





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابل‌های فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس لینک

در مخلوط آسفالتی

نگارنده:

ایمان محمدیان نامقی

استاد راهنما

دکتر ایمان آقایان

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۲۸۸
تاریخ: ۹۶/۰۶/۱۴

باسمه تعالی



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 خانم / آقای ایمان محمدیان نامقی با شماره دانشجویی ۹۳۱۵۵۹۴ رشته: عمران گرایش: راه و ترابری تحت عنوان: بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابلهای فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس لینک در مخلوط آسفالتی که در تاریخ: ۹۶/۰۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز درجه): مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر ایمان آقایان	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور		استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سعید گلیمان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسین قاسم زاده طهرانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر عبدالاحد چوپانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی 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).

تقدیم به:

پدر عزیز و مادر مهربانم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه

درخت پر بار و وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان

در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا

که این دو وجود پس از پروردگاریه، هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن

را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

قدردانی

و با تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر ایمان آقایان که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه گشای اینجانب در اتمام واکمال این پایان نامه بوده است.

همچنین از تمام دوستانی که مرا در پیشبرد این پایان نامه یاری نموده‌اند، صمیمانه متشکرم و از صمیم قلب از درگاه خداوند منان برایشان بهترین‌ها را آرزو دارم.

تعهد نامه

اینجانب ایمان محمدیان نامقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابلهای فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس لینک در مخلوط آسفالتی تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده:

پلی اتیلن کراس لینک^۱ (XLPE) نوعی عایق مناسب برای کابل‌های فشار قوی است که به دلیل ویژگی‌های مقاومتی، حرارتی و عایقی مناسب، به طور گسترده‌ای در پوشش کابل‌های الکتریکی استفاده می‌شود. به دلیل روانی پایین XLPE و نبود تکنولوژی مناسب از پرکاربردترین روش‌های دفع ضایعات XLPE سوزاندن و دفن کردن این ماده در زیر خاک است. که سوزاندن آن باعث ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود و از طرفی دفن کردن آن احتیاج به تملک زمین‌های بلا استفاده دارد. در این مطالعه از ضایعات خرد شده XLPE به عنوان جایگزین سنگدانه ریز هم اندازه با سایز ۱/۱۸ تا ۲/۳۶ میلیمتر و با در صد‌های حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵، مانده بر روی الک ۸، در آسفالت گرم استفاده شده است و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از روش مارشال برای ساخت نمونه‌ها و تست‌های مدول برجهندگی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم (در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد) به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی مخلوط آسفالتی و تست مقاومت مارشال برای تعیین حساسیت رطوبتی استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ضایعات خرد شده XLPE به عنوان سنگدانه، عمر خستگی و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را در دمای پایین (۵ درجه سانتی‌گراد) بهبود می‌بخشد و افزایش XLPE در این دما، مدول برجهندگی و تعداد سیکل منجر به شکست را افزایش داده است و از طرفی در دمای بالا (۲۵ درجه سانتی‌گراد) مدول برجهندگی و تعداد سیکل منجر به شکست نمونه‌ها با افزایش XLPE کاهش یافته است. و همچنین در تست حساسیت رطوبتی به روش مارشال، مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی XLPE رفتار خوبی را در مقابل حساسیت رطوبتی از خود نشان داده‌اند.

کلیدواژه‌ها: پلی اتیلن کراس لینک (XLPE)، آسفالت گرم، ویژگی‌های مکانیکی، بازیافت

^۱ Cross-linked polyethylene

فهرست

فصل اول	۱
کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ضرورت انجام پژوهش	۳
۳-۱- مزایای این پژوهش	۵
۴-۱- فرضیات پژوهش	۶
۵-۱- سؤال‌های اصلی پژوهش	۶
۶-۱- جنبه‌های نوآوری پژوهش	۷
۷-۱- روش تحقیق	۸
۸-۱- ساختار پایان‌نامه	۸
فصل دوم	۱۱
ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته	۱۱
۱-۲- مخلوط آسفالتی	۱۲
۲-۲- خرابی‌های روسازی و مکانیزم آن	۱۲
۳-۲- پدیده تغییر شکل ماندگار	۱۳
۱-۳-۲- تعریف شیارشدگی و اهمیت بررسی آن	۱۴

