

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش راه و ترابری)

عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های WMA حاوی RAP و سرباره کوره آهن گدازی

نگارنده: سجاد امیری

استاد راهنما

دکتر سید علی حسینی

شهریور ۱۳۹۹

شماره: ۹۹/۳۹۶/ع.ت

تاریخ: ۱۳۹۹/۷/۱۳

باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

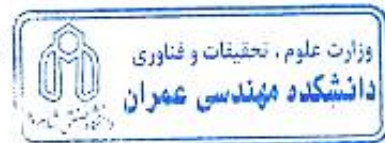
فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سجاد امیری با شماره دانشجویی ۹۶۰۳۰۵۴ رشته عمران گرایش راه و ترابری تحت عنوان عملکرد آزمایشگاهی مخلوطهای WMA حاوی RAP و سرباره کوره آهن گدازی که در تاریخ ۱۳۹۹/۶/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶	<input type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴
<input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
<input checked="" type="checkbox"/> نوع تحقیق: عملی	<input type="checkbox"/> نظری

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید علی حسینی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	--		
۳- استاد مشاور	--		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسین قاسم زاده	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سیدایمان آقایان	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضاناری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



بصورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تعمیرات به مادرم

شکر و قدردانی

نهن خدای عزوجل را که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می رود مد حیات است و چون برمی آید منفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شگرتی واجب.

خداوند متعال انسان را خلق کرد و به وسیله قلم، تعلیم داد و به انسان آنچه را که نمی دانست آموخت. حال که به یاری حضرت حق تعالی، این پایان نامه به اتمام رسیده است، بر خود واجب دانستم تا از تلاش صادقانه و محنتی ناپذیر استاد ارجمند جناب آقای دکتر سید علی حسینی که به عنوان استاد راهنما در جهت هدایت و راهبری این پایان نامه متحمل زحمات فراوانی شدند و با پیگیری های مسئولانه خویش موجب تکمیل این پایان نامه گردیدند، کمال شکر و قدردانی را دارم.

در نهایت مراتب شکر همسانه خود را به اعضاء خانواده و دوستانم که در طول دوران تحصیل و در مدت تهیه پایان نامه زحمات کونا کونی را با آغوش باز پذیرا شدند و محیطی آرام را رقم زدند ابراز می کنم. این قلم و مدار خیل این عزیزان بزرگوار است و از درگاه خداوند سبحان برای تمامی این عزیزان آرزوی موفقیت و سلامتی روز افزون خواستارم.

تهدنامه

اینجانب سجاد امیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالتی و سرباره کوره آهن‌گدازی تحت راهنمایی دکتر سید علی حسینی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

حکیده

تجدید ناپذیر بودن مصالح طبیعی و جلوگیری از تخریب محیط زیست جهت تولید مصالح سنگی از مهمترین انگیزه‌های استفاده از مواد بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. سرباره‌های کوره‌های آهن‌گدازی و تراشه‌های آسفالتی به عنوان مهمترین مصالح بازیافتی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده‌اند. افزایش درصد قیر مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره قوس الکتریکی با افزودن تراشه‌های آسفالتی در مخلوط قابل جبران خواهد بود. همچنین پودر سفره‌های بازیافتی با توجه به مواد کربنات کلسیم موجود در آن باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی خواهد شد.

در این تحقیق مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از افزودنی ساسوبیت حاوی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره ۰، ۳۵ و ۵۵ درصد تراشه آسفالتی و همچنین ۰ و ۱۰ درصد پودر سفره‌های بازیافتی ساخته شده و عملکرد حساسیت رطوبتی، مقاومت فشاری، مدول برجهندگی و مقاومت شیار شدگی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این تحقیق بهبود حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی و مدول برجهندگی را با افزایش درصدهای تراشه و همچنین افزایش حساسیت رطوبتی و مقاومت فشاری مخلوط‌ها با افزایش درصد سرباره و کاهش مقاومت فشاری و کاهش مدول برجهندگی با افزایش پودر سفره را نشان داده است.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، تراشه آسفالتی، سرباره کوره آهن‌گدازی، حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی، شیارشدگی

فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
۹	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۱-۲ ضرورت انجام تحقیق
۵	۱-۳ فرض های پژوهش
۶	۱-۴ اهداف پژوهش
۶	۱-۵ نوآوری
۶	۱-۶ ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته
۱۰	۲-۱ مقدمه
۱۰	۲-۲ مروری بر کارهای گذشته
۱۵	فصل ۳: تئوری ها و روش ها
۱۶	۳-۱ مقدمه
۱۶	۳-۲ انواع مخلوط های آسفالتی
۱۷	۳-۲-۱ مخلوط آسفالتی سرد
۱۸	۳-۲-۲ مخلوط آسفالتی داغ
۱۸	۳-۲-۳ مخلوط آسفالتی نیمه گرم
۱۸	۳-۲-۴ مخلوط آسفالتی گرم

- ۳-۳ تاریخچه تولید مخلوط آسفالتی گرم ۱۹
- ۳-۴ روش های تولید مخلوط آسفالتی گرم ۱۹
- ۳-۴-۱ تکنولوژی کف قیر ۲۰
- ۳-۴-۲ مواد افزودنی آلی یا واکس ۲۰
- ۳-۴-۳ مواد افزودنی شیمیایی ۲۲
- ۳-۵ مزایای مخلوط آسفالتی گرم ۲۲
- ۳-۵-۱ کاهش آلاینده ها ۲۳
- ۳-۵-۲ کاهش مصرف انرژی ۲۳
- ۳-۵-۳ کاهش پیرشدگی قیر ۲۴
- ۳-۵-۴ کاهش سرعت سرد شدن مخلوط ۲۴
- ۳-۵-۵ افزایش امکان بازیافت آسفالت ۲۵
- ۳-۶ سرباره ۲۵
- ۳-۶-۱ انواع سرباره های آهن و فولاد ۲۷
- ۳-۷ مشکلات و مسائل مربوط به سرباره ی آهن ۳۰
- ۳-۸ افزودنی قیر ۳۱
- ۳-۸-۱ مواد رشته ای یا الیاف ۳۱
- ۳-۸-۲ پرکننده ها ۳۲
- ۳-۸-۳ پلیمرها ۳۲
- ۳-۸-۴ پلی اتیلن ها ۳۳
- ۳-۸-۵ خرابی های روسازی ۳۶

فصل ۴: فعالیت های آزمایشگاهی

۴۱

۴-۱ مقدمه ۴۲

۴-۲ مشخصات مصالح و مواد ۴۲

۴-۲-۱ مشخصات مصالح سنگی ۴۲

۴-۲-۲ دانه بندی مصالح سنگی طبیعی ۴۳

۴-۲-۳ مرغوبیت مصالح سنگی ۴۴

۴-۲-۴ وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی ۴۶

۴-۲-۵ سرباره کوره آهن گدازی ۴۶

۴-۲-۶ تراشه آسفالتی ۴۷

۴-۲-۷ پلیمر ضایعاتی ۴۷

۴-۲-۸ آزمایش های قیر ۴۸

۴-۳ آزمایش های مورد بررسی ۴۹

۴-۳-۱ آزمایش مارشال ASTM D1559 ۵۰

۴-۳-۲ آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده،

AASHTO T283) ۵۱

۴-۳-۳ آزمایش مدول برجهنگی ۵۳

۴-۳-۴ آزمایش خزش استاتیکی ۵۴

۴-۳-۵ آزمایش نسبت شاخص مارشال ۵۶

۴-۳-۶ آزمایش مقاومت فشاری ۵۶

۴-۴ ساخت نمونه ها ۵۷

۴-۴-۱ نمونه های بدون پلیمر ضایعاتی ۵۷

۵۸.....	۲-۴-۴ نمونه های حاوی پلیمر ضایعاتی
۶۰.....	۵-۴ دستگاه بارگذاری
۶۳	فصل ۵: نتایج فعالیت های آزمایشگاهی
۶۴.....	۱-۵ مقدمه
۶۴.....	۲-۵ نتایج آزمایش مارشال
۶۷.....	۳-۵ نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی
۷۳.....	۴-۵ نتایج آزمایش استقامت مارشال و شاخص مارشال
۷۸.....	۵-۵ نتایج آزمایش مدول برجهنگی
۸۲.....	۶-۵ نتایج آزمایش خزش استاتیکی
۸۷.....	۷-۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری
۹۱.....	۸-۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری
۹۳	فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۴.....	۱-۶ نتیجه گیری
۹۵.....	۲-۶ پیشنهادات
۹۷	مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۴. دانه بندی مصالح سنگی ۴۴
- جدول ۲-۴. آزمایش های مرغوبیت مصالح سنگی ۴۵
- جدول ۳-۴. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی ۴۶
- جدول ۴-۴. ترکیبات شیمیایی سنگدانه سرباره ای و آهکی ۴۷
- جدول ۵-۴. آزمایش های مربوط به قیر خالص مصرفی ۴۸
- جدول ۶-۴. آزمایش های مورد بررسی در این پژوهش ۴۹
- جدول ۷-۴. درصد حجمی ترکیب سنگدانه ها و افزودنی ها در نمونه های بدون پلی اتیلن ضایعاتی ۵۹
- جدول ۸-۴. درصد حجمی ترکیب سنگدانه ها و افزودنی ها در نمونه های حاوی پلی اتیلن ضایعاتی ۶۰
- جدول ۱-۵. درصد های قیر بهینه برای نمونه های متفاوت ۶۶
- جدول ۲-۵. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی ۶۸
- جدول ۳-۵. نتایج آزمایش استقامت مارشال ۷۴
- جدول ۴-۵. نتایج آزمایش مدول برجهنگی ۷۹
- جدول ۵-۵. نتایج آزمایش خزش استاتیکی ۸۳
- جدول ۶-۵. نتایج مقاومت فشاری نمونه ها ۸۸
- جدول ۷-۵. خلاصه کلیه نتایج آزمایش ها ۹۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. ساختار پایان نامه ۷
- شکل ۳-۱. طبقه بندی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس درجه حرارت تولید [۲۳] ۱۷
- شکل ۳-۲. تصویری از ساسوبیت ۲۱
- شکل ۳-۳. سرباره ی کوره‌ی بلند آهن گدازی ۲۸
- شکل ۳-۴. سرباره ی فولاد در چند سایز متفاوت ۳۰
- شکل ۳-۵. محصولی از جنس پلی اتیلن سنگین که به آن کربنات کلسیم افزوده شده ۳۶
- شکل ۴-۱. نمودار دانه بندی مورد استفاده در پژوهش ۴۴
- شکل ۴-۲. پلی اتیلن های ضایعاتی قبل و بعد از خرد شدن ۴۸
- شکل ۴-۳. قرار دادن نمونه ها در آب ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت ۵۲
- شکل ۴-۴. قرار دادن نمونه درون فک مخصوص و بارگذاری بر روی آن ۵۳
- شکل ۴-۵. نمودار کرنش در مقابل زمان در آزمایش خزش استاتیکی ۵۵
- شکل ۴-۶. آزمایش خزش استاتیکی ۵۶
- شکل ۴-۷. نمای برخی از نمونه‌های ساخته شده ۵۹
- شکل ۴-۸. دستگاه بارگذاری ۶۱
- شکل ۵-۱. داده های مربوط به آزمایش مارشال نمونه شاهد ۶۵
- شکل ۵-۲. سطح متخلخل سرباره آهن گدازی ۶۷
- شکل ۵-۳. نمودار تاثیر سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR) ۷۰
- شکل ۵-۴. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) ۷۱
- شکل ۵-۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR) ۷۲
- شکل ۵-۶. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR) ۷۲
- شکل ۵-۷. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) ۷۳
- شکل ۵-۸. نمودار تاثیر سرباره بر شاخص مارشال ۷۶
- شکل ۵-۹. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر شاخص مارشال ۷۶
- شکل ۵-۱۰. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر شاخص مارشال ۷۷
- شکل ۵-۱۱. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر شاخص مارشال ۷۷
- شکل ۵-۱۲. نتایج آزمایش شاخص مارشال برای تمام نمونه ها ۷۸
- شکل ۵-۱۳. نمودار تاثیر سرباره بر مدول برجهندگی ۸۰
- شکل ۵-۱۴. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر مدول برجهندگی ۸۰
- شکل ۵-۱۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر مدول برجهندگی ۸۱
- شکل ۵-۱۶. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر مدول برجهندگی ۸۱

- شکل ۱۷-۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای تمام نمونه ها ۸۲
- شکل ۱۸-۵. تاثیر سرباره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی ۸۴
- شکل ۱۹-۵. تاثیر تراشه آسفالتی بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی ۸۵
- شکل ۲۰-۵. تاثیر همزمان تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی ۸۵
- شکل ۲۱-۵. تاثیر همزمان تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی ۸۶
- شکل ۲۲-۵. کرنش ماندگار برای تمام نمونه ها ۸۷
- شکل ۲۳-۵. سختی خزشی برای تمام نمونه ها ۸۷
- شکل ۲۴-۵. تاثیر سرباره بر مقاومت فشاری ۸۹
- شکل ۲۵-۵. تاثیر تراشه آسفالتی بر مقاومت فشاری ۸۹
- شکل ۲۶-۵. مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۲۰ درصد سرباره و تراشه آسفالتی ۹۰
- شکل ۲۷-۵. مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۴۰ درصد سرباره و تراشه آسفالتی ۹۰
- شکل ۲۸-۵. مقاومت فشاری برای تمام نمونه ها ۹۱

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

پس استفاده از روسازی‌های انعطاف‌پذیر^۱ در معابر شهری و بین‌شهری، پارکینگ‌ها و فرودگاه‌ها بسیار متداول می‌باشد. متداول‌ترین نوع روسازی انعطاف‌پذیر روسازی آسفالتی می‌باشد که در آن از مخلوط‌های آسفالتی برای لایه‌های رویه و بیندر استفاده می‌شود. مخلوط‌های آسفالتی از ترکیب مصالح سنگی، قیر و فیلر و در صورت نیاز افزودنی‌های^۲ آسفالت ساخته می‌شوند. یکی از متداول‌ترین نوع مخلوط‌های آسفالتی مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌باشند. مهم‌ترین مزایای مخلوط‌های آسفالتی گرم^۳ به درجه حرارت پایین تولید آن مربوط می‌شود. ملاحظات زیست محیطی، پیر شدگی کمتر قیر، مصرف سوخت کمتر و افزایش مدت زمان امکان اجرای مخلوط‌های آسفالتی گرم در طول سال، از جمله مهم‌ترین مزایای این نوع مخلوط آسفالتی می‌باشند[۱].

مخلوط‌های آسفالت گرم بر اساس تکنولوژی تولید بطور خلاصه به صورت زیر طبقه بندی می‌شوند[۲]:

- تکنولوژی کف قیر^۴
- مواد افزودنی آلی یا واکس^۵
- مواد افزودنی شیمیایی^۶

از مهم‌ترین افزودنی‌های تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌توان به افزودنی آلی یا ارگانیک اشاره نمود. افزودنی‌های ارگانیک در صورت ترکیب با قیر، ویسکوزیته آن را کاهش داده و در نتیجه حرارت و دمای لازم برای تولید آن را کاهش می‌دهند. مقدار استفاده از این افزودنی‌ها معمولاً ۱ تا ۴ درصد وزنی قیر است. ساسوبیت^۷ مهم‌ترین افزودنی این گروه به شمار می‌آید و در این تحقیق هم از آن

¹ Flexible Pavements

² admixture

³ Warm Mix Asphalt

⁴ Foaming Technique

⁵ Organic or Wax additives

⁶ Chemical additives

⁷ Sasobit®

استفاده شده است. ساسوبیت نقطه ذوبی بین ۸۵ تا ۱۱۵ درجه سانتی گراد دارا می‌باشد. ساسوبیت می‌تواند از قبل به صورت مذاب با قیر مخلوط شود یا در طی فرایند اختلاط به صورت حبه (قرص) به مخلوط اضافه گردد [۳].

مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً از سنگدانه‌های طبیعی تولید می‌شوند. تجدیدناپذیر بودن مصالح سنگی طبیعی در طبیعت و زیان‌های ناشی از استخراج آن‌ها سبب شده است که محققان به دنبال جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح بازیافتی و تحقیق در این زمینه باشند. از جمله روش‌های جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی استفاده از سنگدانه‌های مصنوعی می‌باشد. سرباره^۱ از جمله سنگدانه‌های مصنوعی است که از محصولات فرعی کارخانه‌های فولاد سازی به حساب می‌آید و انواع گوناگونی دارد. سرباره‌ی آهن‌گذاری دارای خصوصیتی چون وزن مخصوص بیشتر، سختی زیاد، زبری و درصد شکستگی بیشتری نسبت به مصالح طبیعی می‌باشد. شکل ظاهری سرباره‌ی آهن‌گذاری تیز گوشه و زاویه‌دار است. از دیگر خصوصیات این سنگدانه‌ها، مقاومت در برابر سایش و مقاومت باربری زیاد است. از طرفی با جایگزینی بخشی از مصالح سنگی با این سرباره‌ها، قفل و بست بین سنگدانه‌ها و پایداری مخلوط افزایش یافته و پیوستگی بهتری برقرار می‌شود، در نتیجه می‌تواند سبب افزایش سختی و افزایش مقاومت روسازی‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های معمول گردد.

یکی دیگر از مواد که می‌توان آن را با سنگدانه طبیعی جایگزین کرد مصالح تراشه آسفالتی (RAP)^۲ است. این مواد با تراشیدن سطح روکش‌های قدیمی حاصل می‌گردد. از این مصالح می‌توان در عملیات آسفالتی از قبیل نوسازی و اجرای روکش راه‌ها استفاده نمود. خواص مصالح تراشه آسفالتی تا حدود زیادی به مشخصات مواد اصلی تشکیل دهنده آن و نوع قیری که در روسازی قدیمی بکار رفته بستگی دارد. استفاده از تراشه آسفالتی در تهیه مخلوط‌های جدید می‌تواند مقدار مصرف مصالح جدید را کاهش دهد و منجر به صرفه جویی در مصرف مصالح طبیعی تجدیدناپذیر گردد.

^۱ Slag

^۲ Reclaimed asphalt pavement (RAP)

یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی موجود در کشور دفع و امحای زباله های پلیمری می‌باشد که امروزه به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. متأسفانه بعضی از این پلیمرها کاربرد یکبار مصرف دارند و بلافاصله بعد از مصرف، در زمان کوتاهی تبدیل به زباله می‌شوند و دفع و امحای آنان به هرشکلی می‌تواند برای محیط زیست خطرناک باشد، اما روشی که می‌تواند این خطرات را کاهش دهد بازیافت این پلیمرها است. یکی از پلیمرهای پرمصرف، پلی اتیلن^۱ است. که خود نیز انواع گوناگونی دارد. از پرمصرف‌ترین آن‌ها می‌توان به پلی اتیلن سنگین که ماده اصلی کیسه‌های پلاستیکی و سفره‌های یکبار مصرف است اشاره نمود. بعضاً برای افزایش مقاومت این کیسه‌ها تولیدکنندگان از مواد معدنی (بطور معمول کربنات کلسیم) در فرآیند تولید کیسه‌ها بهره می‌برند. می‌توان گفت پلی اتیلن حاوی کربنات کلسیم قابلیت استفاده در تولید مخلوط آسفالتی را دارد و در این تحقیق در ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است.

عمده‌ترین هدف این پایان‌نامه تهیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی گرم با جایگزین کردن بخشی از مصالح سنگی با سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و تراشه آسفالتی است. همچنین از پودر سفره‌های یکبار مصرف و کیسه‌های پلاستیکی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. بدین منظور سعی می‌گردد تا تأثیر این جایگزینی بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌ها مانند حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، مدول برجهندگی، مقاومت فشاری، مقاومت مارشال مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا از آزمایش‌هایی چون کشش غیرمستقیم جهت تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی^۲، کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده^۳، مقاومت فشاری مخلوط‌های آسفالتی^۴، نسبت شاخص مارشال^۵ استفاده می‌گردد و در نهایت نتایج این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

¹ Polyethylene

² Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures

³ Modified Lottman test

⁴ Compressive strength of Hot Mix Asphalt

⁵ Marshall quotient

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

در صنعت راهسازی یکی از صنایع آلاینده، محیط زیست است اما با استفاده از مصالح بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌توان از حجم تخریب محیط زیست کاست. جایگزینی سرباره آهن‌گذاری با سنگدانه طبیعی و همچنین استفاده از پودر سفره‌های یکبار مصرف و کیسه‌های پلاستیکی در مخلوط‌های آسفالتی یک راه مناسب برای حفظ منابع طبیعی است. با توجه به افزایش درصد قیر مصرفی در صورت استفاده از مصالح سرباره و به تبع آن افزایش هزینه‌های ساخت، استفاده همزمان از تراشه آسفالتی و سرباره آهن‌گذاری با توجه به اینکه تراشه آسفالتی حاوی قیر پیر شده می‌باشند، می‌تواند راه کار مفیدی باشد. همچنین استفاده از پلی اتیلن بازیافت شده در مخلوط آسفالتی باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست خواهد شد.

۱-۳ فرض‌های پژوهش

از مهمترین فرض‌های پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- دانه بندی مصالح برای همه مخلوط‌های ساخته شده یکسان در نظر گرفته شده است.
- ۲- به منظور تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی WMA از همان روش طرح اختلاط مارشال که برای مخلوط‌های آسفالتی HMA به کار گرفته شده استفاده می‌گردد.
- ۳- مصالح سنگی طبیعی استفاده شده در تحقیق دارای وزن مخصوص و مشخصات یکنواختی می‌باشند.
- ۴- مصالح تراشه‌های آسفالتی تهیه شده همگی مربوط به یک مسیر با شرایط یکسان است.
- ۵- سرباره های آهن‌گذاری استفاده شده از نوع سرباره قوس الکتریکی است و دارای مشخصات یکنواخت می باشد.
- ۶- پلی اتیلن ضایعاتی مورد استفاده خواص و مشخصات یکنواخت دارند.

۴-۱ اهداف پژوهش

اهداف این پژوهش به ترتیب عبارتست از :

۱- افزودن درصد بالایی از تراشه آسفالتی و سرباره آهن‌گذاری و همچنین پلی اتیلن ضایعاتی به مخلوط آسفالتی گرم

۲- بررسی مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از نظر حساسیت رطوبتی، مقاومت فشاری، مقاومت شیارشدگی، مقاومت مارشال و مدول برجهنگی

۳- مشخص کردن تاثیر هر یک از مواد سرباره فولاد، تراشه آسفالتی، پلی اتیلن ضایعاتی بر نتایج آزمایش‌های انجام شده

۵-۱ نوآوری

با وجود این که پژوهش‌های زیادی در خصوص اصلاح و جایگزینی عناصر مخلوط‌های آسفالتی (سنگدانه، قیر، فیلر) انجام شده است؛ اما با مروری بر مطالعات گذشته، مشاهده شد که پژوهش کاملی در خصوص ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از تراشه آسفالتی، سرباره‌ی آهن‌گذاری و پلیمر ضایعاتی بصورت همزمان انجام نشده است. ضمناً کربنات کلسیم موجود در برخی از پلی اتیلن-ها مورد تمرکز واقع نشده است.

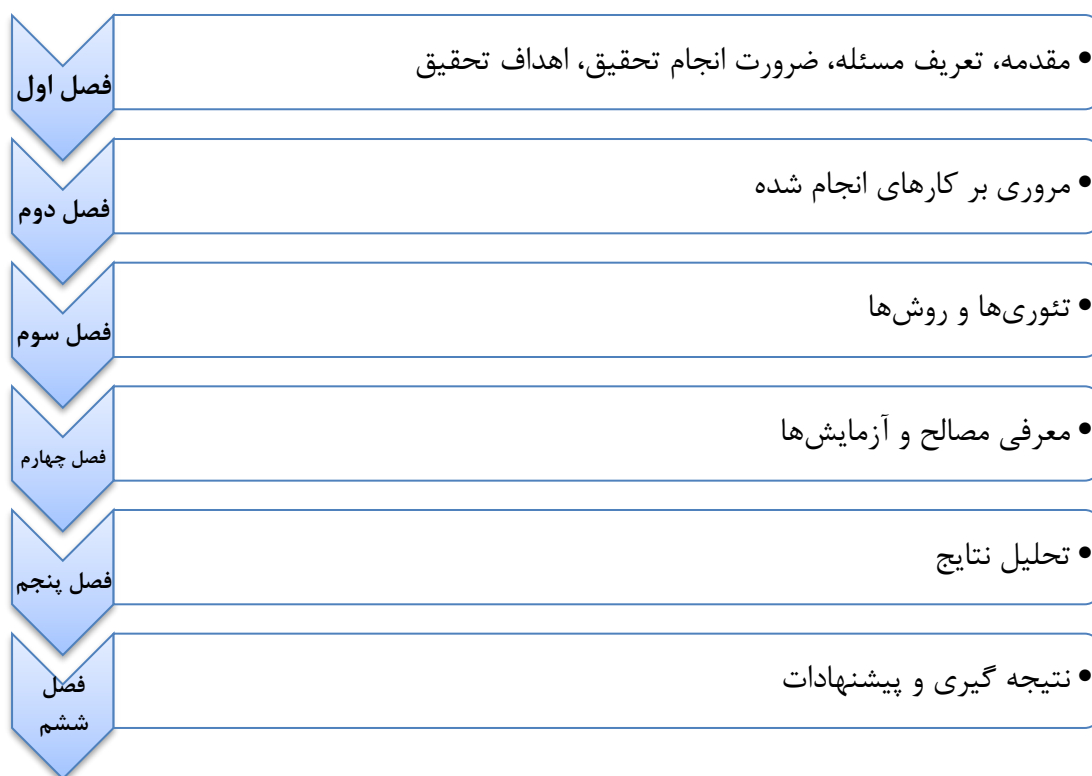
۶-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل ۵ فصل می‌باشد. در فصل اول به مقدمه، تعریف مسئله، ضرورت انجام تحقیق، اهداف تحقیق پرداخته شده است. در فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده، آورده شده است که در آن مروری بر مزایای مخلوط آسفالتی گرم انجام گرفته است. همچنین کارهای صورت گرفته با تراشه آسفالتی، سرباره کوره آهن‌گذاری و پلیمر ضایعاتی بیان شده است.

در فصل سوم تئوری‌ها و روش‌های موجود، مورد بررسی قرار گرفته است و تعاریفی از مخلوط‌های آسفالتی و انواع آن، تراشه آسفالتی، سرباره‌ی کوره آهن‌گدازی، پلیمر ضایعاتی آورده شده است. در فصل چهارم مصالح مورد استفاده معرفی می‌گردند و مشخصات آن نشان داده می‌شود؛ همچنین آزمایش‌های مد نظر در این تحقیق معرفی می‌شوند.

