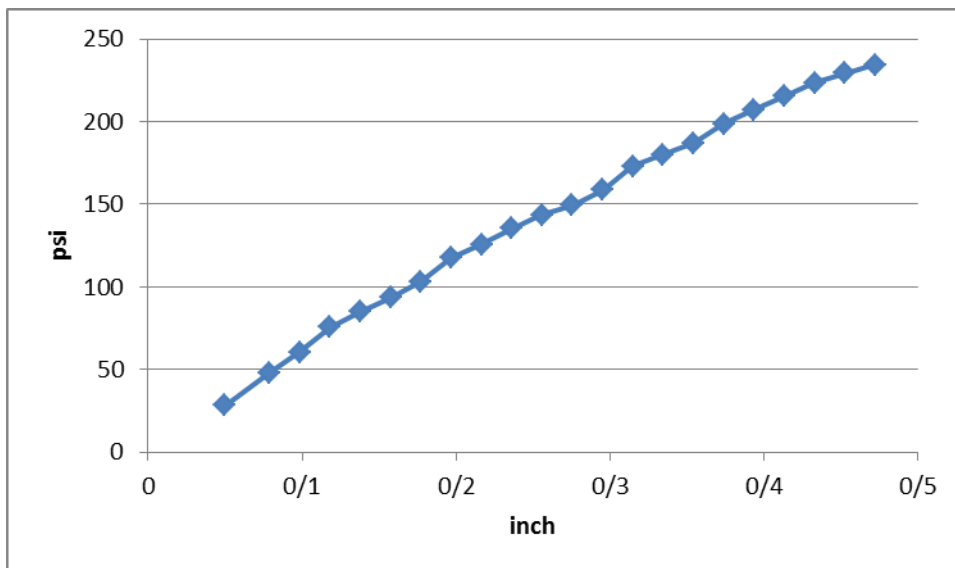
شکل ۴-۹ تأثیر افزودن لاستیک بر مقدار CBR در حالت اشباع



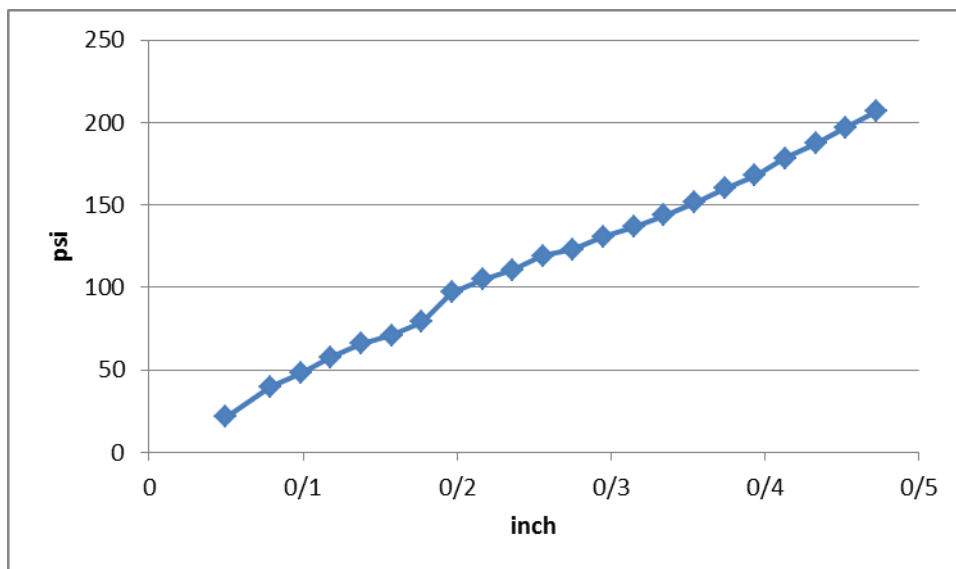
شکل ۴-۱۰ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه کنترلی در حالت CBR اشباع



شکل ۴-۱۱ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۲۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع



شکل ۴-۱۲ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۴۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع



شکل ۴-۱۳ نمودار تنش-نفوذ برای نمونه حاوی ۶۰ درصد لاستیک در حالت CBR اشباع

نتایج این آزمایشات روی نمونه‌های اشباع نشان داد که نرخ کاهش مقدار CBR با افزایش درصد خرده لاستیک در خاک، در حال افزایش است و تأثیرات منفی افزودن خرده لاستیک در خاک بیشتر می‌شود. همان‌طور که از جدول ۳-۲ مشخص است؛ آیین‌نامه حداقل مقدار CBR خاک را برای استفاده در لایه‌ی اساس، ۸۰ مشخص کرده است پس می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی حداکثر ۲۰ درصد از خرده لاستیک به جای مصالح مانده بر روی الک ۱۰ امکان‌پذیر است و مقدار بیشتر خرده لاستیک الزامات آیین‌نامه را برقرار نمی‌کند.