۱۴	پارامترهای موثر بر شیارشدگی.....	۲-۳-۲
۱۶	پدیده خستگی در روسازی آسفالتی	۴-۲
۱۶	تعریف ترکهای خستگی	۱-۴-۲
۱۷	مکانیزم بروز ترک خوردگی براساس تئوری کلاسیک	۲-۴-۲
۱۸	عوامل موثر بر عمر خستگی روسازی آسفالتی	۳-۴-۲
۱۹	خرابی های ناشی از رطوبت	۵-۲
۲۰	دوام در آسفالت	۱-۵-۲
۲۱	روشهای جلوگیری از پدید آمدن خرابی رطوبتی	۲-۵-۲
۲۱	مروری بر تحقیقات و کارهای انجام شده در زمینه استفاده از مواد ضایعاتی در اسفالت	۶-۲
۲۱	ضایعات پلی اتیلن ترفتالات	۱-۶-۲
۲۸	ضایعات پلی پروپیلین و پلی اتیلن با دانسیته زیاد و کم	۲-۶-۲
۲۹	خرده شیشه ها و ضایعات شیشه	۳-۶-۲
۳۱	ضایعات لاستیک	۴-۶-۲
۳۲	سنگدانه های بتن بازیافتی (RCA)	۵-۶-۲
۳۳	ضایعات پلی اتیلن کراس لینک در روسازی بتنی	۶-۶-۲
۳۵	فصل سوم	
۳۵	مصالح مصرفی، طرح اختلاط و روش انجام آزمایش ها	

- ۳-۱-مواد و مصالح مصرفی ۳۶
- ۳-۱-۱-سنگ‌دانه‌ها ۳۶
- ۳-۱-۱-۱-دانه بندی سنگدانه ها ۳۷
- ۳-۱-۱-۲-وزن مخصوص و در صد جذب آب درشت دانه ۳۹
- ۳-۱-۱-۳-وزن مخصوص و در صد جذب آب ریز دانه ۴۰
- ۳-۱-۱-۴-سایش لس آنجلس ۴۱
- ۳-۱-۱-۵-ارزش ماسه ای ۴۲
- ۳-۱-۱-۶-آزمایش در صد افت وزنی مصالح (دوام) ۴۳
- ۳-۱-۱-۷-آماده سازی ضایعات XLPE ۴۴
- ۳-۱-۲-قیر مصرفی ۴۵
- ۳-۱-۲-۱-آزمایش درجه نفوذ ۴۶
- ۳-۱-۲-۲-آزمایش نقطه نرمی ۴۷
- ۳-۱-۳-فیلر مصرفی ۴۹
- ۳-۲-طرح اختلاط و روش انجام آزمایشات ۴۹
- ۳-۲-۱-ساخت نمونه ها ۴۹
- ۳-۲-۱-۱-آزمایش محاسبه در صد فضای خالی (رایس) ۵۵
- ۳-۲-۱-۲-مقاومت فشاری و روانی مارشال ۵۸