در فصل پنجم به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی به همراه تحلیل نتایج پرداخته شده است و فصل ششم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات اختصاص یافته است.

در شکل ۱-۱ ساختار پایان نامه بطور خلاصه شرح داده شده است.



شکل ۱-۱. ساختار پایان نامه

فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

۱-۲ مقدمه

افزودن مواد مختلف به قیر یا جایگزین کردن یکی از اجزای مخلوط آسفالتی (سنگدانه، قیر، فیلر) با مواد گوناگون یکی از موضوعات مورد علاقه‌ی محققین بوده است. افزودن مواد به قیر به دو روش خشک^۱ و تر^۲ انجام می‌گیرد، که هرکدام از آن مزایای خاص خود را دارد. از مهمترین این افزودنی‌ها پلیمرها هستند که می‌توانند خواص قیر را دستخوش تغییر نمایند. جایگزین کردن سرباره و تراشه آسفالتی و سایر مواد با هدف کاهش هزینه‌های ساخت یا کاهش آسیب‌های زیست محیطی صورت می‌گیرد، این جایگزینی نیز با درصدهای مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج متفاوتی داشته است.

۲-۲ مروری بر کارهای گذشته

امروزه روسازی انعطاف‌پذیر متداول‌ترین نوع روسازی در جهان به حساب می‌آید. در کشور ما نیز اکثر راه‌های موجود، از این نوع روسازی است. این روسازی معمولاً از چند لایه تشکیل می‌شود: زیراساس، اساس، آستر و رویه که دو لایه‌ی آخر که با بتن آسفالتی^۳ ساخته می‌شوند، مهم‌ترین و البته پرهزینه‌ترین لایه در این نوع روسازی‌اند. روش رایج برای تولید این بتن آسفالتی در کشورمان، که به آن مخلوط آسفالتی داغ^۴ گفته می‌شود، شامل معایبی است که می‌توان از ایجاد آلودگی زیاد و همچنین مصرف انرژی زیاد نام برد. اما چند سالی است که محققین روش جدیدی به نام مخلوط آسفالتی گرم^۵ را معرفی کرده‌اند.

اکثر محققین مخلوط آسفالتی گرم را برابر و حتی بهتر از مخلوط آسفالتی داغ می‌دانند. از جمله مزایای مخلوط‌های آسفالتی گرم که در منابع مختلف به آن اشاره شده است می‌توان به بهبود شرایط

¹ dry method

² wet method

³ Asphalt concrete

⁴ Hot Mix Asphalt

⁵ Warm Mix Asphalt

کار، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی هوا و همچنین بهبود کارایی اختلاط در مخلوط‌های آسفالتی اشاره نمود. همچنین به دلیل تولید و تراکم مخلوط آسفالتی در دمای پایین‌تر قیر پیرشدگی کمتر را تجربه می‌کند که می‌تواند منجر عمر خستگی بیشتر و همچنین عملکرد بهتر در حرارت پایین شود. برخی دیگر از محققین علاوه بر تاکید موارد فوق، نگرانی‌هایی را بابت عملکرد طولانی مدت مخلوط آسفالتی گرم بیان داشتند و معتقدند که مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است [۳-۵].

افزایش ترافیک و بار محوری بر روسازی‌های آسفالتی باعث بروز خرابی در آن‌ها و در نتیجه باعث بروز تصادفات می‌گردد. یکی از روش‌های مرمت روسازی‌های آسیب دیده، تراشیدن لایه رویی روسازی و سپس ساخت مجدد آن لایه است همین امر باعث تولید انبوه تراشه‌های آسفالتی^۱ می‌گردد. این حجم از تراشه‌های آسفالتی آسیب‌های جدی به محیط زیست وارد می‌کند [۵]. اما استفاده مجدد از این تراشه‌ها می‌تواند راهکار مناسبی باشد که هم ضایعات را مصرف می‌کند و هم تقاضا برای قیر و سنگدانه تازه را کاهش می‌دهد [۶].

از تراشه‌های آسفالتی می‌توان برای راه‌های فرعی، شانه‌ی راه‌ها، لایه‌ی اساس، بازیافت سرد و یا گرم درجا استفاده کرد و یا می‌توان درصدی از آن را به مخلوط آسفالتی تازه اضافه کرد [۷]. فروغ و شفیمیر بیان کردند که درصد‌های متفاوتی از تراشه‌های آسفالتی را می‌توان در مخلوط آسفالتی داغ استفاده کرد اما اغلب محققان حداکثر درصد استفاده از آن را ۵۰ درصد ذکر کرده‌اند، درحالی‌که استفاده از تکنولوژی‌های آسفالت گرم باعث می‌شود تا درصد‌های بیشتری از تراشه آسفالتی استفاده گردد [۶].

برایان هیل و همکاران افزودن تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی گرم را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که افزایش درصد تراشه آسفالتی باعث بهبود حساسیت رطوبتی و افزایش مقاومت شیارشدگی می‌شود [۸]. ژیان شو و همکاران در سال ۲۰۱۲ افزودن تراشه آسفالتی تا ۵۰ درصد به

¹ Reclaimed Asphalt Pavement

مخلوط آسفالتی گرم (تکنولوژی کف قیر) مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که این امر سبب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط می شود [۹]. جایگزین کردن سنگدانه اصلی با تراشه آسفالتی تا ۶۰ درصد با اندازه‌ی ۱۲ تا ۲۰ میلی متر در مخلوط آسفالتی گرم امکان پذیر است و باعث بهبود مقاومت مارشال و افزایش مقاومت شیارشدگی می گردد [۱۰]. ماریسا دنیس و همکاران به مخلوط آسفالتی گرم تا ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی افزودند و نشان دادند که این مخلوط مقاومت بالایی در برابر رطوبت دارد و عملکرد خستگی برابر با مخلوط آسفالتی داغ و مقاومت شیارشدگی بهتر از آن دارد [۱۰]. منصور فخری و امین احمدی (۲۰۱۷) تاثیر تراشه آسفالتی با میزان ۰، ۲۰ و ۴۰ و سرباره کوره قوس الکتریکی به مقدار ۰ و ۴۰ درصد را بر مخلوط آسفالتی گرم بررسی کردند و نشان دادند که افزودن این دو ماده همزمان عمر خستگی را بهبود می دهد و بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه حاوی ۴۰ درصد تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بود، همچنین نمونه های حاوی سرباره و تراشه شیارشدگی را بهبود می دهد که این امر به دلیل درگیری بیشتر سرباره ها با هم و همچنین قیر پیرشده در تراشه آسفالتی می باشد. از طرفی این مواد باعث ارتقای حساسیت رطوبتی، مدول ارتجاعی می شوند [۱۱]. همچنین در تحقیقی دیگر فخری و حسینی به میزان ۲۰، ۴۰ و ۵۰ تراشه آسفالتی و پشم شیشه را به مخلوط آسفالتی گرم افزودند و با انجام آزمایش ویل تراک و حساسیت رطوبتی دریافتند که مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبت در این نمونه ها (حاوی تراشه آسفالتی) بالا است [۱۲].

جلیلی قاضی زاده و همکاران (۲۰۱۷) ثابت کردند که سرباره های کوره قوس الکتریکی^۱ و سرباره کوره پایه اکسیژن^۲ عمر خستگی و مقاومت مارشال مخلوط آسفالت داغ را، بهبود می دهند و نشان دادند که چسبندگی قیر و سرباره بیش از چسبندگی قیر و سنگدانه طبیعی می باشد [۱۳].

سعید حسامی و همکاران نشان دادند که استفاده از سرباره کوره آهن گدازی به عنوان درشت دانه در مخلوط آسفالتی گرم باعث بهبود حساسیت رطوبتی می شود و این بهبود را با چسبندگی بیشتر قیر -

¹ Electric arc furnace slag

² Basic oxygen furnace slag

سرباره مرتبط دانستند همچنین آزمایش SEM نشان داد که سطوح سرباره‌ها حفره‌دارتر است که منجر به افزایش قیر بهینه و همچنین بهبود پوشاندن سرباره با قیر می‌شود [۱۴].

تاثیر مثبت کربنات کلسیم در مطالعات پیشین نشان داده شده‌است. عربانی و همکاران پوسته‌های صدف دریایی که حاوی مقدار زیادی کربنات کلسیم است را به عنوان فیلر استفاده کردند و نشان دادند که این عمل باعث افزایش عمر خستگی و کاهش پتانسیل شیارشدگی می‌گردد [۱۵]. گابی روویز و همکاران نیز پوسته صدف دریایی را به عنوان ریزدانه در مخلوط آسفالتی استفاده کردند و به مخلوطی با مقاومت شیارشدگی بیشتر و حساسیت رطوبتی کمتر نسبت به نمونه شاهد رسیدند [۱۶]. مقدس نژاد و همکاران مزایای نانو کلسیم کربنات را بررسی کردند و نمونه‌هایی حاوی نانو کربنات کلسیم را تحت آزمایش‌های خزش دینامیکی و مقاومت کششی غیر مستقیم قراردادند و نشان دادند که افزودن نانو کلسیم کربنات پتانسیل شیارشدگی را کاهش و عمرخستگی را افزایش و حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد [۱۷].

از طرف دیگر قیر به عنوان ماده‌ای مهم در مخلوط آسفالتی، به مرور و تحت بارگذاری‌های مداوم و سنگین و همچنین در دماهای پایین و یا در مقابل رطوبت حساس و آسیب‌پذیر است. تحقیق‌های زیادی انجام شده است که در آن‌ها سعی شده ساختار قیر را با مواد مختلفی اصلاح کنند و نقاط ضعف آن را بهبود دهد. پلیمر یکی از موادی است که با هدف اصلاح ساختار قیر، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. پلیمرها انواع گوناگونی دارند و کاربردهای متفاوتی از قبیل: ساخت ظروف پلاستیکی، کیسه‌های فروشگاهی، لاستیک خودروها و... دارند. این مواد می‌توانند ساختار قیر را دستخوش تغییر کنند و آن را بهبود دهند. اما از طرفی استفاده از مواد اولیه پلیمری برای اصلاح قیر، با توجه به گران بودن این مواد، به نظر مقرون به صرفه نمی‌آید. از این رو اخیراً استفاده از پلیمرهای ضایعاتی، با هزینه بسیار کم، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۸].

برای افزودن مواد پلیمری به قیر، دو روش کلی وجود دارد: خشک و تر (که به تفصیل در فصل سوم به آن پرداخته می‌شود). مویلا کواستا و همکاران در سال (۲۰۱۹) با روش خشک (به دلیل سهولت کار در آزمایشگاه) تکه‌های پلیمری که مخلوطی از چند نوع پلیمر ضایعاتی بود، را به مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین قیر کردند. نتایج حاصل از کارها نشان داد که این اصلاح باعث کاهش حساسیت رطوبتی، افزایش درصد هوا و کاهش تغییر شکل پلاستیک می‌شود [۱۹]. در تحقیقی دیگر، افزودن پلیمر ضایعاتی با روش خشک، باعث افزایش سختی، افزایش مقاومت در مقابل تغییر شکل پلاستیک شد [۲۰].

فصل ۳ : تئوری باوروش ها

۳-۱ مقدمه

روسازی راه سازه‌ای است که بر روی آخرین لایه متراکم شده خاک زمین طبیعی موجود (با اصلاح شده، خاکریزی‌ها، یا کف برش‌های خاکی و یا سنگی) که بطور کلی بستر روسازی نامیده می‌شود، قرار می‌گیرد [۲۱]. وظیفه‌ی اصلی این سازه کاهش تنش اعمالی توسط وسایل نقلیه، به سطح زمین طبیعی است. روسازی آسفالتی متداول‌ترین نوع روسازی در ایران است و لایه آسفالتی آخرین لایه موجود در این نوع روسازی می‌باشد که از مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده است. مخلوط آسفالتی، ترکیبی از قیر، شن، ماسه و فیلر است. در این ترکیب قیر نقش چسباننده‌ی شن و ماسه و فیلر به یکدیگر را دارد.

۳-۲ انواع مخلوط‌های آسفالتی

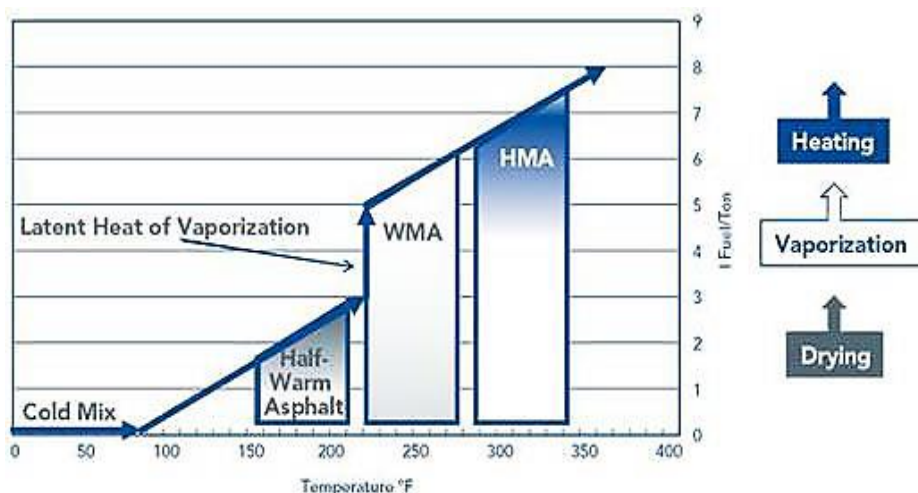
مهم‌ترین وجه تمایز این نوع مخلوط‌ها دمای تهیه اختلاط و تراکم مصالح سنگی و قیر است. بر این اساس، مخلوط‌های آسفالتی بر اساس دما در چهار دسته مخلوط‌های آسفالتی سرد (CMA)^۱، مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم (HWMA)^۲، مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA)^۳ و مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA)^۴ دسته بندی می‌گردند [۲۲]. شکل ۳-۱ محدوده‌ی دمای پخت هر یک از این مخلوط‌ها را نشان می‌دهد.

¹ Cold Mix Asphalt

² Half Warm Mix Asphalt

³ Warm Mix Asphalt

⁴ Hot Mix Asphalt



شکل ۱-۳. طبقه بندی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس درجه حرارت تولید [۲۳]

۳-۲-۱ مخلوط آسفالتی سرد

آسفالت سرد از اختلاط سنگدانه‌ها و قیرهای محلول یا قیرهای امولسیون در دمای محیط تهیه می‌شود و در همین دما پخش و متراکم می‌گردد. هنگام استفاده از امولسیون قیر سنگدانه‌ها می‌توانند مرطوب باشند اما در صورت استفاده از قیر محلول، سنگدانه‌ها باید خشک باشند. آسفالت سرد برای ساخت انواع لایه‌ها کاربرد دارد. هرچند که از آسفالت سرد در لایه آستر و رویه، تنها زمانی می‌توان استفاده کرد که ترافیک عبوری سبک یا متوسط باشد. این نوع از مخلوط آسفالتی را می‌توان در مسافت‌های زیاد حمل و سپس پخش کرد و یا حتی آن را در کارگاه انبار نمود و بعداً از آن استفاده کرد. به دو روش کلی می‌توان این نوع مخلوط را تولید کرد: روش کارخانه‌ای و روش مخلوط در محل. در روش اول مخلوط در کارخانه تهیه و سپس به محل پروژه حمل می‌شود اما در روش دوم سنگدانه‌ها در امتداد راه ریشه شده و روی آن قیرپاشی می‌گردد سپس توسط گریدر یا وسایل مشابه اختلاط و پخش می‌شود [۲۱].

۳-۲-۲ مخلوط آسفالتی داغ

مخلوط آسفالتی داغ پرکاربردترین مخلوط آسفالتی در کشور ما است و از مخلوط کردن سنگدانه‌های شکسته شده و دانه بندی شده، فیلر و قیر داغ بدست می‌آید. دوام زیاد، تولید یکنواخت، آماده شدن سریع راه برای عبور ترافیک از جمله مزایای این مخلوط آسفالتی است که می‌توان از آن در خیابان‌ها، فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها و... استفاده کرد. این نوع مخلوط آسفالتی در کنار مزایای آن، معایبی نیز دارد. استفاده از محدوده‌ی حرارتی بالا برای گرم کردن قیر، می‌تواند باعث پیرشدگی قیر گردد. از طرفی برای رسیدن به دمای بالا نیاز به صرف انرژی زیادی است که به تبع آن هزینه‌های تولید و آلودگی برای محیط زیست افزایش می‌یابد [۲۱].

۳-۲-۳ مخلوط آسفالتی نیمه گرم

مخلوط آسفالتی نیمه گرم، مخلوط‌هایی هستند که در دمای ۶۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تولید، پخش و متراکم می‌گردند. تولید گازهای گلخانه‌ای کم‌تر و مصرف انرژی کم‌تر، از جمله مزایای این نوع مخلوط می‌باشند. معمولاً قیر استفاده شده در این نوع مخلوط‌ها قیر امولسیون می‌باشد [۲۴].

۳-۲-۴ مخلوط آسفالتی گرم

این گروه از مخلوط‌ها، ضمن حفظ کیفیت مخلوط‌های آسفالتی داغ، با بهره‌گیری از روش‌هایی که منجر به کاهش کندروانی قیر می‌گردند؛ امکان تولید آسفالت در دماهای پایین‌تر از آسفالت داغ را ممکن می‌سازد. این روش، صرفه جویی قابل توجه در مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌ها را نسبت به مخلوط‌های داغ در پی دارد. این مخلوط‌ها عموماً در دمای ۱۱۰ الی ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تهیه و متراکم می‌گردند، همچنین انتظار می‌رود که دارای ویژگی‌های مشابه با آسفالت داغ باشند؛ بنابراین به لحاظ کاربردی در یک سطح قرار می‌گیرند.

۳-۳ تاریخچه تولید مخلوط آسفالتی گرم

افزایش گازهای گلخانه‌ای در سال‌های اخیر و اثرات زیان بار آن، کشورهای جهان را به سمت تبادل نظر جهت کاهش این گازها سوق داد. نتایج این هم‌اندیشی‌های جهانی، پیمان زیست محیطی کیوتو^۱ با هدف به کارگیری روش‌هایی به منظور کاهش نشر آلاینده‌ها بود. یکی از این موارد به کارگیری روش‌هایی جهت کاهش آلودگی ایجاد شده در فرآیند تولید آسفالت بود که منجر به ابداع تکنولوژی تولید مخلوط آسفالتی گرم گردید [۲۵].

آنچه به عنوان مخلوط آسفالتی گرم شناخته می‌شود مخلوطی است که بر حسب نوع روش ساخت آن در دمایی کمتر از دمای ساخت مخلوط آسفالتی داغ ساخته می‌شود. این نوع مخلوط آسفالتی برای اولین بار در اروپا ساخته شد. در سال ۱۹۹۵ نوع تولید شده با استفاده از افزودنی‌های کف زا ارائه شد [۲۶].

کاهش درجه حرارت مخلوط آسفالت حین عملیات تولید و اجرا با مانع بزرگ بالا بودن ویسکوزیته قیر و در نتیجه دشواری انجام عملیات اختلاط و کاهش کارایی مخلوط آسفالتی رو به رو خواهد بود [۲۳]. از همین رو در طی سالیان متمادی کشورهای زیادی تحقیقات متنوعی را به منظور دستیابی به هدف مذکور انجام دادند. حاصل این تحقیقات ابداع روش‌های مختلف جهت تولید مخلوط آسفالتی گرم بود.

۳-۴ روش‌های تولید مخلوط آسفالتی گرم

مخلوط‌های آسفالت گرم بر اساس تکنولوژی تولید بطور خلاصه به صورت زیر طبقه بندی می‌شوند [۲]:

^۱ Kyoto Protocol

- تکنولوژی کف قیر ۱
- مواد افزودنی آلی یا واکس ۲
- مواد افزودنی شیمیایی ۳

۳-۴-۱ تکنولوژی کف قیر

این تکنولوژی عمدتاً شامل افزودن مقداری کمی آب، به وسیله تزریق آن در قیر داغ یا افزودن مستقیم به مخلوط می‌باشد. هنگامی که آب با قیر داغ مخلوط شود، درجه حرارت بالا باعث تبخیر شدن آن می‌شود. این رخداد حجم زیادی از کف را تولید می‌کند که به طور موقت حجم قیر را افزایش می‌دهد و کندروانی مخلوط را کاهش می‌دهد. این اثر به طور قابل ملاحظه‌ای کارایی مخلوط را بهبود می‌بخشد، اما مدت زمان آن محدود است. این بدان معناست که مخلوط باید پس از تولید به سرعت پخش و متراکم گردد [۳].

۳-۴-۲ مواد افزودنی آلی یا واکس

بیشتر پلیمرها و هیدروکربن‌ها یک زنجیره محکم و منعطف از اتم‌های کربن دارند. طول زنجیره‌ی کربنی به وزن مولکولی وابسته است و اغلب به صورت C_x نمایش داده می‌شود که C نشان دهنده‌ی یک اتم کربن و اندیس x نشانگر طول زنجیره محکم کربنی است. افزودنی‌های آلی عموماً موم‌هایی با اندازه مولکولی بزرگتر از C_{45} هستند و نقطه‌ی ذوبشان بیش از ۷۱ درجه سانتیگراد می‌باشند. زنجیره‌های کربنی بلندتر، نقطه‌ی ذوب بالاتری دارند. مشابه آن شامل موم فیشر تراپش (ساسوبیت)، موم مونتِن، اسید آمیدهای چرب (لیکومنت بی اس ۱۰۰) و ترکیب موم مونتِن و اسید آمیدهای چرب (آسفالتن بی) است. اگرچه موم مونتِن خالص در آسفالت ماستیکی کارایی دارد، ولی آسفالتن B برای

1 Foaming Technique
2 Organic or Wax additives
3 Chemical additives

مخلوط‌های آسفالتی گرم توصیه شده است. در آلمان، افزودنی‌های آلی به طور معمول، مقدار ۲.۵ درصد وزن کل قیر اضافه می‌شوند [۲۶].

متداول‌ترین افزودنی آلی در تولید مخلوط آسفالتی گرم، ساسوبیت می‌باشد (شکل ۲-۳) که توسط شرکت خدمات شیمیایی (CAS) و با فرمول شیمیایی $C_nH_{2n} +$ ثبت شده است. ساسوبیت از واکنش ساسول در آفریقای جنوبی تولید شده و دارای یک زنجیره طولانی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک می‌باشد که از طریق تبدیل گاز زغال‌سنگ تولید می‌شود و فرآیند تولید آن از زغال‌سنگ سخت و یا کک با انفجار بخار از طریق روش فیشر تراپ واکنش می‌باشد.



شکل ۲-۳. تصویری از ساسوبیت

نقطه ذوب ساسوبیت در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، به طور کامل در قیر حل می‌گردد. این محصول به دلیل قابلیتی که در کاهش ویسکوزیته قیر دارد، سبب کاهش دمای اختلاط و اجرا به میزان ۱۸-۵۴ درجه سانتی‌گراد می‌گردد. پس از اختلاط با قیر قابلیت نگهداری بلندمدت را دارد و به هیچ عنوان دو فازه نمی‌شود. این افزودنی به دو شکل گرانول و پودری و به میزان ۰.۸ تا ۳ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷].

۳-۴-۳ مواد افزودنی شیمیایی

از میان انواع افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده در تولید آسفالت گرم، اووترم^۱ در مقایسه با سایر محصولات از قابلیت استفاده بالاتری برخوردار است. فن‌آوری بر مبنای فرآیند شیمیایی بوده که شامل افزودنی‌هایی جهت بهبود پوشش مصالح، کارایی مخلوط و افزایش چسبندگی است. اووترم به صورت امولسیون و معمولاً با استفاده از درصد بالای آسفالت بازیافتی تولید می‌شود که آب موجود در ماده‌ی امولسیونی، هنگام ترکیب امولسیون با مصالح سنگی داغ به صورت بخار آزاد گردیده و باعث پوشش بهتر سنگدانه‌ها می‌گردد.

اووترم یک افزودنی شیمیایی است که برای بهبود چسبندگی، تراکم و کارایی مخلوط‌های آسفالتی در درجه حرارت‌های کاهش یافته، طراحی شده است. اووترم با فرمول‌های شیمیایی متفاوتی برای انواع مصالح سنگی موجود است. تفاوت عمده بین فرمول‌های شیمیایی مختلف، در قابلیت چسبندگی آنهاست. یکی از اجزای این فرمول‌های شیمیایی، یک فعال کننده‌ی شیمیایی است که مانند یک امولسیون‌ساز عمل می‌کند. حدود نیمی از این فرمول شیمیایی، از منابع فناوری شده بوجود آمده است. اووترم باعث می‌شود درجه حرارت‌های تولید و اجرا در مقایسه‌ی با مخلوط‌های آسفالتی داغ، ۵۱ تا ۷۱ کاهش یابد [۲۶].

۳-۵ مزایای مخلوط آسفالتی گرم

مزیت اصلی تولید مخلوط آسفالتی گرم مصرف انرژی کمتر (به واسطه کاهش دمای تولید و اجرا) و کاهش آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت در کارخانه‌های تولید مخلوط آسفالتی و کاهش دود و بوی تولید شده هنگام تولید و پخش می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به جدید بودن تکنولوژی تولید مخلوط آسفالتی گرم و همچنین طول عمر حدود ۲۰ الی ۲۵ بررسی عملکرد درازمدت این نوع

^۱ Evotherm

مخلوط مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد. مزایای مختلف مخلوط آسفالتی گرم عبارت است از:

۱-۵-۳ کاهش آلاینده ها

از مهم‌ترین فواید به کارگیری مخلوط آسفالتی گرم کاهش تولید آلاینده‌ها به دلیل کاهش دما فرآیند تولید مخلوط آسفالت است. مطابق گزارش‌های ارائه شده میزان آلاینده‌هایی چون CO_2 ، SO_x ، NO_x ، TPM^1 ، BSM^2 ، PAC^3 در جریان تولید مخلوط آسفالتی گرم نسبت به میزان این آلاینده‌ها در مراحل تولید مخلوط آسفالتی داغ کاهش قابل توجهی می‌یابد. تأثیر مثبت این کاهش آلودگی بر سلامتی نیروهای کاری بیش از سایر موارد نمایان می‌گردد [۲۸].