۴-۱۲-۳- جمع‌بندی نتایج آزمایش CBR

با توجه به نتایج حالت خشک و اشباع مشخص شد که میزان CBR در حالت خشک از میزان آن در حالت اشباع به‌ازای درصد‌های یکسان لاستیک بیشتر است که دلیل آن وجود آب اضافی در نمونه‌های

اشباع می‌باشد. این آب سبب روانی ذرات خاک یا به اصطلاح روغن‌کاری نمونه می‌شود و سختی نمونه‌ها در حالت اشباع را کاهش می‌دهد.

از طرف دیگر مشخص شد که در حالت خشک جایگزینی ۴۰ درصد خرده لاستیک به نمونه لایه‌ی اساس راه و در حالت اشباع جایگزینی ۲۰ درصد خرده لاستیک به نمونه لایه‌ی اساس راه بر اساس جدول ۲-۳ امکان‌پذیر است. حال می‌توان با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر از جهت میزان بارندگی مقدار درصد مجاز استفاده از خرده لاستیک را تعیین کرد. در حال حاضر در بیشتر نقاط، حالت بحرانی مقدار CBR یعنی حالت اشباع را به‌عنوان معیار در نظر می‌گیرند.

۴-۱۳- نتایج حاصل از آزمایش PFWD

همان‌طور که در بخش ۳-۱۵ بیان شد این آزمایش به دو صورت خشک و اشباع به انجام رسید. نمونه‌های اشباع به مدت ۳۰ روز جهت تراکم بهتر در آب غوطه‌ور شدند و سپس تست PFWD بر روی آن‌ها انجام شد.

میانگین نتایج تست PFWD در جداول ۴-۷ و ۴-۸ آمده است.

جدول ۴-۷ میانگین نتایج حالت خشک از آزمایش PFWD

Δ (mm)	$K \left(\frac{MN}{m^3}\right)$	$E \left(\frac{MN}{m^2}\right)$	نمونه
۰/۸۶	۲۴۰/۱۶	۵۱/۶۶	کنترل
۰/۷۸	۲۷۰/۳۳	۵۸/۸۸	حاوی ۲۰ درصد خرده لاستیک

جدول ۴-۸ میانگین نتایج حالت اشباع از آزمایش PFWD

Δ (mm)	$K \left(\frac{MN}{m^3}\right)$	$E \left(\frac{MN}{m^2}\right)$	نمونه
۰/۸۴۲	۲۴۱/۲	۵۲/۸	کنترل
۰/۷۶	۲۷۹/۶	۵۹/۸	حاوی ۲۰ درصد خرده لاستیک

همان‌طور که از جداول ۴-۷ و ۴-۸ مشخص است در هر دو حالت خشک و اشباع از آزمایش PFWD مقدار مدول الاستیسیته خاک با افزودن لاستیک نسبت به نمونه کنترل در همان حالت افزایش یافته است که نرخ افزایش این پارامتر در حالت خشک و اشباع به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۳ می‌باشد؛ 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.

شیارشده‌گی و ترک‌های پوست‌سوسماری از خرابی‌های مهم و سازه‌ای در روسازی راه محسوب می‌شوند. شیارشده‌گی 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 شیارشده‌گی 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.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

هدف اصلی در این تحقیق بررسی تأثیر جایگزینی لاستیک به جای بخشی از مصالح سنگی موجود در دانه‌بندی لایه اساس راه بوده است. از این‌رو خرده لاستیک با درصد‌های متفاوت جایگزین بخشی از سنگ-دانه‌های موجود در لایه اساس راه شده و آزمایشات مختلف جهت بررسی تأثیر این افزودن به انجام رسید. در ادامه به نتایج کلی به دست آمده از آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