۶۰	۳-۲-۲- تصویر برداری به روش سی تی اسکن
۶۱	۳-۲-۳- دستگاه آزمایش نائینگهام
۶۳	۳-۲-۳-۱- آزمایش تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیر مستقیم
۶۶	۳-۲-۳-۲- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم
۶۷	۳-۲-۴- آزمایش استقامت مارشال
۶۹	فصل چهارم
۶۹	نتایج آزمایش ها و بحث در آن
۷۰	۴-۱- مقدمه
۷۰	۴-۲- نتایج آزمایش های انجام شده بر روی نمونه ها به منظور محاسبه درصد قیر بهینه
۷۰	۴-۲-۱- محاسبه در صد قیر بهینه نمونه های شاهد
۷۴	۴-۲-۲- محاسبه در صد قیر بهینه نمونه های حاوی ۲۵ در صد XLPE
۷۷	۴-۲-۳- محاسبه در صد قیر بهینه نمونه های حاوی ۵۰ در صد XLPE
۸۰	۴-۲-۴- محاسبه در صد قیر بهینه نمونه های حاوی ۷۵ در صد XLPE
۸۳	۴-۳- آزمایش تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیر مستقیم
۸۵	۴-۴- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم
۸۹	۴-۵- آزمایش ارزیابی حساسیت رطوبتی به روش مقاومت مارشال
۹۱	فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها	۹۱
۱-۵- نتیجه گیری	۹۲
۲-۵- پیشنهادها	۹۴
مراجع فارسی	۹۵
مراجع غیر فارسی	۹۶
پیوست ها	۱۰۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ محل نگهداری ضایعات XLPE ۵
- شکل ۱-۲ شیار شدگی با شدت زیاد ۱۸
- شکل ۲-۲ نتایج مقاومت مارشال برای آزمایش جایگزینی گرانول PET ۲۳
- شکل ۳-۲ نتایج مقاومت مارشال برای آزمایش افزودن چیپس PET ۲۳
- شکل ۴-۲ مقایسه روانی نمونه ها با در صدهای مختلف گرانول PET ۲۴
- شکل ۵-۲ مقایسه روانی نمونه ها با در صدهای مختلف چیپس PET ۲۴
- شکل ۶-۲ مقایسه نسبت مارشال با در صدهای مختلف گرانول PET ۲۵
- شکل ۷-۲ مقایسه نسبت مارشال با در صدهای مختلف چیپس PET ۲۵
- شکل ۸-۲ مدول برجهندگی نمونه های شاهد و حاوی PET ۲۷
- شکل ۹-۲ ویژگی تغییر شکل دائم در نمونه های شاهد و حاوی PET ۲۷
- شکل ۱-۳ اسنگدانه های مصرفی ۳۶
- شکل ۲-۳ منحنی دانه بندی ۳۹
- شکل ۳-۳ ضایعات XLPE، (الف) قبل از خرد شدن، (ب) پس از خرد شدن ۴۵
- شکل ۴-۳ توزین قیر ۵۱
- شکل ۵-۳ دستگاه مخلوط کن ۵۲
- شکل ۶-۳ ریختن مصالح آغشته به قیر در قالب ۵۳
- شکل ۷-۳ چکش مارشال ۵۴
- شکل ۸-۳ نمونه متراکم نشده داخل ارلن ۵۵
- شکل ۹-۳ نمونه ها در داخل حمام آب ۵۹

- شکل ۳-۱۰ تصویر برداری سی تی اسکن از(الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه دارای XLPE.....۶۱
- شکل ۳-۱۱ نمونه مارشال دارای XLPE (الف) تصویر تفکیک برخی ذرات XLPE و فضای خالی نمونه، (ب) تصویر از نمونه اصلی.....۶۱
- شکل ۳-۱۲ دستگاه نائینگهام.....۶۲
- شکل ۳-۱۳ نمودار بارگذاری و تغییر شکل برحسب زمان.....۶۴
- شکل ۳-۱۴ نحوه اعمال بارگذاری و محل سنسورها.....۶۶
- شکل ۳-۱۵ دستگاه مارشال.....۶۸
- شکل ۴-۱ نمودار در صد وزنی قیر- روانی.....۷۲
- شکل ۴-۲ نمودار در صد وزنی قیر- مقاومت مارشال.....۷۲
- شکل ۴-۳ نمودار در صد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت.....۷۲
- شکل ۴-۴ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی مصالح سنگی.....۷۳
- شکل ۴-۵ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی نمونه.....۷۳
- شکل ۴-۶ نمودار در صد وزنی قیر- روانی.....۷۵
- شکل ۴-۷ نمودار در صد وزنی قیر- مقاومت مارشال.....۷۵
- شکل ۴-۸ نمودار در صد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت.....۷۵
- شکل ۴-۹ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی مصالح سنگی.....۷۶
- شکل ۴-۱۰ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی نمونه.....۷۶
- شکل ۴-۱۱ نمودار در صد وزنی قیر- روانی.....۷۸
- شکل ۴-۱۲ نمودار در صد وزنی قیر- مقاومت مارشال.....۷۸
- شکل ۴-۱۳ نمودار در صد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت.....۷۸

- شکل ۴-۱۴ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی مصالح سنگی ۷۹
- شکل ۴-۱۵ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی نمونه ۷۹
- شکل ۴-۱۶ نمودار در صد وزنی قیر- روانی ۸۱
- شکل ۴-۱۷ نمودار در صد وزنی قیر- مقاومت مارشال ۸۱
- شکل ۴-۱۸ نمودار در صد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت ۸۱
- شکل ۴-۱۹ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی مصالح سنگی ۸۲
- شکل ۴-۲۰ نمودار در صد وزنی قیر- در صد فضای خالی نمونه ۸۲
- شکل ۴-۲۱ مدول بر جهندگی نمونه ها در دمای 5°C ۸۴
- شکل ۴-۲۲ مدول بر جهندگی نمونه ها در دمای 25°C ۸۴
- شکل ۴-۲۳ حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی در نمونه های شاهد و حاوی XLPE ۸۵
- شکل ۴-۲۴ مقایسه رفتار خستگی نمونه ها در دمای 5°C ۸۷
- شکل ۴-۲۵ مقایسه رفتار خستگی نمونه ها در دمای 25°C ۸۷
- شکل ۴-۲۶ تعداد سیکل منجر به شکست در دمای 5°C ۸۸
- شکل ۴-۲۷ تعداد سیکل منجر به شکست در دمای 25°C ۸۸
- شکل ۴-۲۸ مقایسه MSR برای نمونه های مختلف ۹۰