مزیت ناشی از کاهش آلودگی هوا در کشورهایی که قوانین سخت گیرانه‌ای جهت کاهش آلودگی هوا وضع نموده‌اند و یا کشورهای عضو پیمان زیست محیطی کیوتو اهمیت بسیار بیشتری پیدا خواهد نمود. هم چنین کاهش آلودگی در مکان‌های فاقد هوای آزاد مانند تونل بطور خاصی مهم و الزامی به نظر می‌رسد [۲۸]. مضاف بر اثراتی که کاهش آلودگی بر سلامتی افراد جامعه و بخصوص کارکنان کارخانجات تولید آسفالت خواهد گذاشت، امکان احداث کارخانجات تولید آسفالت در داخل یا اطراف شهرها نیز فراهم می‌گردد.

۲-۵-۳ کاهش مصرف انرژی

کاهش آلودگی هوا اگرچه از جمله فواید مهم استفاده از مخلوط آسفالتی گرم است اما به دلیل نداشتن توجیه اقتصادی نمی‌تواند به عنوان یک منفعت مستقیم برای تولیدکنندگان آسفالت محسوب شود. مصرف سوخت نقش مهمی در سوددهی پروژه‌های اقتصادی دارد و کاهش آن به عنوان یکی از

¹ Total particular matter

² Benzene soluble matter

³ Polycyclic aromatic compounds

فواید مهم به کارگیری مخلوط آسفالتی گرم و مهم‌ترین مزیت برای تولیدکنندگان آسفالت به حساب می‌آید. این کاهش مصرف، به خصوص در کشورهایی که سوخت ارزش بالایی دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. ضمناً کاهش درجه حرارت تولید آسفالت علاوه بر کاهش مصرف انرژی استهلاک کارخانجات آسفالت نیز کاهش می‌یابد [۲۵].

۳-۵-۳ کاهش پیرشدگی قیر

پیرشدگی^۱ کوتاه مدت قیر در پروسه تولید و تراکم مخلوط‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد. با کاهش درجه حرارت تولید و تراکم مخلوط‌های آسفالتی میزان پیرشدگی قیر کمتر خواهد بود که این کاهش نقش به‌سزایی در افزایش دوام روسازی دارد [۲۹].

۳-۵-۴ کاهش سرعت سرد شدن مخلوط

با کاهش دمای تولید اختلاف دمای محیط و دمای پخش و تراکم کاهش یافته، در نتیجه مخلوط با سرعت کمتری سرد می‌گردد. هرچه این اختلاف کمتر شود نرخ سرد شدن مخلوط نیز کمتر خواهد شد. این کاهش نتایج زیر را در پی دارد [۲۹]:

- افزایش زمان جهت تراکم و در نتیجه امکان انجام عملیات روسازی در فصول سرد و مناطق

سردسیر

- افزایش فاصله حمل مجاز

^۱ Aging

۳-۵-۵ افزایش امکان بازیافت آسفالت

با افزایش تقاضا و محدودیت منابع مصالح سنگی طبیعی و قیر، تولیدکنندگان آسفالت استفاده از مصالح تراشیده شده روسازی آسفالتی را به عنوان یکی از اجزای مخلوط‌های آسفالتی داغ مورد استفاده قرار دادند. صرفه جویی اقتصادی و مزایای زیست محیطی دو فاکتور اصلی و تاثیرگذار در استفاده از تراشه‌های آسفالتی در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. با توجه به وجود قیر پیرشده در مصالح تراشه آسفالتی، میزان استفاده از این مصالح در مخلوط‌های آسفالتی داغ محدود شده است. اما در مخلوط‌های WMA با توجه به کاهش درجه حرارت تولید و تراکم و در نتیجه کاهش میزان پیرشدگی قیر امکان استفاده از درصد‌های بالاتر¹ RAP در این مخلوط‌ها فراهم می‌شود [۳۰].

طبق نتایج تحقیقات مختلف، می‌توان گفت تکنولوژی مخلوط آسفالتی گرم نسبت به مخلوط آسفالتی داغ امکان استفاده‌ی بیشتری از تراشه آسفالتی را فراهم می‌سازد. به نظر می‌رسد دلیل این امر کاهش پیرشدگی قیر در حین تولید مخلوط آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ می‌باشد [۶].

۳-۶ سرباره

سرباره، عبارت است از ماده‌ی مذابی که بر اثر فعل و انفعال بین مواد گداز آور، سنگ آهن، سوخت و ناخالصی‌های اکسید موجود در فلز به وجود می‌آید و در اثر این فعل و انفعالات، ناخالصی‌هایی که نباید در چدن وجود داشته باشد، از آهن خام جدا می‌شود [۳۱].

سرباره‌های فولاد (آهن) به دو روش عمده به دست می‌آیند که عبارتند از:

• سرباره‌های کوره‌ی بلند آهن‌گذاری^۲

• سرباره‌های فولادی^۱

¹ Reclaimed Asphalt Pavement , RAP

² Blast Furnace slag

سرباره‌های فولادی نیز در یکی از سه نوع کوره‌ی زیر تولید می‌شود:

• کوره‌ی قوس الکتریکی^۲

• کوره‌ی اکسیژن - بازی^۳

• کوره‌ی شعله‌ای^۴

در انواع مختلف کوره‌ها روش گرمایش و ذوب مشابه یکدیگرند و تفاوت اندکی بین کوره‌های فولاد وجود دارد. در کوره‌ی شعله‌ای، سنگ آهک به آهن افزوده می‌شود و ۵ الی ۴۱ ساعت طول می‌کشد تا ۳۲۲ تن فولاد تولید گردد. حال آن که در کوره‌ی اکسیژن - بازی برای تهیه‌ی همین مقدار فولاد ۱۵ دقیقه زمان

کافی است. نوع سوم کوره‌ها، قوس الکتریکی است که برای ایجاد گرما الکترودهای گرافیکی دارد. کوره‌ی اکسیژن - بازی و کوره‌ی قوس الکتریکی دو روش اصلی مورد استفاده برای تولید آهن خالص و فولاد هستند. در روش کوره‌ی اکسیژن - بازی اکسیژن به درون دریچه‌های فولادسازی دمیده می‌شود. در حالی که در روش کوره‌ی قوس الکتریکی از جریان ولتاژ بالا به منظور ذوب کردن آهن بهره می‌برند. در هر دو روش از آهن ذوب شده، کربن و سیلیکون و بسیاری عناصر غیرضروری دیگر در فولاد زدوده شود. در این فرآیند آهک به عنوان نوعی سیال اضافه می‌شود تا با مواد غیرضروری موجود در سنگ آهن ترکیب شده و آن‌ها را از فولاد مذاب جدا کند. اکثر صنایع تولید فولاد در جهان، بر اساس فناوری کوره‌ی اکسیژن - بازی عمل می‌کنند. در کشورما در صنعت تولید فولاد، از هر دو فناوری کوره‌ی اکسیژن - بازی و کوره‌ی قوس الکتریکی استفاده می‌گردد [۳۲].

¹ Steel Slag

² Electric Arc Furnance (EAF)

³ Basic Oxygen Furnance (BOF)

⁴ Open Hearth Furnance (OHF)

۱-۶-۳ انواع سرباره‌های آهن و فولاد

این نوع سرباره‌ها حاصل عملیات تولید فولاد در کوره‌های آهن‌گدازی بوده که با توجه به شیوه‌ی تولید و سازوکار پالایش به بخش‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- سرباره‌ی کوره‌ی بلند آهن‌گدازی
- سرباره‌ی تولید فولاد

۱-۶-۱-۱ سرباره‌ی کوره‌ی بلند آهن‌گدازی

درصد زیادی از سرباره‌های تولیدی در صنایع آهن و فولاد را سرباره‌های کوره‌ی بلند تشکیل می‌دهند، که در طی ساخت آهن خام (چدن) در طی ذوب سنگ آهن در حرارت ۴۹۵۲ تا ۴۸۲۲ درجه سانتی‌گراد، بر اثر فعل و انفعالات بین مواد گدازآور، قشر معدنی می‌سوزد و ناخالصی‌های اکسیدی موجود در فلز حاصل می‌شود و با توجه به ترکیب‌های شیمیایی، ناخالصی‌ها حالتی اسیدی یا قلیایی پیدا می‌کند [۳۱]. شکل ۳-۳ تصویری از سرباره کوره‌ی بلند آهن‌گدازی را نشان می‌دهد.

نسبت سرباره‌ی تولیدی به چدن مذاب تولید شده در طی فرآیند متغییر است و با میزان خلوص در سنگ معدن (آهن) و اندازه و راندمان کوره تغییر می‌کند. معمولاً این نسبت حدود ۳۰۰ کیلوگرم سرباره به ازای هر تن آهن خام تولیدی است. این نوع سرباره به علت اختلاف وزن مخصوص کمتر از آهن خام مذاب به صورت فازی مجزا در بالای مواد مذاب جمع می‌شود. سرباره‌ی کوره‌ی بلند دارای اکسیدهای احیاء نشده از جمله سیلیس و آلومین است.



شکل ۳-۳. سرباره ی کوره ی بلند آهن گذاری

در کوره ی بلند، کانی های آهن و ترکیبات اکسید آهن با زغال کک مخلوط می شوند و تا درجه حرارتی حدود ۴۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می شوند. در این فرآیند پس از عمل احیاء آهن خام به صورت مذاب در قسمت زیرین کوره جمع می شود. عمدتاً ناخالصی های موجود در سنگ آهن که خاصیت رسی هم دارند، از جنس سیلیس و آلومین هستند. چون از لحاظ فنی، جداسازی این ناخالصی از آهن در حالت جامد مشکل است، به بار کوره متشکل از آهن و کک، مقداری آهک اضافه می شود تا مخلوطی از آهک، سیلیس و آلومین که درجه ی ذوب آن ها پایین است، به دست آید. در این حالت علاوه بر مذاب شدن آهن، لایه ای سطحی از سرباره ی ذوب شده تشکیل می شود که به دلیل سبک تر بودن به صورت مذاب و کف بر روی آهن خام قرار می گیرد. بنابراین سرباره ی کوره ی بلند یک محصول گداخته است که در پایین کوره ی بلند و بر روی آهن خام ظاهر می گردد. سرباره ی مذاب را از کوره خارج نموده و پس از سرد کردن به مصارف گوناگون می رسانند. سرباره ی کوره ی بلند را می توان با ریختن در آب به سرعت سرد کرده و به صورت جامد به ساختار شیشه ای درآورد. چنانچه توسط سایر روش ها، عمل سرد کردن آرام تر انجام گیرد، سرباره به یک ماده سبک با خاصیت عایق حرارتی بالا تبدیل می شود.

سرباره ی کوره ی بلند در دو مرحله تشکیل می شود: سرباره ی اولیه که این سرباره در قسمت پایینی کوره تشکیل می شود و شامل قسمتی از مواد کمکی ذوب و خاکسترگانگ است که زودتر ذوب و با یکدیگر ترکیب می شوند، و در حرارت ۴۹۲۲ درجه ی سانتی گراد ذوب می شوند.

سرباره‌ی نهایی که در این حالت سرباره‌ی اولیه به همراه خاکستر گانگ و مواد کمکی ذوب باقی مانده مجدداً ترکیب می‌شوند و سرباره‌ای که به نام سرباره‌ی نهایی خوانده می‌شود، به وجود می‌آورند. این سرباره در سطح بالایی چدن مذاب جمع می‌گردد. به هر حال ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سرباره‌ی نهایی از مشخصات مهم سرباره است و تأثیر به‌سزایی در کار کوره‌ی بلند دارد.

۲-۱-۶-۳ سرباره‌های فولاد سازی

سرباره‌ی فولاد در واقع سنگدانه‌ی مصنوعی^۱ است که از محصولات جانبی کارخانجات فولاد سازی محسوب می‌شود که از فرآیند ذوب فولاد حاصل می‌شود. سرباره‌های ذوب شده در کوره به درون یک محوطه‌ی باز ریخته می‌شود تا به حالت جامد تبدیل گردد. سرباره از اکسید کلسیم، سیلیکات، آهن، آلومینیوم و منیزیم تشکیل شده است. بعد از جامد شدن سرباره‌ها، اندازه‌ی این قطعات فولادی حدود یک متر است. این سنگ‌های بزرگ را توسط گلوله‌های فولادی سنگین، خرد کرده و روی الک‌های بزرگی ریخته و آن را می‌لرزانند. دانه‌های ریزتر عبور کرده و مانده‌های روی الک را با همین روش مجدداً خرد کرده تا دانه‌بندی مورد نظر تأمین شود. شکل ۳-۴ تصویری از این سرباره بعد از خرد و الک شدن را نشان می‌دهد.

سرباره‌ی حاصله از کوره‌های فولاد سازی اغلب در هوای آزاد سرد شده و ماده‌ای سنگین جامد که در ظاهر خواصی مشابه با سنگ آذرین دارد را به وجود می‌آورد. سرباره‌ی فولاد کوره‌ی اکسیژن-بازی و کوره‌ی قوس الکتریکی هر دو خواص شیمیایی و فیزیکی تقریباً مشابهی دارند. ترکیب شیمیایی سرباره‌های فولاد با توجه به روش فولاد سازی و کیفیت فولاد تولید شده متغییر است.

^۱ Steel slag



شکل ۴-۳. سرباره ی فولاد در چند سایز متفاوت

۳-۶-۱-۳ خواص و ویژگی های مثبت سرباره ی آهن

از مهمترین ویژگی های مثبت سرباره ی آهن به موارد زیر می توان اشاره نمود:

- مقاومت و پایداری بالا در برابر ضربه.
- شکل زاویه ای بسیار خوب سنگدانه که زاویه ی اصطکاک داخلی خوبی را ایجاد می کند.
- مقاوم در برابر بار، فشار و سایش.
- مقاومت لغزشی بالا به دلیل مقاومت اصطکاکی بین سنگدانه ها.
- سنگدانه ی سرباره ی فولاد دارای خاصیت بازی (PH بین ۸ تا ۱۱) است.

۳-۷ مشکلات و مسائل مربوط به سرباره ی آهن

سنگدانه های سرباره ی آهن دارای برخی ویژگی های منفی نیز می باشند. یکی از آن ها افزایش حجم است که اصولاً به دلیل واکنش بین آهک آزاد شده در سرباره و آب به منظور تولید هیدراکسید کلسیم، به وجود می آید و باعث می شود که حجم افزایش یابد. این سرباره متعاقباً می تواند ترک بردارد و کاملاً از هم بپاشد. این تغییرات حجمی می تواند طی چند هفته پس از تولید سرباره ایجاد شود. از طرفی اگر

سرباره چند سال پس از تولید هم دور از تماس آب قرار گرفته باشد، در اولین تماس با آب دچار تغییرات حجمی خواهد شد. انبساط حجمی تا بیش از ۱۰ الی ۲۰ درصد برای سرباره‌هایی که دارای مقدار زیادی آهک آزاد می‌باشند، مشاهده شده است. معمولاً در یک سرباره‌ی آهن که هیچ هیدراسیونی در آن رخ ندهد میزان آهک آزاد بحرانی آن حدود ۳ درصد است.

۳-۸ افزودنی قیر

مشخصات یک افزودنی موثر جهت بهبود خواص قیر به شرح گزارش شده است:

الف - به آسانی در دسترس و مقرون به صرفه باشد.

ب - در دماهای اختلاط آسفالت تخریب نگردد.

پ - با قیر مخلوط شود.

ت - در دمای بالای روسازی، بدون آن که قیر را در دمای اختلاط و پخش خیلی روان و یا خیلی سفت کند و یا در دماهای پایین روسازی آن را ترد و شکننده کند، مقاومت در برابر روانی را افزایش دهد.

در ادامه به انواع کلی اصلاح‌کننده‌های قیر در روسازی‌های آسفالتی اشاره شده است.

۳-۸-۱ مواد رشته ای یا الیاف

این گروه از مواد افزودنی که همه به شکل رشته یا الیاف هستند، شامل الیاف طبیعی مانند پنبه نسوز و راکول^۱ و الیاف مصنوعی از قبیل شیشه، الیاف پلی استر و الیاف پلی پروپیلن می باشد. این گونه مواد افزودنی، مخلوط را مسلح کرده و باعث تقویت آن، به خصوص بالا بردن مقاومت کششی و بالا رفتن حد مجاز تغییر شکل نهایی مخلوط می‌گردد.

¹ Rockwell

۲-۸-۳ پرکننده ها

این مواد بیشتر با هدف پرکردن فضای خالی بین سنگدانه‌ها و بهبود دانه‌بندی مصالح، پایدارسازی مخلوط آسفالتی حاصل و بالا بردن چسبندگی بین دانه‌های مصالح به کار می‌روند. از جمله مواد پرکننده، گرد سنگ، سیمان، خاکستر زغال سنگ، نرمه زغال سنگ مرغوب، گوگرد و آهک را می‌توان نام برد. علاوه بر پرکردن فضای خالی مصالح مواد مذکور، هر یک بسته به ویژگی های خود، تاثیرات متفاوتی بر روی مخلوط خواهد داشت.

۳-۸-۳ پلیمرها

پلیمرها انواع گوناگونی دارند و به پلاستیک‌ها، الیاف، لاستیک‌ها، پوشش‌ها و چسب‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۳]. با وجود تنوع زیاد تولیدات پلیمری تنها تعداد محدودی از آن‌ها برای اصلاح خواص قیرها مناسب هستند. پلیمری که برای اصلاح خواص و رفتار قیر استفاده می‌شود باید شرایط زیر را دارا باشد:

- با قیر سازگار باشد و در دمای اختلاط مخلوط آسفالتی تخریب نگردد.
- حساسیت حرارتی قیر را بهبود دهد.
- به وسیله تجهیزات متداول اختلاط و پخش مصالح، بتوان مراحل آن را اجرا کرد.
- در دمای عادی قابلیت رسیدن به ویسکوزیته لازم برای پوشش دادن را دارا باشد.
- در هنگام انبار کردن، نگهداری، پس از خدمت دهی، وقتی که با قیر مخلوط می‌شود خواص اولیه خود را حفظ کند.

پلیمرهای مختلفی در اصلاح خواص قیر بکار رفته است. پلیمرهای متفاوت می‌تواند در قیر محلول و یا نامحلول باشند. پارامتر حلالیت، سازگاری فاز قیر- پلیمر را تعیین می‌کند. با افزایش وزن مولکولی پلیمر، کارایی مخلوط قیر- پلیمر بیشتر می‌شود، ولی از سازگاری فاز قیر- پلیمر کاسته شده و احتمال

جدایی دو فاز افزایش می‌یابد. مضاف بر این به سبب پیچیدگی سیستم چند فازی، افزایش پلیمر، ساختار درونی این سیستم پیچیده (سیستم کلوئید) را برهم زده و باعث رسوب آسفالتن می‌گردد. گذشته از این مسائل و برخی مسائل اقتصادی، برای آنکه یک قیر اصلاح شده با پلیمر بتواند وارد بازار مصرف شود باید شرایط زیر را نیز برآورده نماید:

➤ مخلوط قیر-پلیمر باید حداقل ۵-۷ روز در دمای بالا پایدار باشد.

➤ پلیمر در این مدت از لحاظ حرارتی پایدار باشد.

➤ زمان اختلاط طولانی با دمای اختلاط خیلی بالا لازم نباشد.

تاکنون هیچ پلیمری نتوانسته تمام شرایط بالا را برآورده نماید. در طی سال‌های گذشته کاربرد پلیمر در قیر، فرآیندهای مختلفی بسته به نوع پلیمر برای افزایش پلیمر به قیر ابداع شده است. بعنوان مثال پلیمرهایی که از لحاظ حرارتی ناپایدار هستند فوراً بعد از اختلاط مصرف می‌شوند و با قیر-پلیمرهایی که تمایل زیادی به جدایی فاز دارند، قبل از اختلاط با مصالح یکسره بهم زده می‌شوند. در صنعت قیر و راه سازی اغلب توصیه می‌شود قیر از قبل اصلاح شود و در شکلی که خیلی با قیر معمولی تفاوت نداشته باشد به کارخانه آسفالت‌سازی تحویل داده شود. این یک مزیت تکنیکی است که در تهیه و ابداع مخلوط‌های قیر-پلیمر باید در نظر گرفته شود.

۴-۸-۳ پلی اتیلن ها

اتیلن را می‌توان به کمک فرآیندهایی پلیمر کرده و انواع مختلفی پلی‌اتیلن بدست آورد. پلی‌اتیلن‌ها را می‌توان بر اساس چگالی به سه گرید اصلی پلی‌اتیلن سنگین^۱، پلی‌اتیلن سبک خطی^۲ و پلی‌اتیلن سبک^۳ تقسیم کرد. به دلیل تنوع گونه‌های پلی‌اتیلن، این پلیمرها کاربردهای وسیعی دارد که با انتخاب گرید متناسب با کاربرد، می‌توان بهترین نوع را از هر نظر انتخاب کرد. یکی از ویژگی‌های

^۱ High density polyethylene (HDPE)

^۲ Liner low density polyethylene (LLDPE)

^۳ Low density polyethylene (LDPE)

بارز این پلیمرها سمی نبودن آنهاست و به همین دلیل در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳].

۱-۴-۸-۳ پلی اتیلن سبک با دانسیته پایین

این پلی اتیلن از پلیمریزاسیون رادیکال‌های آزاد وینیلی و پلیمریزاسیون زیگلر-ناتا بدست می‌آید. در این نوع پلی اتیلن مولکول‌های اتیلن به شکل تصادفی به یکدیگر متصل می‌شوند و به همین شکل بسیار نامنظمی دارند. تولید آن تحت فشار و دمای بالا انجام می‌شود در نتیجه برای لوله‌کشی و بسته‌بندی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ماده مقاومت شیمیایی پایین تری نسبت به HDPE دارد، اما در مقابل بسیاری از اسیدهای معدنی مقاوم است. فیلم بسته بندی، عایقکاری کابل‌ها، محصور کردن گلخانه‌ها و ... از جمله کاربردهای این پلی اتیلن است [۳۳].

۲-۴-۸-۳ پلی اتیلن سبک خطی

این پلیمر از طریق کوپلیمریزاسیون مونومر اتیلن با اولفین‌های کوتاه زنجیر مانند ۱-بوتن یا ۱-هگزن با ۱-اوکتن، کوپلیمری با شاخه‌های هیدروکربن کوتاه به دست می‌آید. مقاومت کششی، ضربه و سوراخ شدگی آن بیشتر از نوع LDPE است. برای ساخت اشیایی شبیه فیلم‌های پلاستیکی (کیسه فریزر) استفاده می‌کنند [۳۳].

۳-۴-۸-۳ پلی اتیلن سنگین با دانسیته بالا

این پلی اتیلن خطی سخت‌تر از پلی اتیلن شاخه‌ای است و استحکام کششی بالایی دارد. پلیمریزاسیون این نوع پلی اتیلن خطی در فشار و دماهای نسبتاً پائین انجام می‌گردد. خواص مکانیکی این ماده، استفاده از آن را در شکل‌های بزرگ‌تر و کاربردهایی نظیر مواد ورقه‌ای در داخل مخازن، به عنوان عایق کاری در ستون‌ها گسترش داده است [۳۳].

۴-۴-۸-۳ خواص شیمیایی پلی اتیلن

مهم‌ترین خواص شیمیایی گریدهای پلی‌اتیلن عبارتند از: هیدروکربن غیرقطبی و اشباع با جرم مولکولی بالا دارای خواص شیمیایی مشابه پارافین، حلالیت در هیدروکربن‌های آروماتیک مانند تولوئن و زایلن یا حلال‌های کلرینه مانند تری‌کلرواتان یا تری‌کلروبنزن در دمای بالاتر از دمای محیط، شکل بلورین به دلیل تقارن ساختاری؛ افزایش چگالی و پایداری مکانیکی و شیمیایی با افزایش بلورینگی، عدم جذب آب، پایداری شیمیایی بالا، نفوذپذیری کم گازهای قطبی و بخار آب و عبورپذیری بالای اکسیژن و دی‌اکسیدکربن و چاپ‌پذیری تنها در صورت اصلاح که یکی از راه‌های اصلاح به منظور چاپ‌پذیری افزودن کربنات کلسیم به این پلی‌اتیلن‌ها است.

۵-۴-۸-۳ استفاده از کربنات کلسیم در صنایع پلیمر

نام‌های دیگر کربنات کلسیم، گچ‌فرنگی، سنگ‌آهک، کلسیت، آراگونیت و سنگ مرمر است. کربنات کلسیم یک ماده معدنی استثنایی است که بیش از ۴٪ از پوسته زمین را شامل و در سرتاسر دنیا پیدا می‌شود. کلسیم کربنات ماده‌ای شیمیایی با فرمول CaCO_3 است. از کربنات کلسیم به عنوان پرکننده^۱ در صنایع مختلف استفاده می‌شود. پرکننده‌ها به موادی گفته می‌شود که به مایعات و جامدات اضافه می‌شوند تا یک یا چند تغییر بصورت افزایش مقاومت مکانیکی و خاصیت شکل‌پذیری، کاهش و یا افزایش وزن مخصوص، افزایش مقاومت حرارتی، تغییر در غلظت و کاهش قیمت تمام شده می‌شود. کربنات کلسیم در صنایع رنگ، تولید چسب چوب، صنایع پلاستیک، صنایع لاستیک، صنایع کفپوش، صنایع چرم مصنوعی و... مصرف دارد. استفاده از این ماده در صنایع پلیمر با هدف کاهش آسیب به محیط زیست، بهبود خاصیت چاپ‌پذیری، کاهش قیمت تمام شده و اصلاح برخی خاصیت‌های فیزیکی پلیمرها انجام می‌گیرد [۳۴]. در شکل ۵-۳ نمونه‌ای از محصولات پلی‌اتیلن سنگین نشان داده

^۱ Filler

شده است که در فرآیند تولید آن کربنات کلسیم، به منظور کاهش قیمت تمام شده و افزایش خاصیت چاپ پذیری، افزوده گردیده است.



شکل ۳-۵. محصولی از جنس پلی اتیلن سنگین که به آن کربنات کلسیم افزوده شده

۳-۸-۵ خرابی های روسازی

روسازی ها اغلب تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می گیرند که بر عمر آنها موثر است. عیوب گوناگونی که در قسمت های مختلف راه به وجود می آید، به علت نوع خاک بستر، حجم ترافیک، نوع ترافیک، مشخصات مصالح روسازی، عوامل جوی و شرایط محیطی است. در صورت عدم بازرسی و ارزیابی به موقع و عدم ترمیم آنها، باعث خرابی سریع راه شده و باعث از بین رفتن سرمایه های عظیم مالی و ناراحتی کاربران راهها خواهد گردید [۳۵].

زوال رویه های آسفالتی، به علت خستگی های ناشی از تکرار بارگذاری و وجود شرایط آب و هوایی مختلف، متغیر است. در اثر تکرار بارگذاری با مرور زمان سطح رویه به علت ترک خوردن، خرد شدن و تغییر شکل دادن ناهموارتر می گردد. مطالعات انجام شده بر روی روسازی ها نشان می دهد که اگرچه خرابی روسازی ها با عمر آنها متناسب است، ولی این رابطه خطی نیست، به نحوی که در اوایل عمر روسازی شدت خرابی ها کم بوده و با گذشت زمان بر شدت آنها افزوده می شود [۳۵].