۵-۲- نتایج کلی

- با انجام آزمایش تراکم مشخص شد که با جایگزینی خرده لاستیک به جای مصالح سنگی، وزن مخصوص نمونه‌های حاکی از میزان ۲/۳۱ برای نمونه کنترل به میزان ۲/۲۹، ۲/۲۶ و ۲/۲۱ به ترتیب به‌ازای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک کاهش یافته است.
- نتایج حاصل از آزمایشات CBR در حالت خشک نشان داد که میزان مقاومت CBR برای نمونه کنترل و نمونه‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک به ترتیب برابر با ۹۸/۶۸، ۹۳، ۸۳/۱۱ و ۷۲/۹۶ به دست می‌آید که نشان از روند کاهشی مقدار CBR به‌ازای افزایش خرده لاستیک دارد.
- نتایج حاصل از آزمایشات CBR در حالت اشباع نشان داد که میزان مقاومت CBR برای نمونه کنترل و نمونه‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده لاستیک به ترتیب برابر با ۸۴، ۸۱، ۷۴ و ۶۰ به دست می‌آید که نشان از روند کاهشی مقدار CBR به‌ازای افزایش خرده لاستیک دارد.
- بر اساس نشریه ۲۳۴ روسازی آسفالتی، حداقل مقدار مقاومت CBR لایه اساس راه باید ۸۰ باشد پس میزان مجاز جایگزینی خرده لاستیک در لایه اساس در حالت خشک و اشباع به ترتیب برابر

با ۴۰ و ۲۰ درصد می‌باشد.

- آزمایش PFWD نشان داد که جایگزینی ۲۰ درصد خرده لاستیک در خاک لایه اساس در دو حالت خشک و اشباع باعث افزایش پارامتر E، به ترتیب از مقدار ۵۱/۶۶ و ۵۲/۸ به ۵۸/۸۸ و ۵۹/۸ می‌شود که نشان از افزایش سختی لایه‌ی خاکی است.
- با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات CBR و PFWD مشخص است که اگر روسازی بر اساس آیین‌نامه‌های ایران طراحی شود با توجه به کاهش CBR بر اثر افزایش مقدار خرده لاستیک، میزان ضخامت مورد نیاز جهت طراحی لایه اساس راه افزایش می‌یابد و اگر بر اساس آیین‌نامه AASHTO طراحی شود با توجه به افزایش مقدار E، ضخامت کمتری از لایه اساس راه در طراحی به دست می‌آید.

۵-۳- پیشنهادها

- استفاده از ذرات لاستیک با قطری بزرگ‌تر از الک ۴ و جایگزین مصالح شنی موجود در لایه اساس راه جهت تقویت سازی؛
- استفاده از ذرات لاستیک به صورت تراشه در لایه اساس راه جهت تقویت سازی؛
- بررسی مدول برجهنگی لایه اساس راه که پارامتری مهم در طراحی و کنترل کیفیت راه می‌باشد.

منابع

- [۱] چوگونی م، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "اصلاح خواص قیر با استفاده از پلیمرهای LDPE، SBS و CR در مناطق گرمسیر"، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۲] آقاجانی پ، مقدس نژاد ف، (۱۳۹۰)، "اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- [۳] شاکری ا، مقدس نژاد ف، کشاورزاد ا، (۱۳۹۲)، "مقایسه خصوصیات مقاومتی آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.
- [4] Menon, G.M. and C. Franco, " **Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt** ". international symposium on pavement recycling, 2005: p. 67.
- [5] Oda, S. and J. Fernandes Jr." **Technical Feasibility Of Using Scrap Tire Rubber For Asphalt Paving In Brazil** ". in Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Segundo Simposio Sobre Manutencao e Rehabilitacao de Pavimentos e Controle Technologico. 2001.
- [6] Navarro, F., et al., " **Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens** ". Fuel, 2004 : p. 2041-2049.
- [۷] بهفرنیا ک، حسن زاده م، اعتمادی م، عظیمی فر ف، (۱۳۸۸)، " بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی پودر لاستیک تایر ضایعاتی "، اولین کنفرانس ملی بتن.
- [8] Huynh, H., D. Raghavan, and C. Ferraris, " **Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials** ". NISTIR, 1996: p. 23.
- [9] Topcu, I.B, " **The properties of rubberized concretes** ". Cement and concrete

research, 1995: p. 304-310.