به طور کلی خرابی های روسازی به دو دسته کلی تقسیم می شود که شامل خرابی های سازه ای و عملکردی است. خرابی های سازه ای آن دسته از خرابی هایی هستند که در آن سیستم روسازی ظرفیت

باربری کافی در مقابل بارهای وارد شده را نداشته و سازه این روسازی‌ها بدون افزایش بیشتر خرابی نمی‌تواند بار بیشتری تحمل کند. اما خرابی‌های عملکردی در حالتی رخ می‌دهد که سیستم روسازی به لحاظ سازه‌ای مقاومت کافی دارد، ولی بهره‌وری آن‌ها به علت ناهمواری‌های سطح رویه با مشکل مواجه است [۳۵]. در ادامه برخی از خرابی‌های مهم روسازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۵-۸-۳ خرابی رطوبتی

خرابی رطوبتی^۱ در واقع از دست دادن مقاومت^۲ و دوام در مخلوط‌های آسفالتی تحت تاثیر رطوبت تعریف است. خرابی رطوبتی را می‌توان به دو فرآیند اساسی تقسیم کرد: ۱- از دست دادن چسبندگی و ۲- از دست دادن پیوستگی. از دست دادن چسبندگی به این علت است که آب بین قیر و سنگدانه قرار می‌گیرد و لایه قیر را از روی سطح سنگدانه جدا می‌نماید. از دست رفتن پیوستگی به این علت است که در نتیجه ارتباط بین قیر و آب خصوصیات قیر تغییر پیدا می‌یابد. خرابی رطوبتی می‌تواند در نتیجه هر کدام از این دو علت یا ترکیبی از هر آن‌ها باشد.

مهمترین مطالعات انجام شده در خصوص خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با فرآیند معروفی با عنوان عریان شدگی مرتبط می‌باشد. عریان شدگی فرآیند جدا شدن قیر از سطح سنگدانه می‌باشد؛ که دلیل این رخداد جاذبه بیشتر بین سنگدانه و آب نسبت به سنگدانه و قیر می‌باشد. البته قیر ممکن است در شرایط خشک هم از سطح سنگدانه جدا شود، مخصوصاً هنگامی که پس از گذشت سال‌ها این قیر پیر شده باشد. اما بیشترین تاثیر از دست دادن چسبندگی ناشی از عمل آب می‌باشد. رطوبت می‌تواند سبب گسیختگی‌های چسبندگی و پیوستگی گردد. مواد با خاصیت انبساط^۳، مانند رس‌ها، می‌تواند باعث ضعف در پیوستگی شود. زمانی که آب وارد محیط شود بدون آنکه چسبندگی از بین برود، ممکن است فشار حفره‌ای زیادی در روسازی ایجاد نماید و باعث ایجاد خرابی در روسازی گردد.

¹ Moisture damage

² Strength

³ Expansive materials

این فرآیند نوع دیگری از خرابی رطوبتی به حساب می‌آید. خرابی‌های مربوط به رطوبت در روسازی‌ها همچنین می‌تواند تابعی از هر نوع خرابی سنگدانه‌ها ناشی از فرآیندهایی مانند سیکل‌های ذوب - یخ باشد. هرچند خرابی‌های رطوبتی به علت‌هایی همچون از دست دادن مقاومت و تغییر در خصوصیات سنگدانه‌ها نادر هستند.

۲-۵-۸-۳ خرابی شیارشدگی

تغییر شکل دائمی در ساختار روسازی زمانی رخ می‌دهد که مقادیر کم تغییر شکل برگشت‌ناپذیر در بارگذاری دوره‌ای جمع شوند. بار محوری سنگین و با سرعت بارگذاری پایین به ویژه در دمای بالا در ایجاد این پدیده در مخلوط‌های آسفالتی نامناسب نقش اصلی را دارند. مخلوط‌های آسفالتی در مناطق گرمسیر، بیشتر در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد که باعث افزایش بیشتر سختی قیر می‌شود. مسیرهای چرخ به جا مانده نشانه‌ای از ضعف مقاومت برشی مخلوط است. شیارافتادگی ممکن است در لایه‌ی رویه و یا در هر دو لایه مخلوط آسفالتی رخ دهد.

وجود اصطکاک داخلی مناسب میان ذرات مصالح سنگی، از پارامترهای مهم که در مخلوط‌های آسفالتی از لغزش ذرات بر روی یکدیگر در اثر نیروهای اعمال شده، جلوگیری می‌کند. به طوری که شکستگی مصالح سنگی و زبری بیشتر بافت سطحی آن‌ها، پایداری بیشتری به مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های ناشی از بارگذاری را می‌دهد. علاوه بر خصوصیات سنگدانه‌ها، خواص رئولوژیکی قیر و مقدار آن و همچنین پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی از عوامل موثر بر عملکرد مخلوط آسفالتی است. بررسی‌های انجام شده روی مخلوط‌های یکسان با قیرهای مختلف بیان‌گر آنست که، استفاده از قیر نرم و نامناسب و با حساسیت حرارتی زیاد، از عوامل ایجاد این پدیده می‌باشد. هر چند بکاربردن قیر سفت‌تر قابلیت تغییر شکل و شیارافتادگی را در دمای بالا با وجود بار محوری سنگین کاهش می‌دهد، لیکن در مناطقی که اختلاف درجه حرارت حداقل و حداکثر در روز و شب و یا در فصول

سال زیاد و امکان ایجاد دمای پایین نیز وجود داشته باشد، مخلوط آسفالتی تهیه شده با قیر سخت، تحت بار سنگین مستعد بروز ترک و گسیختگی می‌شوند.

فصل ۴: فعالیت های آزمایشگاهی

۴-۱ مقدمه

مخلوط آسفالتی، از چهار جزء اصلی شامل قیر، مصالح سنگی، فیلر و فضای خالی تشکیل شده است. ویژگی‌های هر یک از این اجزا بر رفتار و عملکرد آسفالت ساخته شده تاثیر خواهد داشت. به همین دلیل، تعیین دقیق مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت آسفالت بسیار مهم است. از آنجا که روسازی‌های مورد استفاده در اکثر راه‌های ایران از نوع آسفالتی است و علل خرابی مهم در روسازی-های آسفالتی، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی است. بنابراین لازم است که این عملکردها در مخلوط-های آسفالتی که طراحی می‌شوند، مورد ارزیابی قرار گیرد. در این فصل، ابتدا مشخصات مصالح مورد استفاده بررسی می‌گردد، سپس آزمون‌های مورد نظر شرح داده می‌شود.

۴-۲ مشخصات مصالح و مواد

۴-۲-۱ مشخصات مصالح سنگی

مصالح سنگی یا بطور طبیعی در طبیعت یافت می‌شوند و یا به شکل غیر مستقیم به صورت تفاله برخی از کارخانجات ذوب فلزات تولید می‌شوند که به آن‌ها سرباره گفته می‌شوند. مصالح سنگی طبیعی یا به صورت آماده، از بستر رودخانه‌ها و معادن شن و ماسه‌هایی که در طول مسیر راه‌ها وجود دارند به دست می‌آیند، یا از خردکردن سنگ‌های موجود در معادن تولید می‌شوند. مصالح شکسته شده، ظرفیت باربری و استقامت بیشتری نسبت به مصالح گرد گوشه دارند. مصالح شکسته دارای لبه-های تیز و سطحی زبر بوده و بهتر در یکدیگر چفت و بست می‌شوند. مصالح سنگی که برای ساختن انواع آسفالت بکار می‌رود باید دارای مشخصات ویژه‌ای باشند که برخی از آن‌ها عبارتند از دانه‌بندی، سختی، دوام، تمیزی، شکل دانه‌ها و کیفیت سطح دانه‌ها. مصالح سنگی معدنی مورد استفاده در این پژوهش از معدنی در شهر میامی در استان سمنان تهیه شده، که از نوع آهکی می‌باشد. سرباره‌ی مورد

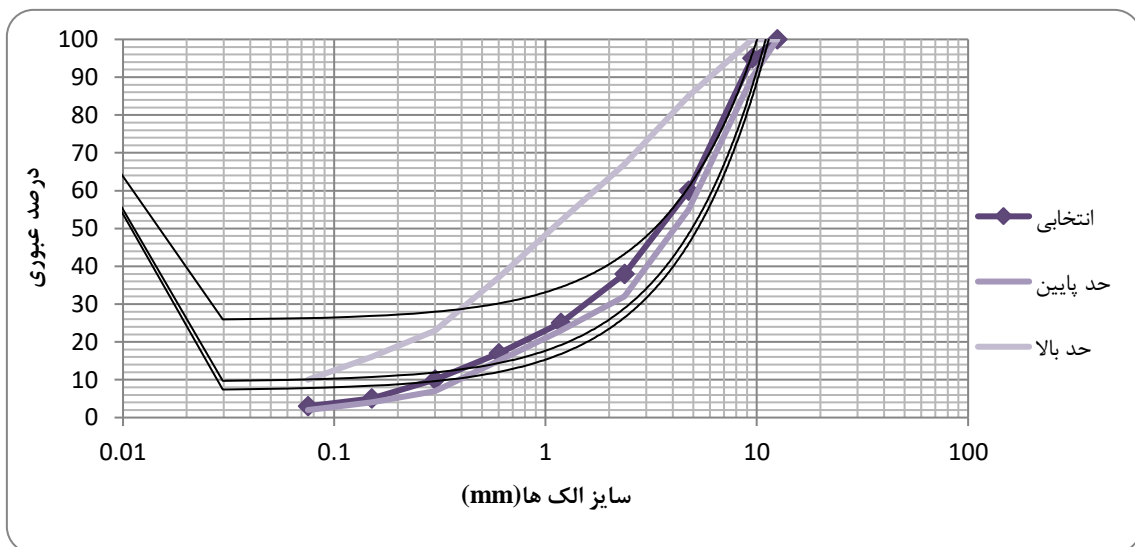
استفاده در این پژوهش از فولاد مبارکه اصفهان و تراشه آسفالتی در این پژوهش از گردنه گورخان واقع در محور آزادشهر-شاهرود جمع آوری شده است.

۴-۲-۲ دانه بندی مصالح سنگی طبیعی

دانه بندی مصالح سنگی از عوامل مهمی است که بر استقامت و ظرفیت باربری بتن آسفالتی تاثیر می گذارد. دانه بندی مناسب بر اساس عوامل زیادی از جمله نوع روسازی، نوع و محل قرارگیری لایه مورد نظر در سیستم روسازی، ضخامت لایه آسفالتی و اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه انتخاب می شود. حدود دانه بندی مطلوب، توسط آیین نامه های فنی کشور مشخص می شوند که اغلب به صورت دو منحنی حدی هستند. منحنی دانه بندی انتخابی، باید بین این دو منحنی حدی و حتی الامکان در وسط و به موازات آنها قرار گیرد. مصالح سنگی را می توان از نقطه نظر دانه بندی به سه دسته پیوسته، میان تهی و یک اندازه تقسیم بندی کرد. معمولاً در طرح اختلاط مخلوط آسفالتی لازم است دو یا چند نوع مصالح سنگی که هیچ کدام به تنهایی دارای دانه بندی مورد نظر نیستند با نسبت های مشخص با یکدیگر ترکیب شوند تا مخلوط بدست آمده دارای دانه بندی آیین نامه باشد. در آزمایشگاه می توان برای رسیدن به دانه بندی آیین نامه، ابتدا مصالح را با سایزهای مختلف الک کرده و مانده روی هر الک را جدا نموده و سپس طبق حدود آیین نامه به مقدار لازم از هر کدام الک ها برداشته و در نهایت هم آنها را با هم مخلوط می کنیم. دانه بندی مصالح براساس منحنی های دانه بندی شماره ۵ آیین نامه روسازی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) مخصوص دانه بندی لایه توپکا انتخاب شده است. شکل ۴-۱ و جدول ۴-۱ نمودار دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش، همچنین مقادیر مجاز در نشریه ۲۳۴ را نشان می دهند.

جدول ۱-۴. دانه بندی مصالح سنگی

اندازه ی الک	درصد عبوری آیین نامه	درصد عبوری انتخابی
۱۲.۵ میلی متر (۱/۲ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۹.۵ میلی متر (۳/۸ اینچ)	۹۰-۱۰۰	۹۵
۴.۷۵ میلی متر (شماره ۴)	۵۵-۸۵	۶۰
۲.۳۶ میلی متر (شماره ۸)	۳۲-۶۷	۳۸
۱.۱۸ میلی متر (شماره ۱۶)	-	۲۵
۰.۶ میلی متر (شماره ۳۰)	-	۱۷
۰.۳ میلی متر (شماره ۵۰)	۷-۲۳	۱۰
۰.۱۵ میلی متر (شماره ۱۰۰)	-	۵
۰.۰۷۵ میلی متر (شماره ۲۰۰)	۲-۱۰	۳
رد شده از ۲۰۰	-	۰



شکل ۱-۴. نمودار دانه بندی مورد استفاده در پژوهش

۳-۲-۴ مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج مربوط به آزمایش‌های تعیین ارزش ماسه‌ای، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس، شاخص تطویل و تورق، حدود اتزبرگ، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم، درصد

شکستگی در یک جبهه و دو جبهه و درصد اندود قیر به مصالح سنگی از معدن دریافت شده و نتایج آن در جدول ۲-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴. آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصه
ماسه ۰ - ۶ فیلتر (میلی متر)	مخلوط درشت دانه		
-	۹۳	-	AASHTO-T176 ارزش ماسه ای
-	-	B	نوع دانه بندی
-	-	۵۰۰	تعداد دور
-	-	۲۳	درصد سایش
N.P	N.P	-	PI دامنه خمیری
-	-	-	PL حد خمیری
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	LL حد روانی
-	-	-	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴
-	-	۸۸	در دو جبهه ASTM -5821
-	-	بیش از ۹۵	AASHTO-T182 درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۱	تطویق
-	-	۷	تورق
-	۰/۲۲	-	ریز دانه
-	-	۰/۶۱	درشت دانه AASHTO-T104

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

آزمایش‌ها برای تعیین وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مخلوط مصالح سنگی مانده الک شماره ۸، بر اساس استاندارد AASHTO-T85 و مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰، بر اساس استاندارد AASHTO-T84 انجام گرفت. وزن مخصوص مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ نیز بر اساس استاندارد AASHTO-T100 تعیین شد و نتایج آن در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص (gr/cm ³)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۱٪	۲/۷۶۰	۲/۸۴۵	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۵٪	۲/۷۴۰	۲/۸۵۷	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰
-	۲/۷۹۰		مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲/۷۵۶		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G _{sb})

۴-۲-۵ سرباره کوره آهن گدازی

سرباره مورد استفاده در این تحقیق از شرکت فولاد مبارکه اصفهان تهیه گردیده است و از نوع کوره قوس الکتریکی می‌باشد. جدول ۴-۴ نیز ترکیبات شیمیایی بدست آمده از آزمایش XRF برای سنگدانه طبیعی و سرباره‌ای را نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود میزان آهک آزاد (CaO) در سرباره فولاد ۰.۲ درصد است که این رقم خیلی کمتر از میزان این ترکیب در سرباره‌های تازه تولید شده است و می‌توان گفت که این سرباره به خوبی دوره عمل آوری را طی کرده است و خطر افزایش حجم ندارد.

جدول ۴-۴. ترکیبات شیمیایی سنگدانه سرپاره ای و آهکی

Others	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Free Cao	ترکیب شیمیایی سنگدانه
۳.۴	۴۰	۵	۱۶	۲۷	۵	۱	۲	۰.۲	سرپاره
۵.۳	۴۵	۶.۲	۹	۰.۴	۰.۲	۰.۰۳	۰.۱	-	آهکی

۴-۲-۶ تراشه آسفالتی

تراشه آسفالتی از کندن و شخم زدن روسازی‌های قدیمی حاصل می‌شود که دارای قیر پیرشده و سنگدانه است؛ که معمولاً این مواد را در محیط‌های باز دپو می‌کنند که می‌تواند برای محیط زیست مضر باشد، اما استفاده مجدد از آن‌ها از آنجا که هم به محیط زیست کمک می‌کند و هم در مصرف موادی مانند قیر و مصالح سنگی صرفه جویی می‌شود، سودمند است [۵]. تراشه آسفالتی استفاده شده در این پژوهش، از گردنه گورخان واقع در محور آزادشهر-شاهرود بدست آمده است و قیر موجود در این تراشه‌ها ۵ درصد است.

۴-۲-۷ پلیمر ضایعاتی

در این تحقیق پلیمر ضایعاتی از نوع پلی‌اتیلن سنگین گرید فیلم می‌باشد، که بیشتر شامل کیسه‌های پلاستیک خرید و سفره‌های یکبار مصرف است. این مواد از مرکز جمع‌آوری ضایعات در شاهرود تهیه شده است و توسط خردکن در همان مرکز، به ذرات کوچک (ابعاد کوچکتر از ۲ میلی‌متر) تبدیل شده‌اند. به گفته تولیدکنندگان این نوع پلی‌اتیلن، درصد کربنات کلسیم موجود در آن‌ها حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن آن‌ها می‌باشد. شکل ۴-۲ تصویری از نمونه این نوع پلیمر را قبل و بعد از فرآیند خرد شدن نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴. پلی اتیلن های ضایعاتی قبل و بعد از خرد شدن

۴-۲-۸ آزمایش های قیر

آزمایش های سنتی قیر، بر روی قیر مصرفی برای ساخت مخلوط آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش انجام شد و نتایج آن در جدول ۴-۵ نشان داده شده است. قیر مصرفی در این پژوهش قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ است. نتایج آزمایش های مختلفی بر روی قیر خالص در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۴-۵. آزمایش های مربوط به قیر خالص مصرفی

مشخصات استاندارد AASHTO-M20	نتایج		روش آزمایش		شرح آزمایش	
			AASHTO	ASTM		
حداکثر	حداقل					
-	-	۱/۰۱۵	T - 228	D - 70	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	۱
۷۰	۶۰	۶۵	T - 49	D - 5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	۲
۵۶	۴۹	۵۱/۷	T - 53	D - 36	نقطه نرمی (گلوله و حلقه) بر حسب درجه سانتی گراد	۳
-	۱۰۰	۱۰۰ <	T - 51	D - 113	مقدار کشش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بر حسب سانتی متر	۴
-	۹۹	۹۹/۳	T - 44	D - 2042	حلالیت در تترا کلرو اتیلن بر حسب درصد	۵
-	۲۳۲	۳۰۲	T - 48	D - 92	درجه اشتعال (روباز-کلوند) بر حسب درجه سانتی گراد	۶
-	-	۷۵۰	T - 201	D - 2170	ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در	۷

					دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد	
۸	ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد	D - 2170	T - 201	۳۵۴	-	-
۹	ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد	D - 2170	T - 201	۱۳۴	-	-
لعاب نازک قیر (دمای ۱۶۳ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت)						
۱۰	افت حرارتی بر حسب درصد	D - 1756	T - 179	۰/۰۲	-	۰/۸
۱۱	درجه نفوذ (بعد از افت حرارتی)			۴۱	-	-
۱۲	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه			۶۳/۱	۵۴	-
۱۳	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در ۲۵ درجه سانتی گراد			۵۰ <	۵۰	-
حساسیت حرارتی قیر						
۱۴	PI بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و نقطه نرمی			-۰/۱۴	-۲	+۲
۱۵	PVN بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ درجه سانتی گراد			-۰/۸۷	-	-

۴-۳ آزمایش های مورد بررسی

برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالتی، سرباره فولاد و پلی اتیلن بازیافتی با توجه به امکانات آزمایشگاه، آزمایش های ذکر شده در جدول ۴-۶ انجام گرفته است.

جدول ۴-۶. آزمایش های مورد بررسی در این پژوهش

نام آزمایش	روش آزمایش	نوع نمونه ها	هدف (های) آزمایش
مارشال	ASTM D1559	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲.۵ اینچ	تعیین درصد قیر بهینه
کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده	AASHTO T283	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ با درصد هوای ۷ درصد	بررسی حساسیت رطوبتی
کشش غیرمستقیم جهت تعیین مدول برجهنگی مخلوط های آسفالتی	ASTM: D4123-82	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و حداقل ۲ اینچ ارتفاع	تعیین مدول برجهنگی

بررسی مقاومت فشاری	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ۴ اینچ ارتفاع	AASHTO T167-05	مقاومت فشاری مخلوط های آسفالتی
بررسی رفتار شیارشدگی، تعیین سختی خزشی	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ	Tex-231-F	خزش استاتیکی
بررسی مقاومت در مقابل شیارشدگی، بررسی سختی	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲.۵ اینچ	ASTM D1559	شاخص مارشال

۱-۳-۴ آزمایش مارشال ASTM D1559

روش های گوناگونی برای تعیین طرح اختلاط بهینه مخلوط آسفالتی وجود دارد. هدف اصلی تمام روش ها تعیین مناسب ترین درصد اختلاط اجزا تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی است، به نحوی که آسفالت تهیه شده دارای دوام و مقاومت کافی در برابر بارهای وارده، تغییر شکل های دائمی و ترک خوردگی باشد.

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی گرم بکار رفته در این تحقیق بر اساس روش مارشال صورت گرفته است. روش مارشال یکی از روش های تعیین طرح اختلاط بهینه است، که نخستین بار توسط مهندس بروس مارشال^۱ ابداع شد. آزمایش مارشال بر روی نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی متر) و ارتفاع ۲.۵ اینچ (۶.۲۵ سانتی متر) انجام می شود. عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته شده با چکش ۱۰ پوندی (۴.۲ کیلوگرمی) و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی متری انجام می گیرد. تعداد ضربات نیز بسته به میزان ترافیک طرح مسیر مورد نظر، متفاوت است.

در این پژوهش نمونه ها حاوی سرباره فولاد و سنگدانه طبیعی برای تعیین درصد قیر بهینه طبق طرح اختلاط مارشال نمونه های بتن آسفالتی با شش درصد قیر مختلف (۴، ۴.۵، ۵، ۵.۵، ۶ و ۶.۵) و از هر درصد سه نمونه تهیه شدند. برای ساخت مخلوط ها، مصالح سنگی ۲۴ ساعت در دمای ۱۳۰

¹ Marshall Bruce

درجه سانتی‌گراد در گرمخانه حرارت دیدند، قیر مصرفی نیز بمدت یک ساعت قبل از ساخت تا دمای ۱۳۰ گرم شده و ساسوییت به مقدار ۱.۵ درصد وزنی قیر به روش خشک به آن اضافه شد. در مجموع در این پژوهش برای سه نمونه مخلوط با درصدهای سربار ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، آزمایش مارشال انجام شده است و درصد قیر بهینه نمونه‌ها با استفاده از ۷۵ ضربه تراکم تعیین گردید. مقدار قیر بهینه برای طرح اختلاط، بدین گونه تعیین شد که درصد قیر متناظر با ۴ درصد هوا را از لحاظ وزن مخصوص و روانی و مقاومت مارشال بررسی شد. اگر پارامترهای یاد شده در آن درصد قیر الزامات آیین‌نامه را برآورده کند؛ آن درصد، درصد قیر بهینه است. از سویی دیگر برای بدست آوردن درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی از رابطه ۱-۴ استفاده شد.

$$Pb_N = Pb_R - Pb_F \times TR \quad (4-1)$$

در رابطه بالا

Pb_N : درصد قیر تازه

Pb_R : درصد قیر بهینه

Pb_F : درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی

TR : درصد بازیافت $(100 \times \frac{\text{وزن تراشه آسفالتی}}{\text{وزن کل سنگدانه}})$

۲-۳-۴ آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده، AASHTO T283)

روش استاندارد AASHTO T283 (مقاومت مخلوط آسفالتی متراکم در برابر آسیب رطوبتی) یکی از رایج‌ترین روش‌های آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. این آزمون بر روی نمونه‌های متراکم شده با درصد هوای ۷ درصد انجام می‌گردد. برای رسیدن به این درصد هوا در

نمونه‌ها از روش آزمون و خطا نمونه‌ها را با ضربات مختلف ساخته و سپس درصد هوا آن‌ها را بدست می‌آوریم و در نهایت تعداد ضربه بهینه مشخص می‌گردد.

نمونه‌ها به ۲ دسته خشک و اشباع تقسیم می‌شوند. نمونه‌های اشباع ابتدا ۷۰ تا ۸۰ درصد تحت فشار خلا اشباع شده و بمدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- و بعد از آن بمدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۳-۴) و سپس ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. درحالی که نمونه‌های خشک تنها مدت دو ساعت را در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد سپری می‌کنند.



شکل ۳-۴. قرار دادن نمونه‌ها در آب ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت

در نهایت هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰.۸ میلی متر بر دقیقه) قرار می‌گیرند (شکل ۴-۴) و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه گیری می‌شود. بعد از به دست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم (S_t) محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۲-۴).

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (۴-۲)$$

در رابطه بالا:

S_t : مقاومت کششی (کیلوپاسکال)

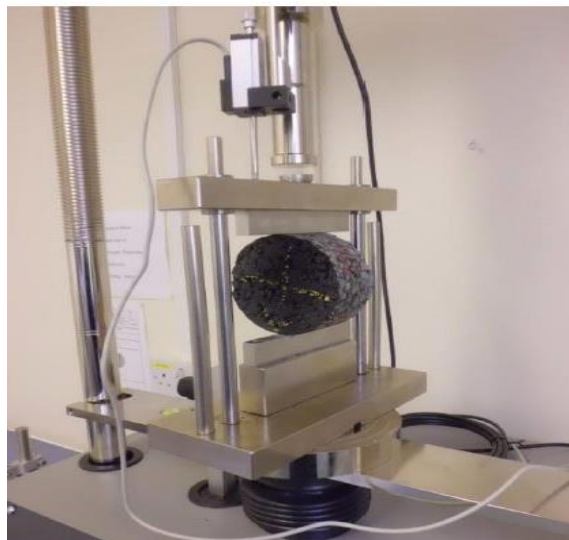
P : حداکثر بار (نیوتن)

t : ضخامت نمونه (میلیمتر)

D : قطر نمونه (میلیمتر)

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت با TSR بر حسب درصد نشان داده می‌شود (رابطه‌ی ۳-۴). در این رابطه مقدار S_t مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR باید ۷۵ درصد باشد و هر چه مقدار TSR بالاتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بالاتر در برابر رطوبت است.

$$\text{TSR} = \frac{\text{اشباع } S_t}{\text{خشک } S_t} \quad (۳-۴)$$



شکل ۴-۴. قرار دادن نمونه درون فک مخصوص و بارگذاری بر روی آن

۳-۳-۴ آزمایش مدول برجهندگی

این روش یک آزمایش غیرمخرب است، که براساس ASTM: D4123-82 بروی نمونه‌های استوانه‌ای با حداقل قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲ اینچ، به منظور ارزیابی کیفیت نسبی مصالح انجام می‌گیرد. در این آزمایش نمونه بین ۵۰ تا ۲۰۰ سیکل تحت بار مکرر نیم سینوسی (یا موج دیگری) با فرکانس‌های (۰.۳، ۰.۵ و ۱) و در دماهای (۵، ۲۵ و ۴۰)، تحت باری به اندازه‌ی ۱۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کششی

نمونه قرار می‌گیرد و تغییر شکل افقی نمونه تحت اثر بار توسط کرنش سنج‌ها ثبت می‌گردد و نمودار تغییر شکل هر نمونه در مقابل سیکل رسم می‌شود. بخشی از این تغییر شکل ماندگار و بخش دیگر آن برگشت پذیر است. به کمک رابطه‌ی ۴-۴ و تغییر شکل برگشت پذیر می‌توان مدول برجهندگی نمونه‌ها را تعیین کرد [۳۶].

$$M_r = \frac{P(v + 0.27)}{t \times \Delta H} \quad (4-4)$$

در رابطه‌ی بالا:

M_r : مدول برجهندگی کلی الاستیک (MPa) psi

ΔH : کل تغییر شکل برگشت پذیر نمونه در جهت افقی (میلیمتر)

v : ضریب پواسون (۰.۳۵)

t : طول نمونه (میلیمتر)

در این پژوهش مقدار فرکانس ۰.۵ هرتز با شکل موج سینوسی، مقدار بار ۱۲۰۰ نیوتن و تعداد ۱۵۰ تکرار بارگذاری انتخاب شده است.

۴-۳-۴ آزمایش خزش استاتیکی

این آزمایش مطابق با استاندارد Tex-231-F بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲ اینچ، به منظور بررسی رفتار شیارشدگی و سختی خزشی انجام می‌گیرد. این آزمایش در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با اعمال ۳ سیکل بارگذاری به اندازه‌ی ۵۵۶ نیوتن و موج مربعی با زمان یک دقیقه بارگذاری، یک دقیقه استراحت به عنوان پیش بارگذاری و برای بارگذاری اصلی همین میزان بار به طور ثابت بمدت یک ساعت بر روی نمونه اعمال می‌شوند و سپس باربرداری می‌شود و ریزسنج‌ها تمام جابه‌جایی‌های نمونه‌ها در طول پیش بارگذاری، بارگذاری و باربرداری را ثبت می‌کند. از تقسیم

¹ LVDT

بیشترین تغییر شکل به طول نمونه کرنش حاصل می‌شود (رابطه ۴-۵) و پس از رسم نمودار کرنش در مقابل زمان (شکل ۴-۵) مقدار کرنش نهایی قابل مشاهده است. که با آن می‌توان سختی خزشی را توسط رابطه‌ی ۴-۶ محاسبه کرد [۳۷]. در شکل ۴-۶ نمایی از انجام این آزمایش قابل مشاهده است.

$$\text{Strain} = \frac{\text{تغییر شکل}}{\text{طول نمونه}} \quad (4-5)$$

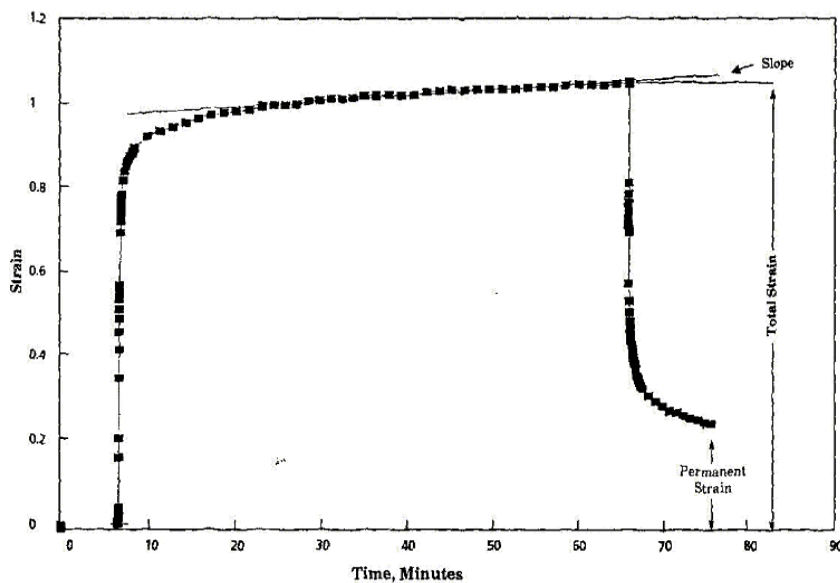
$$\text{Creep Stiffness KPa(} \psi\text{)} = \frac{69\text{KPa}(10\psi)}{\text{total strain}} \quad (4-6)$$

در رابطه بالا:

Strain : کرنش نمونه (میلی متر)

Creep Stiffness : سختی خزشی (psi)

total strain : کرنش نهایی (میلی متر/میلی متر)



شکل ۴-۵. نمودار کرنش در مقابل زمان در آزمایش خزشی استاتیکی



شکل ۶-۴. آزمایش خزش استاتیکی

۵-۳-۴ آزمایش نسبت شاخص مارشال

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D1559 به منظور اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای شکل مخلوط آسفالتی را در مقابل تغییر شکل پلاستیک به نحوی که سطح جانبی نمونه با دستگاه مارشال تحت بارگذاری قرار گرفته، انجام می‌شود. در این پژوهش به منظور ارزیابی تاثیر تراشه آسفالتی بر استقامت مارشال این آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و اعداد روانی و استقامت مارشال ثبت شد. از سویی دیگر نسبت مقاومت مارشال (کیلونیوتن) به عدد روانی (میلیمتر) نسبت شاخص مارشال را نشان می‌دهد. این نسبت یک شاخص برای سختی مخلوط‌های آسفالتی است و از آن می‌توان برای قضاوت در مورد مقاومت در برابر تنش برشی و مقاومت در برابر شیارشدگی، بهره برد. هرچه مقدار MQ بالاتر باشد می‌توان دریافت که آن مخلوط سختی بیشتری دارد و بار بیشتری تحمل می‌کند و مقاومت بیشتری در مقابل شیارشدگی دارد [۳۸].

۶-۳-۴ آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T167-05 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌گیرد. دمای آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد و قطر نمونه ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن نیز ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. سرعت بارگذاری ثابت و مقدار آن ۰.۰۵ میلیمتر/دقیقه به ازای هر میلیمتر از ارتفاع نمونه است. این

آزمایش می‌تواند معیاری برای مقاومت لایه رویه در شرایط بارگذاری باشد، که می‌توان از آن برای برای طراحی سازه راه‌ها بهره برد.

مقاومت فشاری با رابطه ی ۴-۷ محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$(۴-۷) \quad \text{حداکثر نیرو عمودی} = \frac{N}{\text{مساحت سطح نمونه}} \left(\frac{N}{\text{cm}^2} \right) = \text{مقاومت فشاری}$$

۴-۴ ساخت نمونه ها

نمونه‌ها به دو دسته کلی حاوی پلی‌اتیلین ضایعاتی و بدون پلی‌اتیلین ضایعاتی تقسیم می‌شوند. از آنجا که نمونه‌های تمام آزمایش‌های در این پژوهش، استوانه‌ای است؛ روش ساخت آن‌ها بشرح زیر بیان می‌شود. با ذکر این توضیح که روند ساخت در تمام آزمایش‌ها تقریباً مشابه بوده و تفاوت‌های اندک این فرآیند را، تنها در شرح آن (نه در ساخت) نادیده می‌گیریم.

۴-۴-۱ نمونه های بدون پلیمر ضایعاتی

در ابتدای کار سنگدانه‌های آهکی، سرباره‌ها و تراشه آسفالتی طبق نمودار دانه‌بندی در جدول ۴-۱ برای هر نمونه توزین شده است. نمونه‌ها با توجه نام‌گذاری در جدول ۴-۷ درصد‌های مشخصی از سرباره و تراشه دارند. هرکدام از این نمونه‌ها در ظرف جداگانه‌ای در گرمخانه، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده‌اند. لازم به ذکر است از آنجا که تراشه آسفالتی حاوی مقداری قیر پیرشده است؛ به منظور جلوگیری از پیرشدگی بیشتر، تنها دو ساعت در گرمخانه در همان دما قرار می‌گیرند، همچنین برای هر نمونه مقدار لازم قیر بمدت یک ساعت قبل از ساختن نمونه، در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است.

پس از آنکه قیر به دمای مطلوب رسید، سنگدانه‌ها با مقدار مشخص ساسوبیت (۱.۵ درصد وزن قیر) مخلوط شده (درصد ترکیب حجمی سنگدانه‌ها و وزن ساسوبیت در جدول ۴-۷ آورده شده است) و سپس قیر (با وزن مشخص) و تراشه آسفالتی به سنگدانه‌ها و سرباره‌ها اضافه شده است. این ترکیب در همزن به مدت حدود ۱-۳ دقیقه بطور کامل مخلوط شده، در واقع فرآیند مخلوط کردن تا آنجا ادامه می‌یابد که سطح تمام سنگدانه‌ها با قیر به طور یکنواخت پوشش داده شود.

بعد از مخلوط شدن کامل نمونه، تمام محتویات درون ظرف همزن، به داخل قالب مارشال ریخته شده و سپس به تعداد مشخص ضرباتی با چکش مارشال به دو طرف نمونه وارد می‌شود. لازم به توضیح است که از قبل، قالب‌ها گرم شده و روغن زده شده‌اند. در نهایت نمونه‌ها بعد از سفت شدن و سرد شدن نمونه توسط جک نمونه درآر، از داخل قالب بیرون آورده می‌شوند و برای انجام آزمایش مورد نظر آماده می‌گردند.

۲-۴-۴ نمونه های حاوی پلیمر ضایعاتی

تفاوت عمده در نحوه ساخت این دسته نمونه‌ها با نمونه‌های بدون پلیمر ضایعاتی در دمای اولیه‌ای است که به سنگدانه‌ها داده می‌شود، در واقع این دما به منظور ذوب کردن پلیمر صورت می‌گیرد، طبق تحقیقات سایر محققین، دمای اولیه که سنگدانه‌ها در آن قرار می‌گیرند، ۱۷۰ درجه سانتی-گراد [۴۰] انتخاب شد. در مورد تراشه آسفالتی و قیر همان دمای ۱۳۰ درجه سانتی-گراد استفاده می‌شود. سنگدانه‌ها ابتدا با مقدار لازم (۱۰ درصد وزن قیر) پلیمر ضایعاتی (پلی اتیلن سنگین) مخلوط می‌شوند (اطلاعات این نوع نمونه‌ها در جدول ۴-۷ و ۴-۸ آورده شده است)، بعد از آن ساسوبیت افزوده می‌شود و سپس قیر و تراشه آسفالتی اضافه می‌شوند و همه‌ی آن‌ها با یکدیگر تا رسیدن به مخلوطی یکدست و پوشیده شدن کامل سنگدانه‌ها با قیر ادامه می‌یابد. در نهایت نمونه‌ها درون قالب

ریخته شده و با تعداد ضربه مشخص متراکم می‌گردند. در شکل ۴-۷ برخی از نمونه‌های ساخته شده توسط فرآیند مذکور قابل مشاهده است.



شکل ۴-۷. نمای برخی از نمونه‌های ساخته شده

جدول ۴-۷. درصد حجمی ترکیب سنگدانه‌ها و افزودنی‌ها در نمونه‌های بدون پلی‌اتیلن ضایعاتی

نام مخلوط	درشت دانه (%)	ریزدانه (%)	تراشه‌آسفالتی	سربره	افزودنی آلی	افزودنی پلیمری
C	۴۰	۶۰	-	-	۱.۰۱	-
R۳۵	۴۰	۲۵	۳۵	-	۱.۰۱	-
R۵۵	۴۰	۵	۵۵	-	۱.۰۱	-
S۲۰	۲۰	۶۰	-	۲۰	۱.۰۵	-
S۴۰	-	۶۰	-	۴۰	۱.۱۱	-
S۲۰.R۳۵	۲۰	۲۵	۳۵	۲۰	۱.۰۵	-
S۲۰.R۵۵	۲۰	۵	۵۵	۲۰	۱.۰۵	-
S۴۰.R۳۵	-	۲۵	۳۵	۴۰	۱.۱۱	-
S۴۰.R۵۵	-	۵	۵۵	۴۰	۱.۱۱	-

جدول ۸-۴. درصد حجمی ترکیب سنگدانه ها و افزودنی های حاوی پلی اتیلن ضایعاتی

نام مخلوط ^۱	درشت دانه (%)	ریزدانه (%)	تراشه آسفالتی	سرباره	افزودنی آلی	افزودنی پلیمری
C+	۴۰	۶۰	-	-	۱.۰۱	۶.۷۲
R۳۵+	۴۰	۲۵	۳۵	-	۱.۰۱	۶.۷۲
R۵۵+	۴۰	۵	۵۵	-	۱.۰۱	۶.۷۲
S۲۰+	۲۰	۶۰	-	۲۰	۱.۰۵	۶.۹۸
S۴۰+	-	۶۰	-	۴۰	۱.۱۱	۷.۳۹
S۲۰R۳۵+	۲۰	۲۵	۳۵	۲۰	۱.۰۵	۶.۹۸
S۲۰R۵۵+	۲۰	۵	۵۵	۲۰	۱.۰۵	۶.۹۸
S۴۰R۳۵+	-	۲۵	۳۵	۴۰	۱.۱۱	۷.۳۹
S۴۰R۵۵+	-	۵	۵۵	۴۰	۱.۱۱	۷.۳۹

۴-۵ دستگاه بارگذاری

برای انجام آزمایش، از یک دستگاه بارگذاری یونیورسال^۲، ساخت شرکت Zwick/Roell آلمان، با حداکثر ظرفیت ۱۵ تن استفاده شد (شکل ۸-۴). به منظور جمع‌آوری داده‌های بدست آمده از دستگاه، از رایانه متصل به دستگاه استفاده شد. نیرو و تغییرمکان نمونه‌ها در حین آزمایش توسط نیروسنج (Load Cell) و تغییرمکان توسط کرنش‌سنج (LVDT) نصب شده بر روی دستگاه بارگذاری تعیین شد.

^۱ در این پژوهش برای نشان دادن وجود پلیمر ضایعاتی در نمونه‌ها، از علامت "+" استفاده می‌گردد.

^۲ Universal testing machine



شکل ۸-۴. دستگاه بارگذاری

فصل ۵ : نتایج فعالیت های

آزمایشگاهی

۱-۵ مقدمه

در این فصل، نتایج کارهای آزمایشگاهی انجام شده بطور کامل ذکر شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش آزمایش‌های زیر انجام شده است:

- ۱-آزمایش مارشال به منظور یافتن درصد قیر بهینه برای نمونه‌ها با مواد متفاوت
- ۲-آزمایش لاتمن اصلاح شده مطابق با استاندارد T283 به منظور بررسی حساسیت رطوبتی
- ۳-آزمایش مدول برجهنگی مطابق با ASTM D4123-82
- ۴-آزمایش استقامت مارشال و شاخص مارشال
- ۵-آزمایش مقاومت فشاری
- ۶-آزمایش خزش استاتیکی برای بررسی خاصیت شیارشدگی.

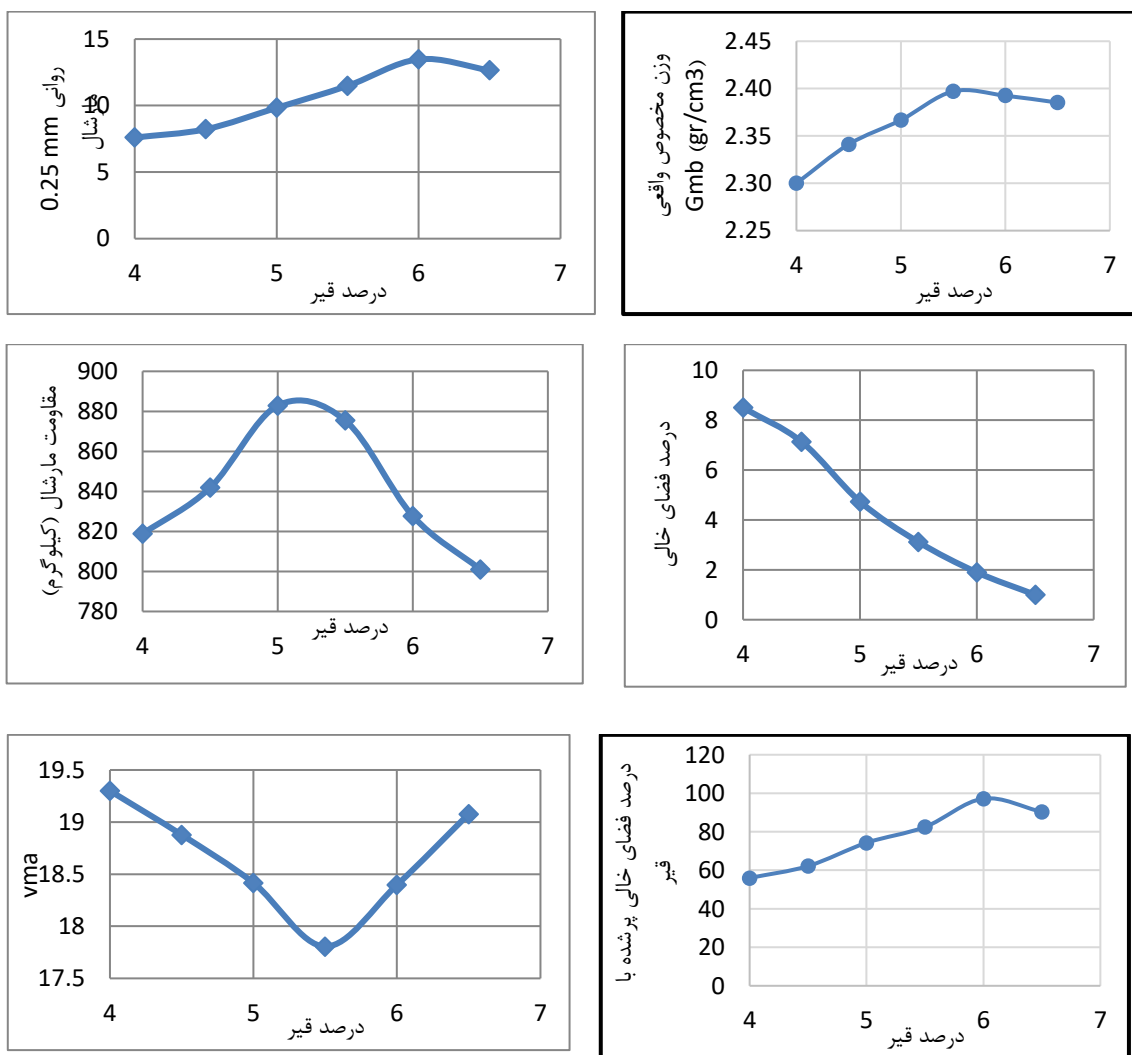
نمونه‌های ارزیابی شده در این پژوهش شامل نمونه‌های استوانه‌ای با درصد‌های ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره فولاد ۰، ۳۵ و ۵۵ درصد تراشه آسفالتی، همچنین ۰ و ۱۰ درصد پلیمر ضایعاتی می‌باشند. در مجموع ۲۱۶ نمونه در این پژوهش ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در ادامه این فصل نتایج هر یک از آزمایش‌ها به تفسیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵ نتایج آزمایش مارشال

به منظور دستیابی به درصد قیر بهینه برای نمونه کنترل (C) و نمونه حاوی ۴۰ درصد سرباره درشت‌دانه (S40) و ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه (S20) تعداد ۵۴ نمونه استوانه‌ای با درصد‌های مختلف قیر (۴ تا ۶.۵ درصد) ساخته شده است. در ابتدا اندازه‌گیری‌های نمونه‌ها (ارتفاع، قطر، وزن در هوا، وزن در آب و وزن سطح خشک) انجام می‌شود و به محاسبه پارامترهایی مانند G_{sb} پرداخته می‌شود و بعد از اندازه‌گیری مقاومت مارشال (توسط جک مارشال)، درصد هوای نمونه‌ها تعیین می‌گردد. نمونه‌ای که درصد هوای آن ۴ درصد باشد را مورد ارزیابی قرار داده تا مشخص شود که آیا

حدود آیین‌نامه را رعایت می‌کند یا خیر. در صورتی که حدود آیین‌نامه برآورده شود درصد قیر بهینه همان درصدی است که باعث ایجاد درصد هوای ۴٪ می‌شود. خلاصه داده‌های آزمایش مارشال مربوط به نمونه شاهد در شکل ۱-۵ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در این تحقیق نمونه‌های شاهد (که در آن‌ها نه تراشه آسفالتی و نه سرپاره وجود دارد)، بصورت جدا و نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرپاره نیز بصورت جداگانه به منظور تعیین درصد قیر بهینه مورد آزمایش قرار گرفتند و مابقی نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۱-۴ (که در فصل قبل مطرح شد) درصد قیر بهینه آن‌ها محاسبه می‌شود. نتایج این آزمایش و درصد‌های بهینه هر نوع از نمونه‌ها در جدول ۱-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱-۵. داده‌های مربوط به آزمایش مارشال نمونه شاهد

جدول ۱-۵. درصد‌های قیر بهینه برای نمونه های متفاوت

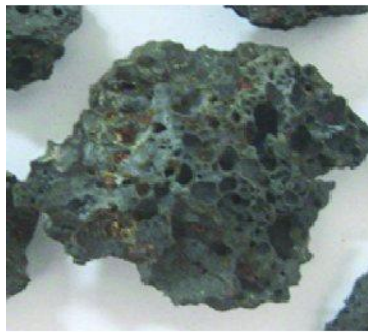
نام نمونه	درصد قیر تازه	درصد قیر تراشه
C	۵.۳۰	-
'C+	۵.۳۰	-
R35	۳.۵۵	۱.۷۵
R35+	۳.۵۵	۱.۷۵
R55	۲.۵۵	۲.۷۵
R55+	۲.۵۵	۲.۷۵
S20	۵.۵۰	-
S20+	۵.۵۰	-
S40	۵.۸۰	-
S40+	۵.۸۰	-
S20R35	۳.۷۵	۱.۷۵
S20R35+	۳.۷۵	۱.۷۵
S20R55	۲.۷۵	۲.۷۵
S20R55+	۲.۷۵	۲.۷۵
S40R35	۴.۰۵	۱.۷۵
S40R35+	۴.۰۵	۱.۷۵
S40R55	۳.۰۵	۲.۷۵
S40R55+	۳.۰۵	۲.۷۵

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان فهمید که افزودن تراشه آسفالتی باعث کاهش مصرف قیر تازه می‌گردد. به عنوان مثال افزودن ۳۵ درصد تراشه آسفالتی در نمونه R۳۵ به میزان ۳۳ درصد کاهش

^۱ در این پایان نامه علامت "+" به نمونه هایی اشاره دارد که حاوی پلیمر ضایعاتی هستند.

مصرف قیر تازه را به همراه داشته است. این میزان برای نمونه R55 بیشتر از 50 درصد است. از آنجا که در تولید آسفالت قیمت قیر بیش از سایر اجزای مخلوط آسفالتی است؛ این مقدار صرفه جویی در مصرف قیر که به علت وجود قیر در تراشه‌های آسفالتی است، می‌تواند هزینه‌های تولید آسفالت را به طرز چشم‌گیری کاهش دهد.

همچنین طبق نتایج آورده شده در جدول 1-5 مشاهده می‌شود که جایگزینی سرباره با سنگدانه طبیعی باعث می‌شود درصد قیر مصرفی بالا برود، دلیل این امر وجود سطح متخلخل‌تر از سنگدانه طبیعی می‌باشد (شکل 2-5) (این حفرات در فرآیند پیدایش سرباره به وجود می‌آیند).



شکل 2-5. سطح متخلخل سرباره آهن گدازی

نمونه‌هایی که ترکیبی از سرباره و تراشه را در خود دارند، درصد قیر تازه مصرفی آن‌ها کماکان کمتر از نمونه شاهد است و دلیل این امر همان وجود قیر در تراشه آسفالتی است. ضمناً از آنجا که در این پژوهش درصد قیر بهینه نمونه‌های پلیمری و غیرپلیمری یکسان در نظر گرفته شده است، تاثیر پلیمرها بر درصد قیر بهینه مورد بحث این تحقیق نیست.

3-5 نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی، نمونه‌های مختلف با 7 درصد هوا ساخته شده‌اند و شرایط ذوب و یخبندان آن مطابق با روش توصیه شده در آشتو T283 بر روی نمونه‌ها اعمال شد و بعد از آن توسط فک مخصوص آزمایش کشش غیرمستقیم، مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند. بعد از محاسبه مقاومت

کششی و همچنین محاسبه نسبت مقاومت کششی نتایج آن در جدول ۲-۵ آورده شده است. در این جدول مقاومت کششی در حالت اشباع به مقاومت نمونه‌هایی که شرایط ذوب و یخبندان را تجربه کرده‌اند، اشاره دارد. همچنین مقاومت نمونه‌هایی که این شرایط را نداشته‌اند با عنوان "مقاومت در حالت خشک" نام برده شده است.