[10] Al-Akhras, N.M. and M.M. Smadi," **Properties of tire rubber ash mortar Cement and Concrete Composites** ", 2004. **26(7)**: p. 821-826.

[11] Cetin, H., M. Fener, and O. Gunaydin," **Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material** ". Engineering Geology, 2006: p. 110-120

[12] Hataf, N. and M. Rahimi," **Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds** ". Construction and Building Materials, 2006: p. 910-916

[13] Al-Tabbaa, A. and T. Aravinthan," **Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials** ". Waste Management, 1998: p. 9-16

[۱۴] شوش پاشا ع، روشن ع، مینائی م، (۱۳۹۲)، " بهبود مشخصات مکانیکی و فیزیکی خاک

رس با استفاده از الیاف پلیمری و خرده لاستیک "، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان

[۱۵] پزشکی ا، امین فر م، ح، (۱۳۹۳)، " بررسی و قیاس اثر پودر لاستیک بر خاک با اثر ضایعات

درشت تر لاستیک "، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران

[۱۶] نورزاد ر، روشی م، (۱۳۹۳)، " بررسی رفتار آزمایشگاهی ماسه مسلح با خرده‌های

لاستیک و پودر لاستیک "، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل

[17] Kjartanson, B.H., R.A. Lohnes, and S. Yang," **Mechanical properties of shredded tires** ". Geotechnical Testing Journal, 2002: p. 44-52

[18] Gotteland, P., S. Lambert, and L. Balachowski," **Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures** ". Studia geotechnica et mechanica, 2005: p. 55-66

[۱۹] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۰، نشریه ۲۳۴، آیین‌نامه طرح

هندسی راه‌های ایران، تجدید نظر اول

[20] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, C127," **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate "**.

[21] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, C128," **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate "**.

[22] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D422," **Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils "**.

[23] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D1557, " **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort "**.

[24] ASTM (2000). Annual Book Of ASTM Standards, D131," **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort "**.

[25] ASTM (2012). Annual Book Of ASTM Standards, D4318," **Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils "**.

[26] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D2419," **Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate "**.

[27] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D5821," **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate "**.

[28] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, C88," **Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate "**.

[29] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D4791," **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate "**.

[30] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D1883," **Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils** ".

[31] ASTM (2004). Annual Book Of ASTM Standards, D4791," **Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)** ".

Abstract

Rusty tires of machinery are known as one of the most important factory and industrial garbage that its daily increase is made some problems for human societies. Reusing this material in other industries especially civil engineering in recent decades is considered. In recent years researchers investigated the possibility for using this material in concrete, soil and asphalt mixture and showed that combination of this material with these materials improves some of its characteristics.

The purpose of performing this study is surveying the possibility and effect of crumb rubber placement instead of some parts of present stony materials in the layer of road base. In this regard, experiments CBR and PFWD were performed which their results are two important factors in designing and quality control of furnishing road.

Results arising CBR experiment in dry state showed that for replacing 20,40 and 60 percent of crumb rubber with some grading of stony materials of the layer of road base, the amount of CBR of samples are 5.75, 15.77 and 26 percent respectively that will be declined towards control sample. Also in CBR saturation, this amount of declining respectively equals to 3.57,11.9 and 28.57 was calculated towards quality sample. At last it is recognized that based on specified CBR by regulations which its equivalence is 80, maximum replacing 40 percent of crumb rubber in dry state and 20 percent of crumb rubber in saturation state to grading of the soil of road base layer is possible. Also results arising PFWD experiment showed that replacing 20 percent of crumb rubber to the soil of base layer will be increased soil elasticity modulus in both dry and saturated states towards control sample 0.14 and 0.13 respectively that increasing this parameter in the soil of base layer causes declining of rutting failures and saurian skin tracks or it decreases the severity of damages of road furnishing.

Keywords: Crumb rubber, Base layer, CBR, PFWD



Shahrood University of Technology

Faculty Of Civil Engineering

M.Sc.Thesis In Road and Transport Engineering

**Use of Rubber Wastage for Improving Resistance Features of Base
Layer**

By

Abbas Daryadel

Supervisor

Dr. Hosien Ghasemzadeh Tehrani

February 2017