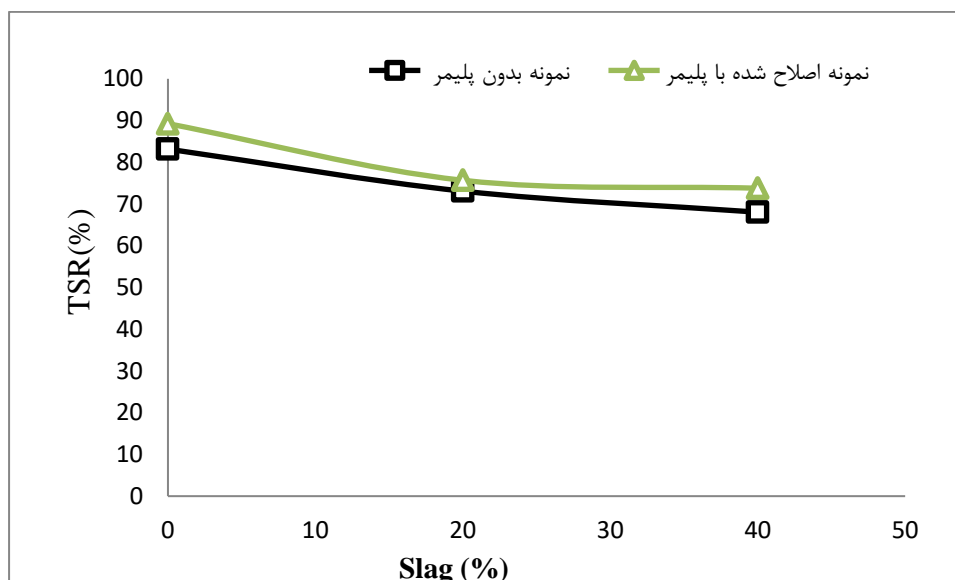
در جدول ۲-۵ واضح است که افزودن پلیمر ضایعاتی باعث بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. در نمونه شاهد (C) پارامتر TSR عدد ۸۳ است؛ در حالی که افزودن پلیمر ضایعاتی به آن باعث افزایش این مقدار به ۸۹ درصد می‌گردد. این تاثیر در سایر نمونه‌ها نیز قابل مشاهده است، به عنوان مثال TSR در نمونه S20 از مقدار ۷۳ به مقدار ۷۶ درصد افزایش می‌یابد. از آنجا که کربنات کلسیم می‌تواند باعث بهبود حساسیت رطوبتی شود [۱۵]، می‌توان افزایش و بهبود حساسیت رطوبتی تحت تاثیر افزودن پلیمر ضایعاتی را به حضور کربنات کلسیم در پلیمرهای ضایعاتی مرتبط دانست.

جدول ۲-۵. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

نام نمونه	مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع (کیلوپاسکال)	مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک (کیلوپاسکال)	TSR نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به خشک
C	۴۱۰	۴۹۳	۸۳
C+	۵۲۴	۵۸۷	۸۹
R35	۶۷۹	۷۸۹	۸۶
R35+	۵۷۳	۶۳۰	۹۱
R55	۸۷۲	۹۵۹	۹۱
R55+	۸۲۲	۸۵۰	۹۷
S20	۴۴۸	۶۱۳	۷۳
S20+	۴۲۰	۵۵۵	۷۶

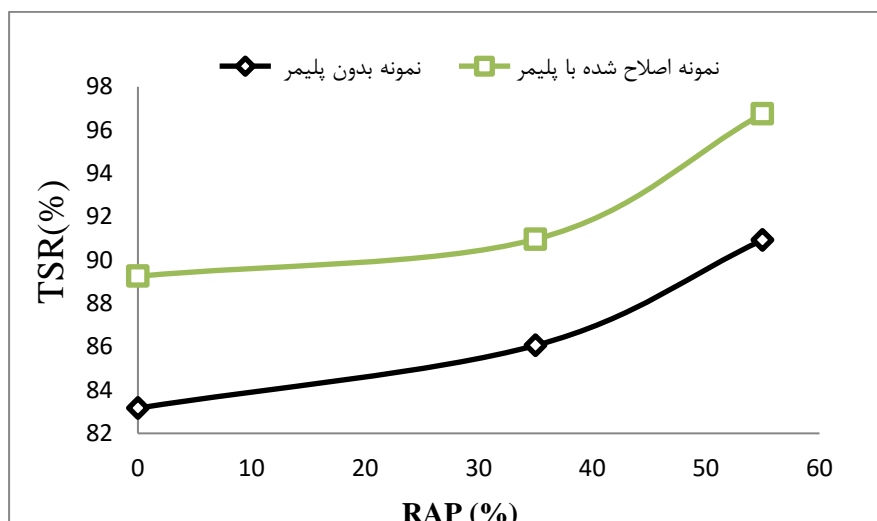
۶۸	۶۰۴	۴۱۱	S40
۷۴	۵۳۰	۳۹۱	S40+
۷۵	۷۲۹	۵۴۹	S20R35
۸۱	۸۰۰	۶۵۰	S20R35+
۸۰	۹۸۷	۷۸۷	S20R55
۸۶	۱۳۸۹	۱۲۰۰	S20R55+
۶۹	۶۸۳	۴۶۳	S40R35
۷۵	۹۱۱	۶۸۲	S40R35+
۷۶	۱۰۴۸	۷۹۴	S40R55
۸۰	۱۴۸۰	۱۱۸۲	S40R55+

به منظور درک بهتر تاثیر سرباره و تراشه آسفالتی، نمودارهایی ترسیم شده است. در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سرباره در نمونه‌ها مقدار پارامتر TSR کاهش می‌یابد، این بیانگر آن است که سرباره، حساسیت رطوبتی را بیشتر می‌کند. دلیل این امر را می‌توان به ترکیب شیمیایی سرباره (رجوع شود به جدول ۴-۴) مربوط دانست، سنگدانه‌های سرباره نسبت به سنگدانه‌های آهکی خاصیت بازی کمتری دارند. یعنی نسبت عناصر بازی مانند CaO و MgO به عناصر اسیدی مانند Al_2O_3 , SiO_2 در سنگدانه طبیعی بیشتر از سرباره است و از آنجا که قیر که خاصیت اسیدی دارد پیوند بهتری با سنگدانه با خاصیت بازی، برقرار می‌کند. در نتیجه نمونه‌های حاوی سرباره در برابر خرابی رطوبتی، عملکرد ضعیف‌تری دارد.



شکل ۳-۵. نمودار تاثیر سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR)

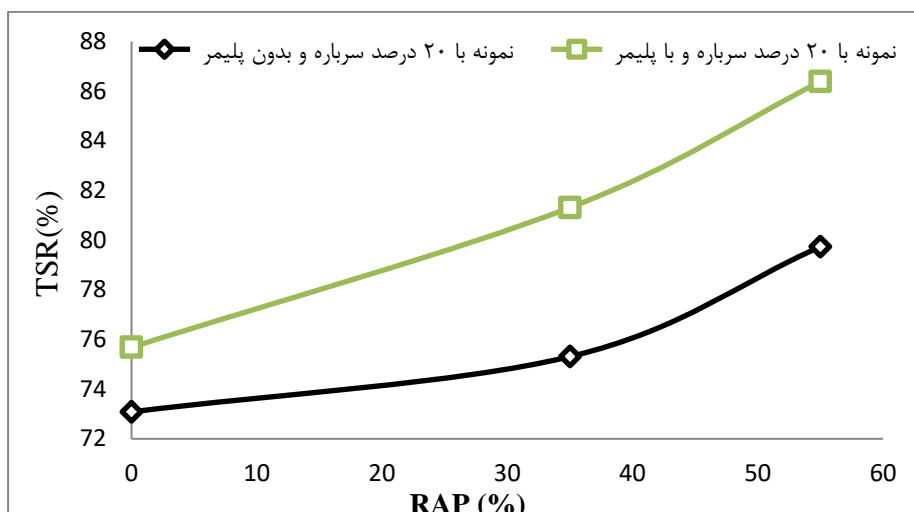
در نمودار دیگری از این آزمایش که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، تاثیر تراشه آسفالتی بر حساسیت رطوبتی قابل مشاهده است. طبق داده‌های ثبت شده افزایش درصد تراشه آسفالتی در نمونه‌ها باعث بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. بطوریکه در نمونه R۳۵ نسبت TSR به مقدار ۳.۶ درصد و در نمونه R۵۵ به مقدار ۹.۶ درصد بهبود داده است. بهبود TSR در نمونه‌های حاوی RAP را شاید بتوان به وجود یک لایه قیر پیرشده بر روی مصالح سنگی تراشه‌های آسفالت ربط داد که در مخلوط آسفالتی با یک لایه قیر تازه جدید هم پوشش داده خواهد شد و از نفوذ آب و قرارگیری رطوبت بین سنگدانه و قیر جلوگیری می‌کند [۴۱].



شکل ۴-۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)

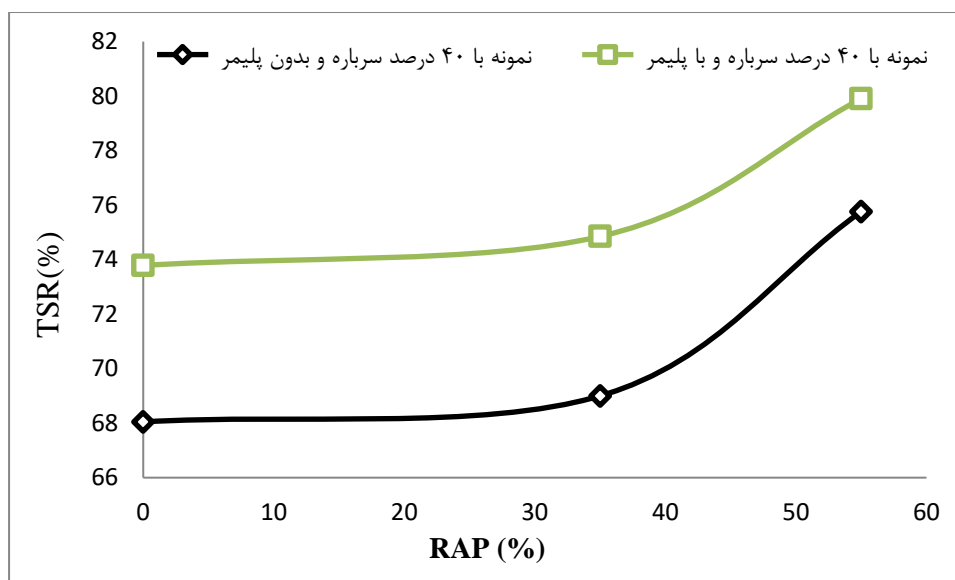
هنگامی که سرپاره و تراشه آسفالتی همزمان به نمونه افزوده می‌شود، از یک طرف تراشه آسفالتی باعث بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می‌شود و از طرف دیگر سرپاره باعث کاهش این مقاومت خواهد شد.

همانطور که انتظار داشتیم، در شکل ۵-۵ مشاهده می‌شود که نمونه‌هایی که حاوی ۲۰ درصد سرپاره هستند، با افزایش درصد تراشه آسفالتی حساسیت رطوبتی آن‌ها بهبود می‌یابد. به عنوان مثال در نمونه S20R55 نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم به میزان ۱۱ درصد نسبت به نمونه S20 افزایش یافته است که در واقع این نشان از عملکرد مثبت تراشه آسفالتی دارد.



شکل ۵-۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR)

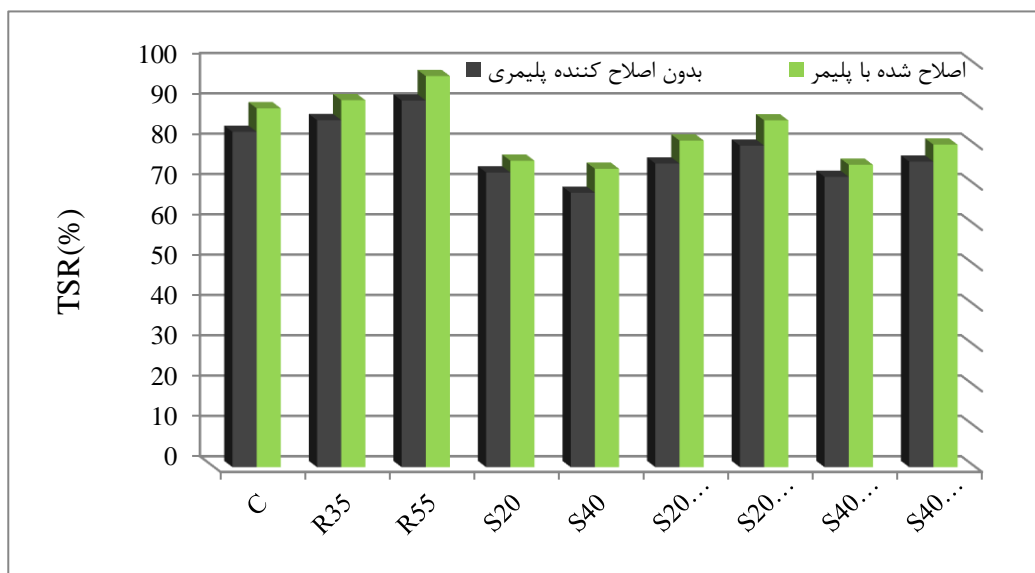
همچنین در شکل ۵-۶ که نمونه‌های ۴۰ درصد سرباره و تراشه آسفالتی نتایج مشابهی بدست آمده است. لازم به ذکر است که در تمام نمونه‌ها، افزودن پلیمر باعث بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. پلیمر می‌تواند چسبندگی قیر را افزایش دهد [۴۰] و علاوه بر آن کربنات کلسیم موجود در پلیمر باعث می‌شود که در پیوند قیر-سنگدانه، آب جایگزین قیر نشود.



شکل ۵-۶. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر نسبت مقاومت کششی (TSR)

در شکل ۵-۷ نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی (TSR) برای تمام نمونه‌ها، آورده شده است. در این نمودار علاوه بر نتایج فوق‌الذکر، مشخص است که کمترین حساسیت مربوط به نمونه حاوی ۵۵

درصد تراشه آسفالتی و اصلاح شده با پلیمر ضایعاتی است (R55+). نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در این نمونه ۹۷ درصد می‌باشد. در مقابل نمونه حاوی ۴۰ درصد سرباره و بدون پلیمر ضایعاتی (S40) کمترین مقدار نسبت مقاومت کششی (TSR=68) را دارد و این نشان می‌دهد که با افزایش درصد استفاده از سرباره حساسیت رطوبتی بیشتر می‌شود. در نمونه‌هایی که ترکیبی از سرباره و تراشه را در خود دارند، تراشه تاثیر منفی سرباره را کاهش می‌دهد اما کامل نتوانسته است اثر منفی آن را خنثی کند و به مقدار نسبت مقاومت کششی در نمونه شاهد برسد. البته باید به این نکته اشاره نمود که در نمونه‌هایی که حاوی تراشه آسفالتی، سرباره و پلیمر می‌باشند حداقل معیار آیین‌نامه در مورد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کسب شده است.



شکل ۷-۵. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR)

۵-۴ نتایج آزمایش استقامت مارشال و شاخص مارشال

به منظور بررسی اثر هر یک از افزودنی‌ها (تراشه آسفالتی، سرباره و پلیمر ضایعاتی) بر مقاومت مارشال، نمونه‌های استوانه‌ای با درصدهای مختلف سرباره، تراشه آسفالتی و پلیمر ضایعاتی ساخته شد و در نهایت توسط آزمایش مارشال مورد ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش حداکثر نیروی قابل تحمل

برای نمونه تا زمان گسیختگی (استقامت مارشال) و کرنش تا زمان رسیدن به این نیرو (روانی) ثبت می‌گردد. نتایج این آزمایش در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

علاوه بر اینکه استقامت مارشال، خود پارامتری برای بررسی مقاومت نمونه‌ها است؛ از تقسیم استقامت مارشال بر کرنش، پارامتر شاخص مارشال (MQ^1) بدست می‌آید، که از آن می‌توان برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی نیز بهره برد.

جدول ۳-۵. نتایج آزمایش استقامت مارشال

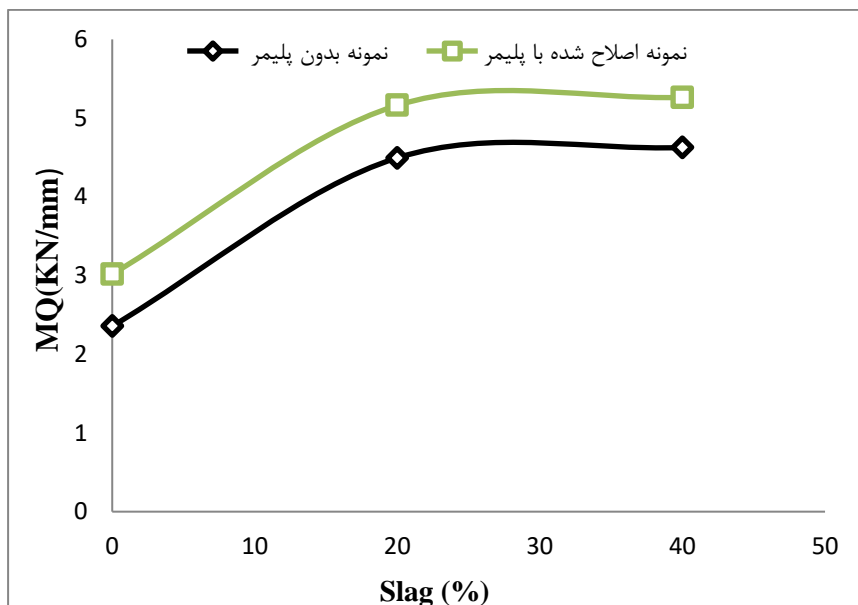
MQ	استقامت مارشال (کیلو نیوتن)	روانی (میلی متر)	نام نمونه
۲.۳۶	۸.۲۹	۳.۵	C
۳.۰۲	۹.۸۳	۳.۳	C+
۲.۹۷	۹.۶۴	۳.۳	R35
۴.۶۳	۱۲.۸۵	۲.۸	R35+
۴.۶۹	۱۶.۰۱	۳.۴	R55
۵.۷۵	۱۸.۵۶	۳.۲	R55+
۴.۵۰	۱۱.۲۴	۲.۵	S20
۵.۱۶	۱۴.۶۳	۲.۸	S20+
۴.۶۳	۱۳.۸۴	۳.۰	S40
۵.۲۶	۱۴.۶۵	۲.۸	S40+
۵.۳۱	۱۵.۹۲	۳.۰	S20R35
۵.۸۲	۱۸.۹۲	۳.۳	S20R35+
۶.۶۲	۱۸.۱۰	۲.۷	S20R55
۶.۹۷	۲۱.۱۳	۳.۰	S20R55+

¹ Marshal quotient

۵.۴۴	۱۶.۷۲	۳.۱	S40R35
۵.۹۸	۱۹.۹۵	۳.۳	S40R35+
۶.۸۸	۲۲.۳۸	۳.۳	S40R55
۷.۸۳	۲۱.۹۲	۲.۸	S40R55+

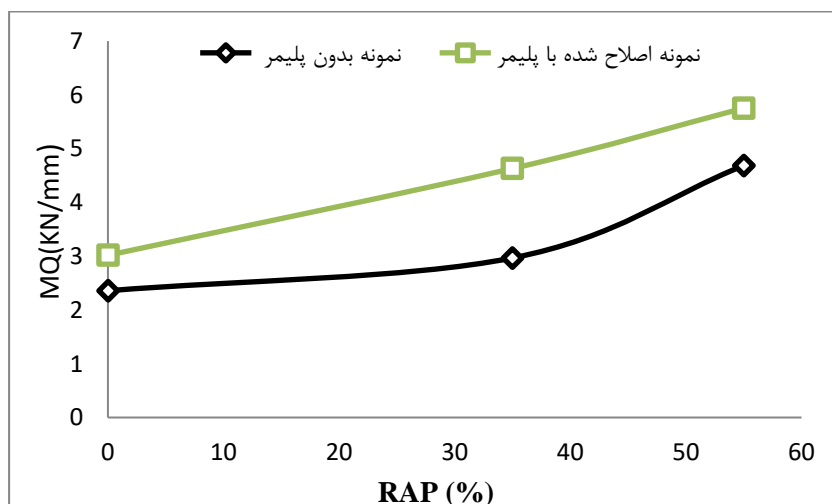
با توجه به جدول ۳-۵ یک نتیجه کلی بدست می‌آید که حضور پلیمر ضایعاتی باعث بهبود شاخص مارشال (MQ) شده است. همچنین در اکثر موارد باعث افزایش استقامت مارشال شده است. این افزایش مقاومت را می‌توان به سخت‌تر شدن قیر در اثر ترکیب با پلیمر ضایعاتی نسبت داد. افزایش شاخص مارشال بیانگر مقاومت بیشتر در مقابل خرابی شیارشدگی است. هرچند در خصوص عدد روانی اظهار نظر قاطعی نمی‌توان کرد، به طوری که در برخی نمونه‌ها افزوده شدن پلیمر ضایعاتی باعث افزایش عدد روانی و در برخی دیگر باعث کاهش این پارامتر شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر تراشه آسفالتی و سرباره فولاد بر نمونه‌ها نمودارهای ۸-۵ الی ۱۲-۵ ترسیم شده است. در شکل ۸-۵ تاثیر افزایش سرباره بر شاخص مارشال نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸-۵ مشاهده می‌شود افزایش درصد سرباره باعث افزایش شاخص مارشال می‌شود. دلیل این افزایش را می‌توان افزایش قفل و بست سنگدانه‌ها در نمونه به دلیل زبری سطح سرباره عنوان نمود.



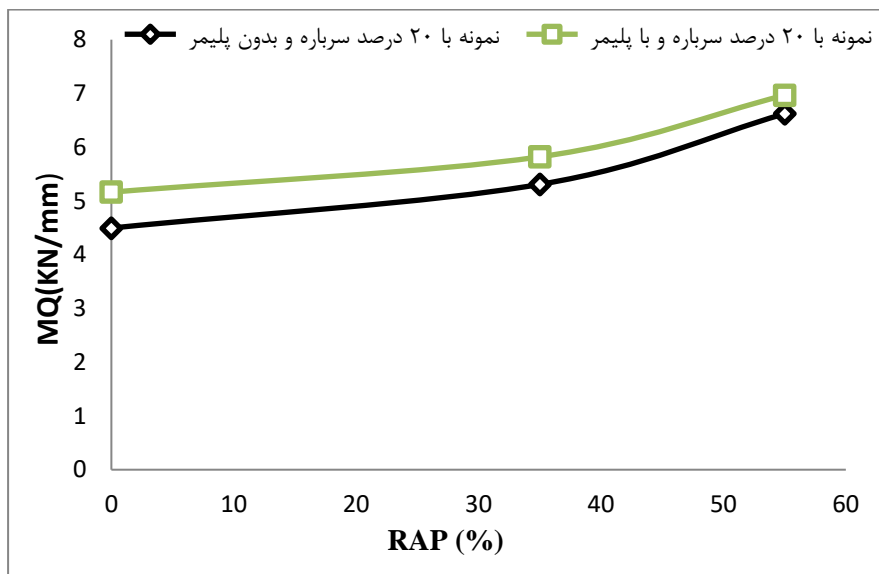
شکل ۸-۵. نمودار تاثیر سرباره بر شاخص مارشال

در شکل ۹-۵ تاثیر تراشه آسفالتی بر شاخص مارشال نشان داده شده است. با افزایش درصد تراشه آسفالتی در مخلوط، میزان قیر پیرشده در نمونه‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش مقاومت مارشال و همچنین کاهش عدد روانی و در نتیجه افزایش شاخص مارشال می‌شود. این افزایش در مقدار شاخص مارشال بیانگر آن است که با افزودن تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی می‌توان مقاومت آن را درمقابل خرابی شیارشدگی بالابرد.

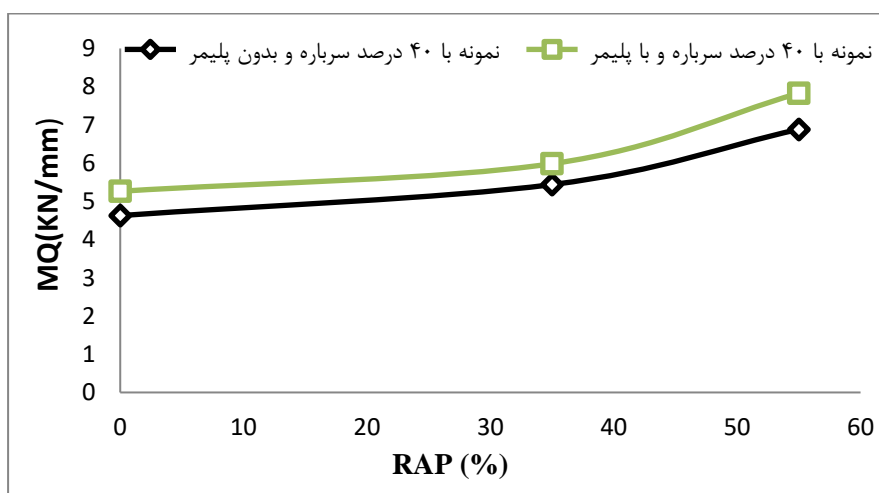


شکل ۹-۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر شاخص مارشال

در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ تاثیر همزمان سرباره و تراشه آسفالتی بر نمونه‌های آسفالتی آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد تراشه و سرباره و استفاده از پلیمر ضایعاتی مقدار شاخص مارشال افزایش یافته است. به بیان دیگر سرباره و تراشه آسفالتی کنار یکدیگر عملکرد بسیار مناسبی دارند.

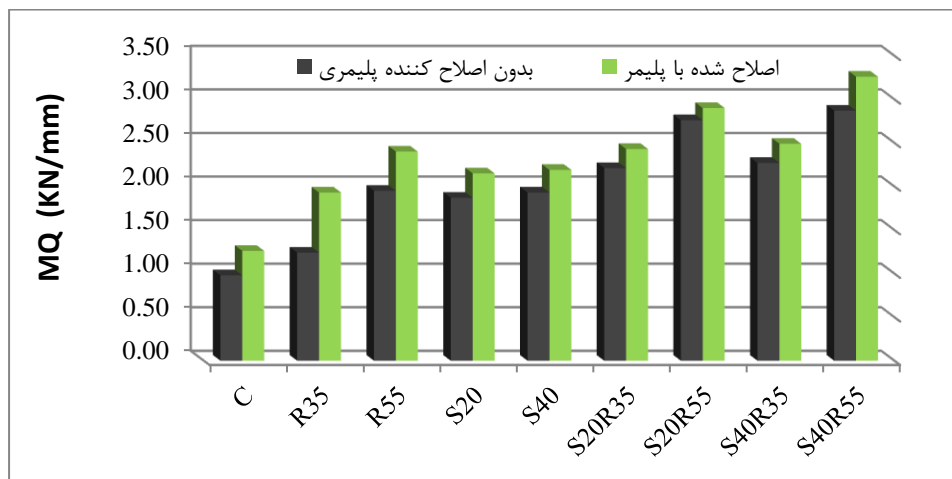


شکل ۵-۱۰. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر شاخص مارشال



شکل ۵-۱۱. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بر شاخص مارشال

در شکل ۵-۱۲ شاخص مارشال تمام نمونه‌ها آورده شده است. در نمودار مشخص است که با افزایش درصد تراشه آسفالتی و سرباره به تدریج شاخص مارشال بهبود یافته است. به طوریکه در نمونه S40R55+ به بالاترین حد خود رسیده است. همچنین نمونه شاهد کمترین مقدار شاخص مارشال را دارد.



شکل ۵-۱۲. نتایج آزمایش شاخص مارشال برای تمام نمونه‌ها

۵-۵ نتایج آزمایش مدول برجهندگی

به منظور بررسی اثر هر یک از افزودنی‌ها (تراشه آسفالتی، سرباره و پلیمر ضایعاتی) بر مدول برجهندگی، نمونه‌های استوانه‌ای با درصد‌های مختلف سرباره، تراشه آسفالتی و پلیمر ضایعاتی ساخته شد و در نهایت توسط دستگاه UTM مورد بارگذاری سینوسی با فرکانس ۰.۵ هرتز، ۱۲۰۰ نیوتن بار و ۱۵۰ سیکل بارگذاری قرار گرفت و با استفاده از جابه‌جایی‌های برگشت‌پذیر افقی مدول برجهندگی آن محاسبه شد.

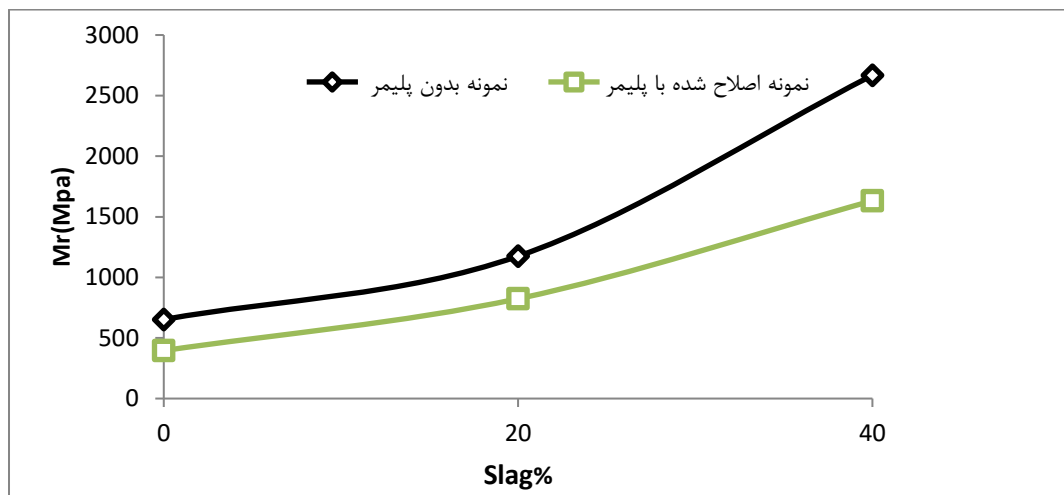
در جدول ۵-۴ نتایج بدست آمده از این آزمایش ارائه شده است.

جدول ۴-۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی (مگاپاسکال)	ارتفاع نمونه (میلی متر)(t)	بار(نیوتن)	نام نمونه
۶۵۲	۷۳	۱۲۰۰	C
۳۹۶	۷۴	۱۲۰۰	C+
۳۴۹۵	۷۴	۱۲۰۰	R35
۲۳۵۵	۷۷	۱۲۰۰	R35+
۶۰۹۷	۷۵	۱۲۰۰	R55
۳۳۰۲	۷۶	۱۲۰۰	R55+
۱۱۷۵	۷۴	۱۲۰۰	S20
۸۲۴	۷۶	۱۲۰۰	S20+
۲۶۶۸	۷۴	۱۲۰۰	S40
۱۶۳۲	۷۳	۱۲۰۰	S40+
۱۸۶۰	۷۳	۱۲۰۰	S20R35
۱۴۱۰	۷۳	۱۲۰۰	S20R35+
۲۸۹۲	۷۹	۱۲۰۰	S20R55
۲۱۲۶	۷۵	۱۲۰۰	S20R55+
۳۶۴۰	۷۷	۱۲۰۰	S40R35
۱۴۷۰	۷۹	۱۲۰۰	S40R35+
۵۰۹۹	۷۷	۱۲۰۰	S40R55
۲۱۰۸	۷۴	۱۲۰۰	S40R55+

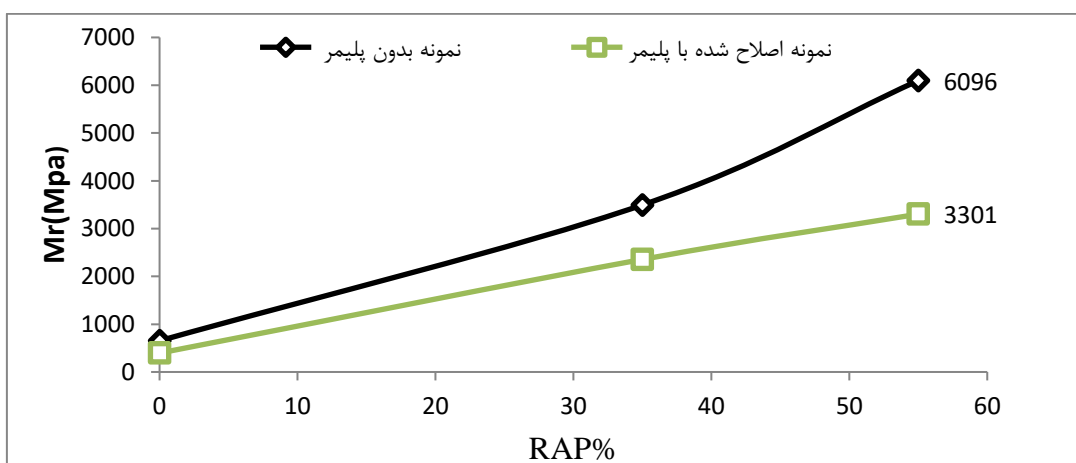
برای بررسی تاثیر بر مدول برجهندگی هر یک از افزودنی‌ها به مخلوط آسفالتی نمودارهای ۱۳-۵ الی ۱۷-۵ ارائه شده است. در شکل ۱۳-۵ تاثیر سرباره بر مدول برجهندگی قابل مشاهده است. در شکل

واضح است که هم در نمونه پلیمری و هم نمونه غیرپلیمری با افزایش درصد سرباره مدول برجهندگی آنها افزایش یافته است. این افزایش در مقدار مدول برجهندگی را می‌توان با افزایش قفل و بست سنگدانه‌ها در اثر افزایش زبری سطح سرباره مرتبط دانست.



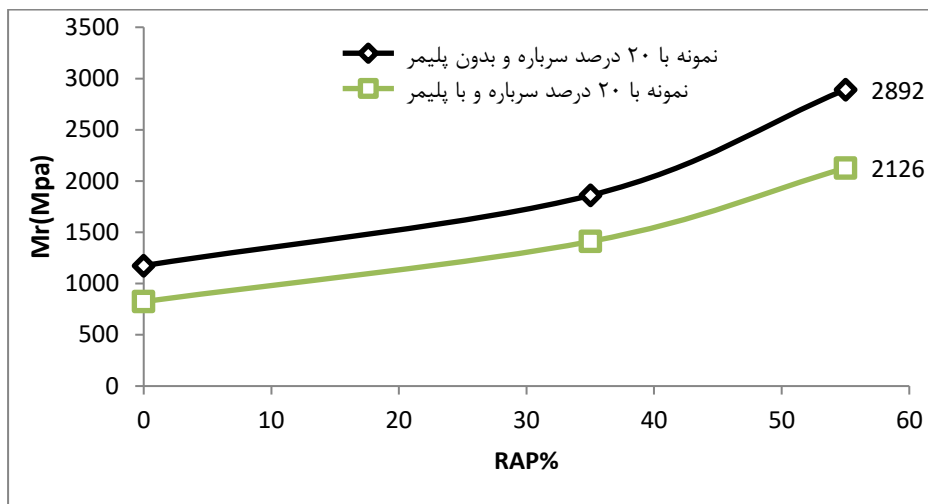
شکل ۱۳-۵. نمودار تاثیر سرباره بر مدول برجهندگی

تاثیر تراشه آسفالتی بر مدول برجهندگی در شکل ۱۴-۵ نشان داده شده است. در حضور و عدم حضور پلیمر ضایعاتی، با افزایش درصد تراشه آسفالتی مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. افزایش مدول برجهندگی به دلیل قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی است که باعث افزایش سختی می‌شود.

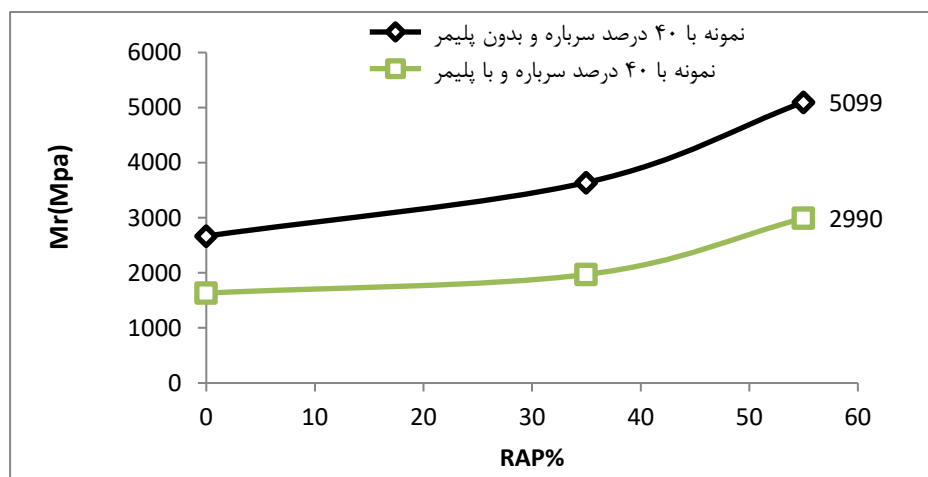


شکل ۱۴-۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی بر مدول برجهندگی

در شکل ۵-۱۵ تاثیر همزمان تراشه و ۲۰ درصد سرپاره و شکل ۵-۱۶ تاثیر همزمان تراشه و ۴۰ درصد سرپاره را نشان می‌دهد. که در هر دو نمودار مدول برجهندگی با افزایش درصد تراشه و سرپاره، افزایش می‌یابد.



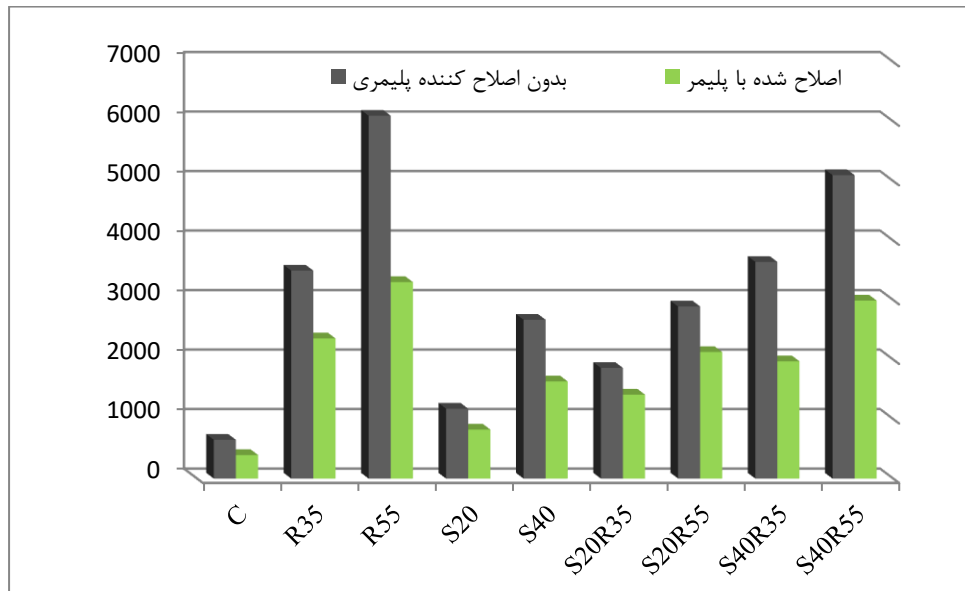
شکل ۵-۱۵. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرپاره بر مدول برجهندگی



شکل ۵-۱۶. نمودار تاثیر تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرپاره بر مدول برجهندگی

مدول برجهندگی تمام نمونه‌ها در شکل ۵-۱۷ ارائه شده است. واضح است که تمام نمونه‌ها مدول برجهندگی بیشتری دارند. همچنین قابل مشاهده است که نمونه‌های حاوی پلیمر مدول برجهندگی کمتری دارند که می‌توان آن را به خاصیت ارتجاعی پلیمرها نسبت داد. بیشترین مدول برجهندگی در نمونه R55 بدست آمده است. همانطور که ذکر شد این افزایش مدول برجهندگی تحت

تأثیر قیر پیرشده است. نکته قابل توجه در نمودار اینست که افزودن تراشه آسفالتی (نسبت به سرباره) تأثیر بیشتری در مقدار مدول برجهندگی داشته است، که این امر می‌تواند به ریزدانه بودن تراشه آسفالتی و درشت‌دانه بودن سرباره و همچنین اثر بیشتر قیر پیرشده تراشه‌ها، مربوط باشد.



شکل ۱۷-۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای تمام نمونه‌ها

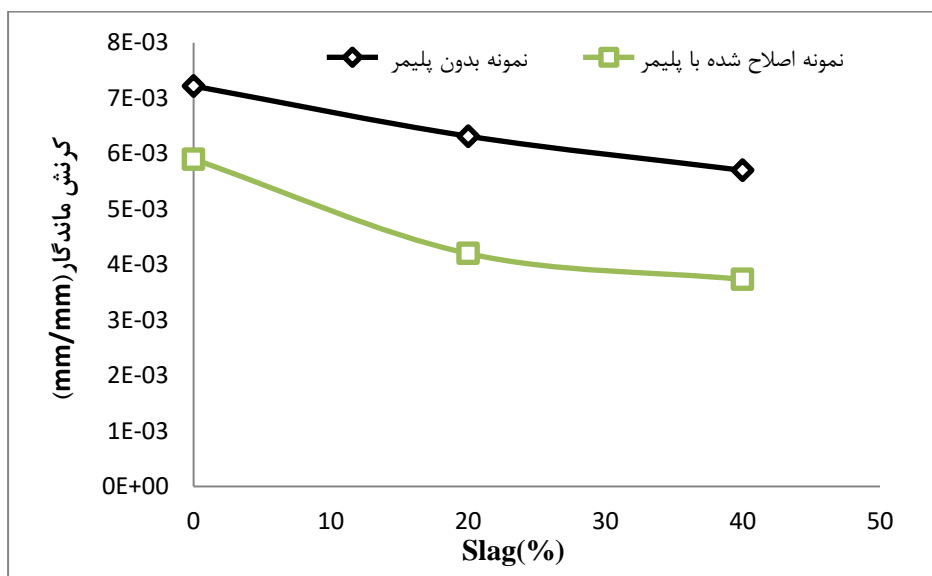
۵-۶ نتایج آزمایش خزش استاتیکی

به منظور بررسی اثر هر یک از افزودنی‌ها (تراشه آسفالتی، سرباره و پلیمر ضایعاتی) بر مقاومت شیارشدگی، نمونه‌های استوانه‌ای با درصدهای مختلف سرباره، تراشه آسفالتی و پلیمر ضایعاتی ساخته شد و در نهایت توسط دستگاه یونیورسال به مدت یک ساعت تحت بارگذاری به مقدار ۵۵۶ نیوتن قرار گرفت و مقدار کرنش در طی آزمایش ثبت شد. از داده‌های ثبت شده برای محاسبه سختی خزشی و کرنش ماندگار استفاده شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۵-۵ ارائه شده است.

جدول ۵-۵. نتایج آزمایش خزش استاتیکی

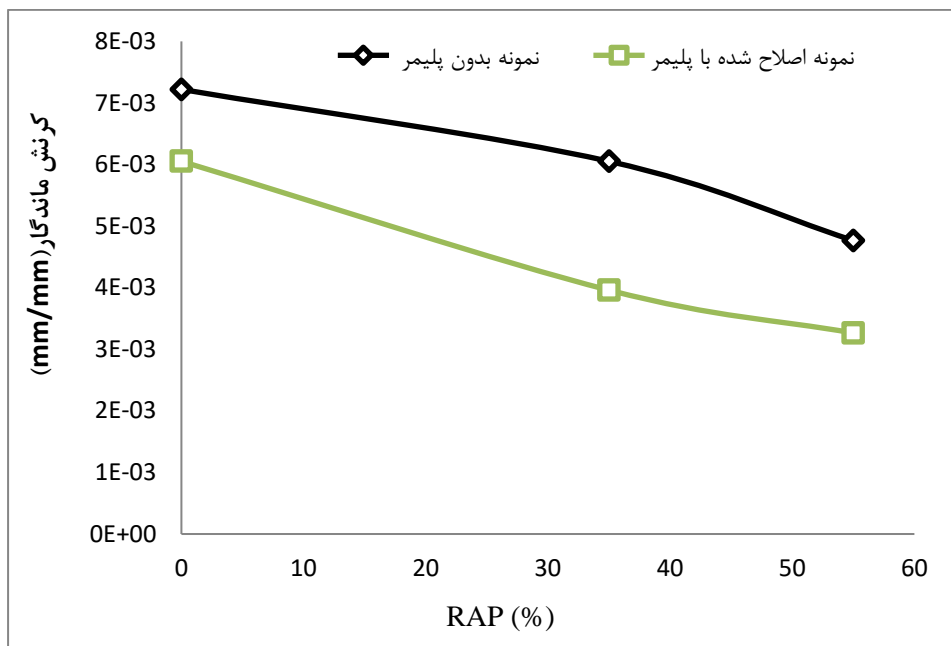
نام نمونه	سختی خزشی (کیلو پاسکال)	کرنش نهایی (میلیمتر/میلی) (متر)	کرنش ماندگار (میلیمتر/میلیمتر)
C	۷۰۹۲	۰.۰۰۹۷۲۹۷۳	۰.۰۰۷۲۲
C+	۷۹۷۸	۰.۰۰۸۶۴۸۶۴۹	۰.۰۰۴۳
R35	۸۵۶۱	۰.۰۰۸۰۶	۰.۰۰۶۵۵۲
R35+	۱۰۶۷۰	۰.۰۰۶۴۶۶۶۶۷	۰.۰۰۳۹۶
R55	۱۱۱۸۶	۰.۰۰۶۱۶۸۴۲۱	۰.۰۰۴۰۶۶
R55+	۱۵۴۵۱	۰.۰۰۴۴۶۵۷۵۳	۰.۰۰۳۲۶۴
S20	۱۰۶۰۲	۰.۰۰۶۵۰۸۱۰۸	۰.۰۰۶۳۱۶
S20+	۱۴۱۹۶	۰.۰۰۴۸۶۰۵۶۳	۰.۰۰۳۷
S40	۱۳۰۱۹	۰.۰۰۵۳	۰.۰۰۵۷
S40+	۱۶۱۷۲	۰.۰۰۴۲۶۶۶۶۷	۰.۰۰۳۷۳۳
S20R35	۹۷۶۴	۰.۰۰۷۰۶۶۶۶۷	۰.۰۰۴۶۳۳
S20R35+	۱۳۸۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۲۹۳۳
S20R55	۲۳۰۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳۶۶۶۶
S20R55+	۳۵۶۹۰	۰.۰۰۱۹۳۳۳۳۳	۰.۰۰۲۳۳۳۳
S40R35	۱۱۵۷۷	۰.۰۰۵۹۶۰۲۷۴	۰.۰۰۴۳۰۶۸
S40R35+	۱۳۸۳۷	۰.۰۰۴۹۸۶۴۸۶	۰.۰۰۲۹۹۷
S40R55	۱۲۱۵۷	۰.۰۰۵۶۷۵۶۷۶	۰.۰۰۳۰۹۴
S40R55+	۲۰۷۰۰	۰.۰۰۳۳۳۳۳۳۳	۰.۰۲۰۳۳

در شکل ۵-۱۸ تاثیر سرباره بر کرنش ماندگار نشان داده شده است، که این پارامتر در واقع شاخص مهمی برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سرباره، مقدار کرنش ماندگار کاهش می‌یابد و این نشان می‌دهد که سرباره مقاومت شیارشدگی را بالا می‌برد. علت این امر می‌تواند با درگیری بیشتر سرباره‌ها با یکدیگر باشد که منجر به تغییر شکل کمتر در نمونه می‌شود.



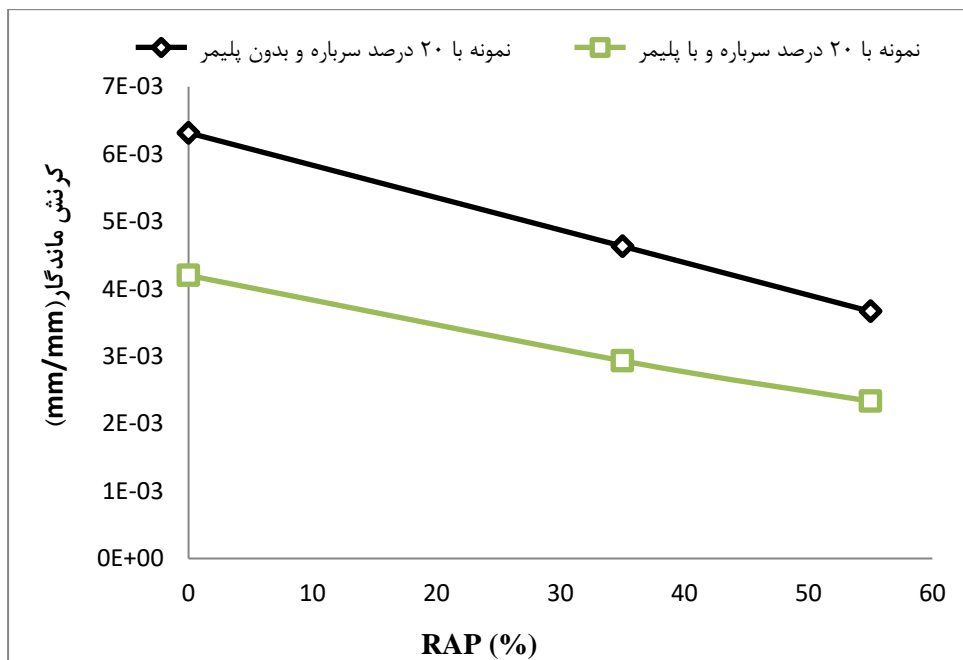
شکل ۵-۱۸. تاثیر سرباره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی

تاثیر تراشه آسفالتی بر مقاومت شیارشدگی در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. افزایش درصد تراشه باعث کاهش کرنش ماندگار و در نتیجه کاهش شیارشدگی می‌شود. قیر پیرشده موجود در تراشه این افزایش مقاومت شیارشدگی را با افزایش دادن مقدار سختی توجیه می‌کند.

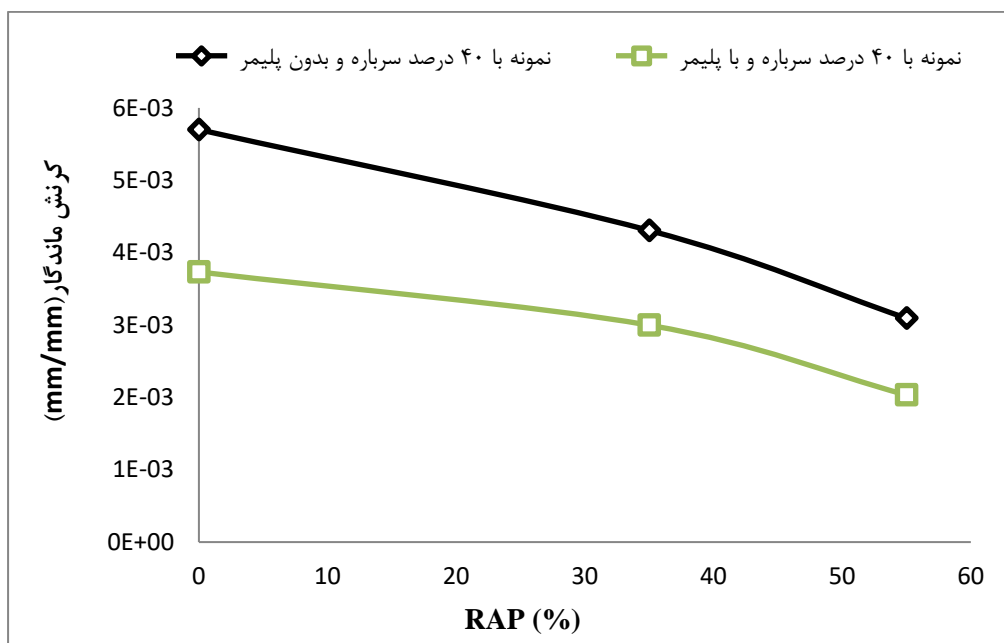


شکل ۱۹-۵. تاثیر تراشه آسفالتی بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی

تاثیر همزمان سرباره و تراشه آسفالتی در شکل‌های ۲۰-۵ و ۲۱-۵ آورده شده است. هر دو نمودار نشان می‌دهد که پتاسیل شیاردگی با افزایش هر دو ماده رو به کاهش است.



شکل ۲۰-۵. تاثیر همزمان تراشه آسفالتی و ۲۰ درصد سرباره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی

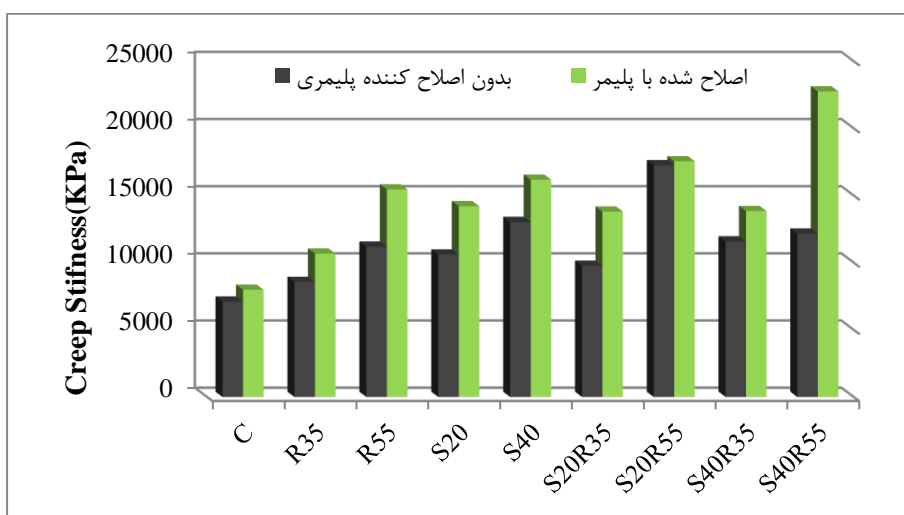


شکل ۲۱-۵. تاثیر همزمان تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرپاره بر کرنش ماندگار در آزمایش خزش استاتیکی

در شکل ۲۲-۵ کرنش ماندگار برای تمام نمونه‌ها آورده شده است. در تمام نمونه‌ها افزودن پلیمر باعث کاهش شیاردگی در نمونه‌ها می‌شود. دلیل افزایش مقاومت شیاردگی در نمونه‌ها را می‌توان تاثیر کربنات کلسیم موجود در پلیمر ضایعاتی در سفت‌تر شدن قیر مخلوط بیان نمود. از طرفی افزودن تراشه‌های آسفالتی و سرپاره نیز منجر به کاهش شیاردگی در نمونه‌ها خواهند شد. در واقع کلیه نمونه‌های ساخته شده نسبت به نمونه‌ی شاهد شیاردگی کمتری داشته‌اند؛ بطوریکه بیشترین شیاردگی در نمونه کنترل بدون اصلاح‌کننده پلیمری و کمترین شیاردگی مربوط به نمونه S40R55+ می‌باشد. برای درک بهتر می‌توان از سختی خزشی نمونه‌ها کمک گرفت که در شکل ۲۳-۵ ارائه شده است. در این شکل قابل مشاهده است که سختی خزشی با افزودن پلیمر و تراشه آسفالتی و سرپاره افزایش می‌یابد که می‌تواند شیاردگی را کاهش دهد.



شکل ۲۲-۵. کرنش ماندگار برای تمام نمونه ها



شکل ۲۳-۵. سختی خزشی برای تمام نمونه ها

۵-۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

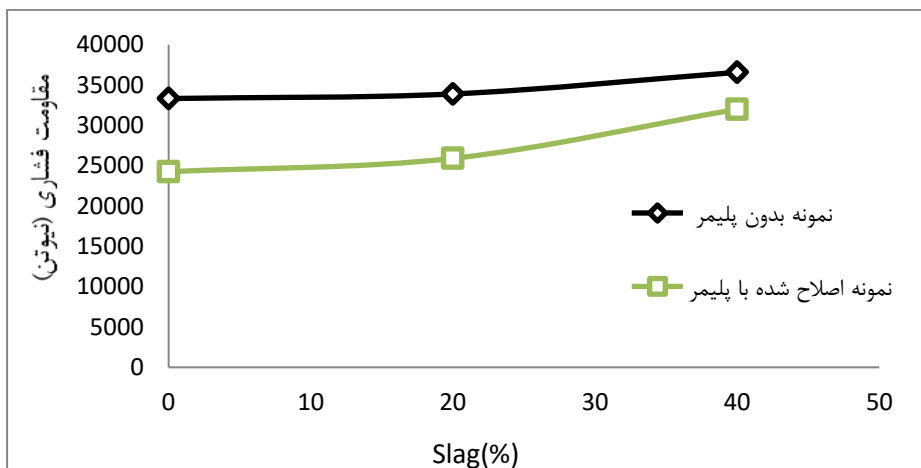
برای بررسی تاثیر تراشه، سرباره و پلیمر ضایعاتی بر مخلوط آسفالتی، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۷۰ میلیمتر ساخته شد و در دمای محیط تحت بارگذاری ثابت با نرخ ۵.۸ میلیمتر بر دقیقه با دستگاه یونیورسال قرار گرفت. حداکثر نیرویی که نمونه‌ها تا قبل از گسیخته شدن تحمل

می‌کنند به عنوان مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود. نتایج این آزمایش در جدول ۵-۶ و شکل ۵-۲۴ آورده شده است.

جدول ۵-۶. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

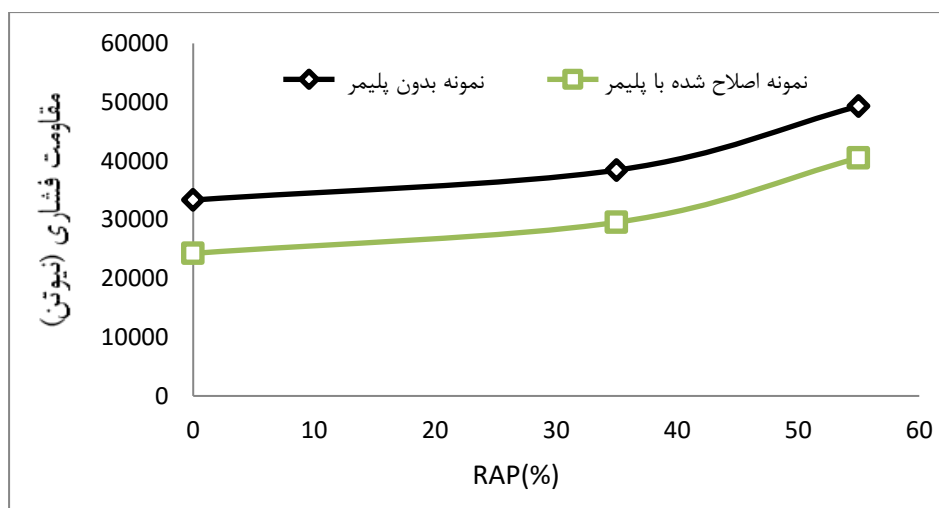
مقاومت فشاری (کیلونیوتن)		
اصلاح شده با پلیمر	بدون اصلاح کننده پلیمری	نام نمونه
۲۴	۳۰	C
۳۸	۲۴	R35
۳۰	۳۸	R55
۴۹	۳۰	S20
۴۱	۴۹	S40
۳۴	۴۱	S20R35
۲۶	۳۴	S20R55
۳۷	۲۶	S40R35
۳۲	۳۷	S40R55

در شکل ۵-۲۴ تاثیر افزایش درصد سرباره بر مقاومت فشاری واضح است. به نحوی که افزایش درصد سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد، که این تاثیر را می‌توان به دلیل چفت و بست بهتر سرباره‌ها در یکدیگر دانست.



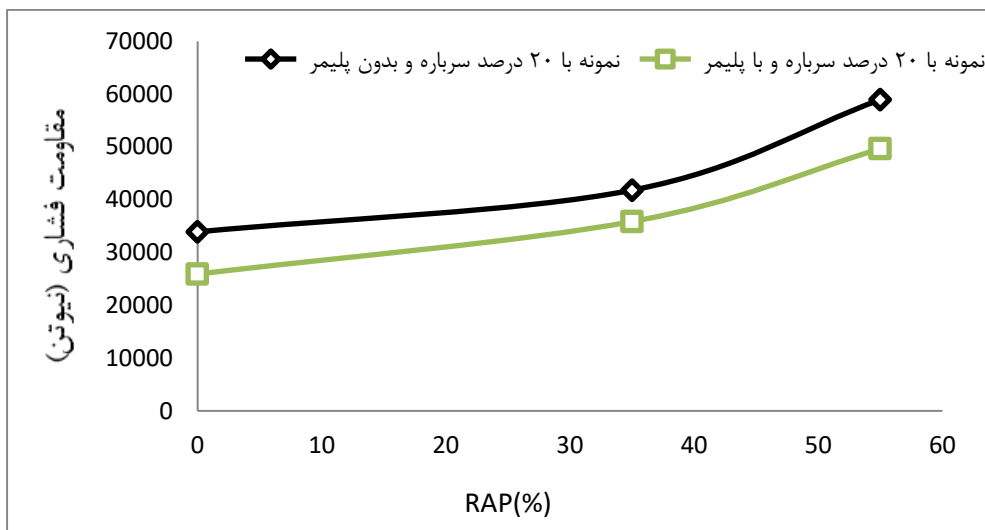
شکل ۲۴-۵. تاثیر سرباره بر مقاومت فشاری

مقاومت فشاری با افزایش درصد تراشه‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲۵-۵). این افزایش با قیر پیرشده درون تراشه‌ها مرتبط است. قیر پیرشده باعث مستحکم‌تر شدن مخلوط در مقابل بار فشاری می‌گردد.

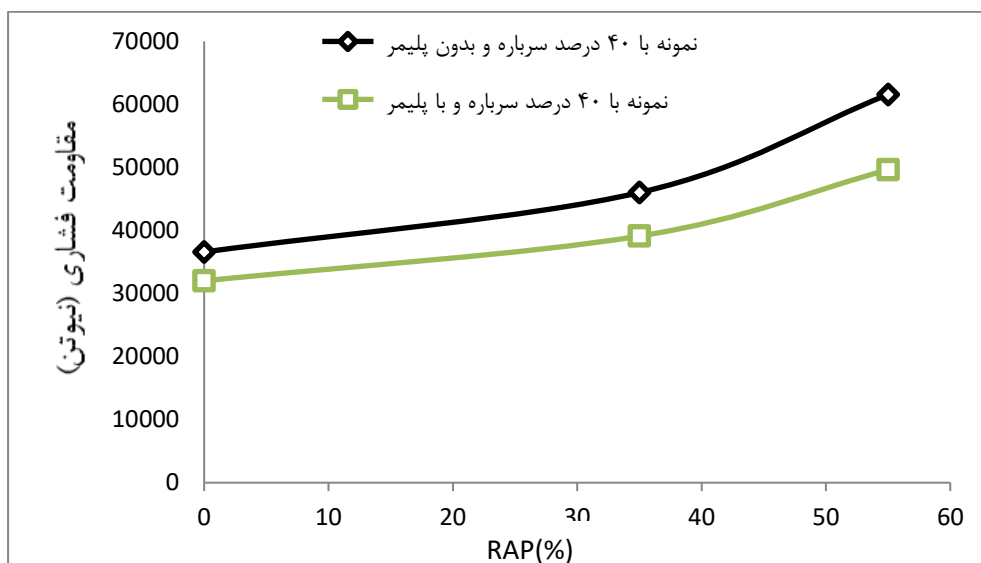


شکل ۲۵-۵. تاثیر تراشه آسفالتی بر مقاومت فشاری

هرگاه از سرباره و تراشه به صورت همزمان استفاده گردد، مقاومت فشاری نیز افزایش پیدا می‌کند که این مسئله در شکل‌های ۲۶-۵ و ۲۷-۵ قابل مشاهده است.



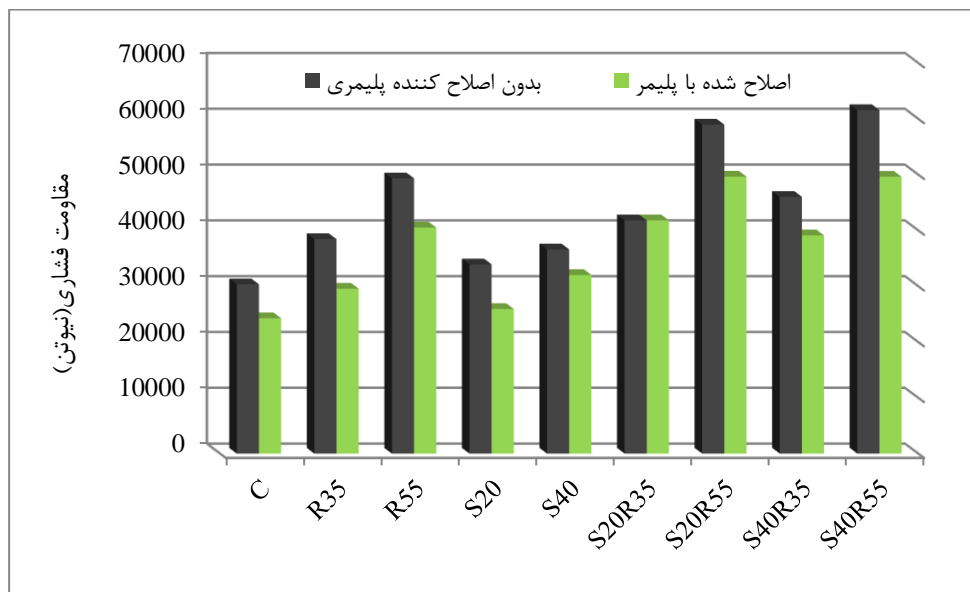
شکل ۲۶-۵. مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۲۰ درصد سرپاره و تراشه آسفالتی



شکل ۲۷-۵. مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۴۰ درصد سرپاره و تراشه آسفالتی

نتایج مقاومت فشاری ترسیم شده در شکل ۲۸-۵ نشان می‌دهد که افزودن پلیمر بر مقاومت فشاری نمونه‌ها تاثیر منفی داشته است و در تمام نمونه‌ها باعث کاهش مقاومت فشاری آن‌ها شده است؛ بطوری که کمترین مقاومت فشاری در نمونه C+ مشاهده شده است. بیشترین مقدار این مقاومت نیز در نمونه S40R55 رخ داده است که بیانگر آن است که افزودن تراشه و سرپاره باعث افزایش مقاومت

فشاری در نمونه‌ها می‌گردد. همچنین این افزایش با افزایش درصد تراشه و سرباره رابطه‌ی معناداری دارد.



شکل ۲۸-۵. مقاومت فشاری برای تمام نمونه‌ها

۵-۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

خلاصه نتایج ذکر شده در آزمایش‌ها در جدول ۷-۵ ارائه شده است.

جدول ۷-۵. خلاصه کلیه نتایج آزمایش‌ها

	درصد قیر بهینه	شاخص مارشال	پتانسیل شیارشدگی	مدول برجهندگی	مقاومت فشاری	حساسیت رطوبتی
تراشه آسفالتی	کاهش می‌دهد	افزایش می‌دهد	کاهش می‌دهد	افزایش می‌دهد	افزایش می‌دهد	کاهش می‌دهد
پلیمر ضایعاتی حاوی کربنات کلسیم	تغییر نمی‌دهد	افزایش می‌دهد	کاهش می‌دهد	کاهش می‌دهد	کاهش می‌دهد	کاهش می‌دهد
سرباره کوره آهن‌گدازی	افزایش می‌دهد	افزایش می‌دهد	کاهش می‌دهد	افزایش می‌دهد	افزایش می‌دهد	افزایش می‌دهد

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

مخلوط‌های آسفالتی از ترکیب شن، ماسه، فیلر و قیر ساخته می‌شوند. تجدیدناپذیر بودن منابع طبیعی قیر و سنگ و همچنین آلودگی هوا ناشی از مصرف سوخت بالا جهت تولید مخلوط آسفالتی، محققین را در سراسر دنیا ترغیب نموده است؛ تا با ابداع روش‌هایی از سرعت تخریب محیط زیست بکاهند. یکی از بهترین روش‌ها، تولید مخلوط آسفالتی در دمای کمتر است که منجر به کاهش آلودگی هوا می‌شود. برای حفظ منابع نیز استفاده از ضایعات و جای دادن آن به جای عناصر مخلوط آسفالتی (شن، ماسه، فیلر، قیر) یکی از روش‌های مورد توجه است.

تعداد زیادی مواد ضایعاتی در مخلوط آسفالتی، توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که بعضاً نتایج قابل قبولی داشته است. از مهم‌ترین این مواد می‌توان از سرباره‌های کوره آهن گدازی، ضایعات پلیمری و تراشه‌های آسفالتی نام برد.

در این پژوهش با رویکرد ساخت مخلوط آسفالتی سازگار با محیط زیست، مخلوط‌های آسفالتی گرم با درصد‌های مختلف سرباره (۰، ۲۰ و ۴۰ درصد) با اندازه‌ی ۴.۷۵ تا ۱۲.۵ میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه، همچنین (۰، ۳۵ و ۵۵ درصد) تراشه آسفالتی با اندازه‌ی ۰.۱۵ تا ۴.۷۵ میلی‌متر به عنوان ریزدانه و (۰ و ۱۰ درصد) پلیمر ضایعاتی ساخته شده است. برای بررسی عملکرد این مخلوط‌ها آزمایش‌های استقامت مارشال، حساسیت رطوبتی، مقاومت فشاری، خزش استاتیکی و مدول برجهندگی بر روی دو دسته‌ی کلی از نمونه‌ها (نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر و نمونه‌های بدون پلیمر ضایعاتی) انجام شده است و نتایج این آزمایش‌ها در ادامه آورده شده است:

- استفاده از تراشه آسفالتی ریزدانه مصرف قیر را کاهش می‌دهد، به عنوان مثال جایگزینی ۵۵ درصد تراشه آسفالتی باعث کاهش بیش از ۵۰ درصد مصرف قیر می‌شود. این ماده به دلیل اینکه حاوی قیر پیر شده است، حساسیت رطوبتی را به طرز چشم‌گیری بهبود می‌دهد،

مقاومت مارشال، شاخص مارشال و مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد. همچنین می‌توان گفت به دلیل سختی بیشتر، تراشه آسفالتی خاصیت شیارشدگی را کاهش می‌دهد.

- سرباره‌های درشت‌دانه استفاده شده در این پژوهش به علت وجود خلل و فرج بیشتر در سطوحشان، مصرف قیر را افزایش می‌دهند. همچنین در آزمایش حساسیت رطوبتی این ماده تاثیر منفی بر نتایج داشته است، ولی باعث بهبود و افزایش مدول برجهندگی، مقاومت فشاری، مقاومت مارشال و شاخص مارشال می‌گردد. همچنین به علت درگیر شدن بیشتر سرباره‌ها با یکدیگر که باعث چفت و بست شدن بهتر سنگدانه‌ها در هم می‌شود، پتانسیل شیارشدگی را کاهش می‌دهد.

- پلیمر ضایعاتی در این پژوهش، حاوی حدود ۵۰ درصد کربنات کلسیم بوده و با اندازه‌ی کوچکتر از ۱.۱۸ میلی‌متر استفاده شده است. از آنجا که تاثیر این افزودنی بر درصد قیر بهینه مد نظر این پژوهش نبوده است؛ در مورد تاثیر این ماده بر درصد قیر بهینه نمی‌توان اظهار نظر کرد. اما این ماده بخاطر دارا بودن کربنات کلسیم، باعث بهبود حساسیت رطوبتی شده است. همچنین استقامت مارشال و شاخص مارشال افزایش یافت ولی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری را کاهش داد.

۲-۶ پیشنهادات

در این پژوهش سعی شده است برای رسیدن به مخلوط آسفالتی سازگار با محیط زیست سرباره، تراشه آسفالتی و پلیمر ضایعاتی به مخلوط آسفالتی افزوده گردد، تا از اثرات نامطلوب آن‌ها بکاهد. بطور کلی از این جهت که این دسته پژوهش‌ها می‌تواند مفید واقع شود پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

۱- درصد استفاده از پلیمر ضایعاتی در این پژوهش ۱۰ درصد می‌باشد که می‌توان از این ماده با درصد‌های بیشتر استفاده کرد. همچنین اختلاط این ماده در مخلوط آسفالتی در این پژوهش

با روش خشک اختلاط انجام گرفته است که توصیه می‌شود این ماده با روش تر به قیر اضافه گردد. ضمناً می‌توان برای بررسی دقیق‌تر اثر کربنات کلسیم از نمونه بدون کربنات کلسیم نیز استفاده کرد و آن‌ها را مقایسه کرد.

۲- خستگی مخلوط‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن است که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا پیشنهاد می‌شود نمونه‌های معرفی شده در این پژوهش مورد آزمایش خستگی قرار گیرد.

۳- سرباره مورد استفاده در این پایان‌نامه درشت‌دانه بوده، می‌توان از اندازه‌های کوچک‌تر این ماده استفاده کرد و تاثیر آن را بر روی پارامترهای مختلف بررسی کرد.

۴- تراشه آسفالتی در این پایان‌نامه ریزدانه بوده و درصد مورد استفاده ۳۵ و ۵۵ درصد از کل سنگدانه‌ها می‌باشد. می‌توان از درصد‌های بیشتری از این ماده استفاده کرد و از درشت‌دانه آن نیز استفاده کرد.

مراجع

1. Capitão, S., L. Picado-Santos, and F. Martinho, *Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt*. Construction and Building Materials, 2012. **36**: p. 1016-1024.
2. You, Z.-P. and S.-W. Goh, *Laboratory evaluation of warm mix asphalt :a preliminary study*. International Journal of Pavement Research and Technology, 2008. **1**(1): p. 34-40.
3. Rubio, M.C., et al., *Warm mix asphalt: an overview*. Journal of Cleaner Production, 2012. **24**: p. 76-84.
4. Aziz, M.M.A., et al., *Performance of warm-mix asphalt in the highway industry*. Materials Research Innovations, 2014. **18**(sup6): p. S6-245-S6-249.
5. Consoli, N.C., et al., *Durability of reclaimed asphalt pavement–coal fly ash–carbide lime blends under severe environmental conditions*. Road Materials and Pavement Design, 2018: p. 1-13.
6. Farooq, M.A. and M.S. Mir, *Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in warm mix asphalt (WMA) pavements: a review*. Innovative Infrastructure Solutions, 2017. **2**(1): p. 10.
7. Zaumanis, M., R.B. Mallick, and R. Frank, *100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis*. Resources, Conservation and Recycling, 2014. **92**: p. 230-245.
8. Hill, B., et al., *Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013. **25**(12): p. 1887-1897.
9. Shu, X., et al., *Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP*. Construction and Building Materials, 2012. **35**: p. 125-130.
10. Dinis-Almeida, M., et al., *Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 1-6.
11. Fakhri, M. and A. Ahmadi, *Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation*. Construction and Building Materials, 2017. **147**: p. 630-638.
12. Fakhri, M. and S.A. Hosseini, *Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion*. Construction and Building Materials, 2017. **134**: p. 626-640.
13. Qazizadeh, M.J., et al., *Evaluating the fatigue behavior of asphalt mixtures containing electric arc furnace and basic oxygen furnace slags using surface free energy estimation*. Journal of Cleaner Production, 2018. **188**: p. 355-361.
14. Hesami, S., et al., *Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates*. International Journal of Pavement Engineering, 2014. **16**(8): p. 745-759.
15. Arabani, M., S. Babamohammadi, and A.R. Azarhoosh, *Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt*. International Journal of Pavement Engineering, 2014. **16**(6): p. 502-509.
16. Ruiz, G., et al., *Laboratory evaluation of seashells used as fine aggregate in hot mix asphalt*. International Journal of Pavement Engineering, 2018: p. 1-9.
17. Moghadas Nejad, F., E. Geraee, and A.R. Azarhoosh, *The effect of nano calcium carbonate on the dynamic behaviour of asphalt concrete mixture*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018: p. 1-10.
18. Köfteci, S., P. Ahmedzade, and B. Kultayev, *Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics*. Construction and Building Materials, 2014. **73**: p. 592-602.

19. Movilla-Quesada, D., et al., *Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen*. Waste Management, 2019. **87**: p. 751-760.
20. Lastra-González, P., et al., *Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 1133-1140.
۲۱. آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی ایران.
۲۲. ف. ف. مصالح طراحی و ساخت روسازی آسفالتی. انتشارات دانشگاه کردستان، ۲۰۰۸.
23. Administration, U.S.D.o.t.F.H., *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. FHWA-PL-08-007, 2008.
24. Lizárraga, J.M., et al., *Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation*. Construction and Building Materials, 2018. **170**: p. 433-445.
25. Olof, K., *Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*. university of Washington., 2006.
۲۶. علیزاده، ع. ارزیابی فنی اقتصادی مخلوط‌های آسفالتی گرم. دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری. ۱۳۹۱، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی: تهران. p. 15-35.
۲۷. عمرانی، ح. بررسی مقاومت خستگی آسفالت داغ (HMA) و مقایسه آن با آسفالت گرم (WMA)، دانشکده مهندسی عمران. ۱۳۹۲، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: ایران.
28. services, U.S.D.o.H.a.H., *Hazard review – Health Effects of Occupation Exposure to Asphalt*. National Institute for Occupational Safety and Health, 2000.
29. Singh Kandhal, P., *WARM MIX ASPHALT TECHNOLOGIES: AN OVERVIEW*. 2018.
30. Xiao, F., P.E. Wenbin Zhao, and S.N. Amirkhanian, *Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(10): p. 31۰۵۱-۴۴
۳۱. توحیدی، سیر تکاملی آهن و فولاد در ایران و جهان. ۱۳۶۴، تهران: موسسه ی انتشارات امیر کبیر.
32. Monshi, A. and M.K. Asgarani, *Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone*. Cement and Concrete Research, 1999. **29**(9): p. 1373-1۳۷۷
۳۳. اعظم، ر. آشنایی با پلیمرها و کاربرد آنها، ۱۳۸۹، ایران: پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران.
34. Devasahayam, S., G. Bhaskar Raju, and C. Mustansar Hussain, *Utilization and recycling of end of life plastics for sustainable and clean industrial processes including the iron and steel industry*. Materials Science for Energy Technologies, 2019. **2**(3): p. 634-646.
۳۵. ا.م. ط.، روسازی راه. ۱۳۶۴، ایران: مرکز نشر دانشگاهی تهران
36. International, A., *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*, in *ASTM D4123-82(1995)*. 1995: West Conshohocken, PA.
37. Transportation, T.D.o., *STATIC CREEP TEST*. 2012, Texas Department of Transportation.
38. Arabani, M. and A.R. Azarhoosh, *The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 2012. **35**: p. 1-7.
39. Officials, A.A.o.S.a.H.T., *Standard Method of Test for Compressive Strength of Hot-Mix Asphalt*, in *AASHTO T 167-10*. 2010.
40. Vasudevan, R., et al., *A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements*. Construction and Building Materials, 2012. **28**(1): p. 311-320.
41. Stimilli, A., et al., *Mix design validation through performance-related analysis of in plant asphalt mixtures containing high RAP content*. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017. **10**(1): p. 23-37.

Abstract

The non-renewability of natural stone and the prevention of environmental destruction in the production of stone materials are the most important incentives for the use of recycled materials in asphalt mixtures. Slag furnaces and Reclaimed asphalt pavement (RAP) have been identified as the most important recyclables used in asphalt mixes. Increasing the bitumen content of asphalt mixtures containing slag can be compensated by adding RAP to the mixture. Also, Plastic waste will improve the performance of asphalt mixtures due to the calcium carbonate material in it. In this study, warm mix asphalt were made using sasobit additive containing 0, 20 and 40% slag and 0, 35 and 55% RAP and 0 and 10% Plastic waste and moisture sensitivity, compressive strength, resilient modulus And their rutting resistance has been evaluated. The results of this study showed improvement of moisture sensitivity, rutting resistance and decrease resilient modulus with increasing RAP percentages, and increased moisture sensitivity and compressive strength of mixtures with increasing slag percentage, decreasing compressive strength and decreasing resilient modulus with increasing Plastic waste.

Keywords: warm asphalt mix, Reclaimed asphalt pavement (RAP), slag iron furnace, moisture sensitivity, resilient modulus, rutting resistance



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc Thesis in Highway and Transportation Engineering

Laboratory performance of WMA mixtures containing RAP and EAF slag

By: Sajjad Amiri

Supervisor:
Dr. Seyyed Ali Hosseini

September 2020