فهرست جداول:

- جدول ۱-۳ مشخصات مصالح سنگی ۳۷
- جدول ۲-۳ دانه بندی مصالح سنگی ۳۸
- جدول ۳-۳ دانه بندی های انتخابی ۴۱
- جدول ۴-۳ انتخاب تعداد گلوله بر حسب دانه بندی ۴۲
- جدول ۵-۳ مشخصات فیزیکی قیر مصرفی ۴۵
- جدول ۱-۴ مشخصات نمونه های شاهد ۷۱
- جدول ۲-۴ مشخصات نمونه های حاوی ۲۵٪ ضایعات XLPE ۷۴
- جدول ۳-۴ مشخصات نمونه های حاوی ۵۰٪ ضایعات XLPE ۷۷
- جدول ۴-۴ مشخصات نمونه های حاوی ۷۵٪ ضایعات XLPE ۸۰
- جدول ۵-۴ مقادیر مقاومت مارشال و نسبت MSR برای نمونه ها ۸۹
- جدول پ-۱ نتایج آزمایش ITSM جهت تعیین مدول برجهندگی نمونه های آسفالتی ۱۰۳
- جدول پ-۲ نتایج آزمایش ITFT جهت تعیین عمر خستگی نمونه های آسفالتی ۱۰۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در دهه های اخیر افزایش فعالیت های عمرانی و راهسازی، سبب کاهش بیش از پیش منابع طبیعی شده است و از طرفی حجم بالای تولیدات، میزان قابل توجهی ضایعات صنعتی را به وجود آورده است که تاثیر منفی زیادی بر محیط زیست می گذارد. امروزه بسیاری از کشورها در تلاشند تا با استفاده از روش های نوین، اثرات منفی ناشی از مواد ضایعاتی را به حداقل برسانند. از پرکاربرد ترین روش های دفع ضایعات صنعتی سوزاندن، و دفن آنها در زیر خاک است. که هر کدام دارای معایبی می باشند. به طور مثال روش سوزاندن ضایعات سبب آلودگی زیست محیطی می شود و هزینه اولیه بالایی را به همراه دارد. و در روش دفن زباله ها، احتیاج به تملک زمین های بلا استفاده می باشد، که با توجه به قیمت بالای زمین عملاً این روش قابل توجیه نمی باشد. یکی از روشهایی که امروزه بیش از پیش مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده دوباره از مواد ضایعاتی در صنعت و ساختمان می باشد. به کارگیری ضایعات صنعتی در روسازی راه، یکی از موارد استفاده ی دوباره ضایعات به جای دفع و دفن آنهاست که حتی می تواند موجب بهبود خصوصیات مکانیکی روسازی گردد. در سالهای اخیر محققان زیادی به دنبال استفاده از مواد جدید در روسازی راه بوده اند تا بتوانند با هزینه های کمتر خصوصیات عملکردی و مقاومتی آسفالت را بهبود ببخشند. استفاده از مواد ضایعاتی در روسازی راه گزینه مناسبی است که سبب استفاده مناسب از آنها، و همچنین بهبود خصوصیات مکانیکی روسازی راه می گردد.

بتن آسفالتی پوسته متراکم و سیاه رنگی است که قسمت عمده و بطور کلی استخوان بندی آن را مصالح سنگی دارای دانه بندی پیوسته (با کمترین فضای خالی) تشکیل می دهد و ذرات آن توسط قیر به هم چسبیده اند. بتن آسفالتی از جمله مصالحی است که به طور گسترده ای در روسازی راه ها و فرودگاه ها استفاده می شود. روسازی راه ها به عنوان سطوحی که مورد بارگذاری مکرر و متعدد محورهای سنگین

قرار می گیرند، باید دارای مقاومت کافی در برابر خستگی، ترک خوردگی، خزش و لغزش باشند (ریچاردسون^۱، ۲۰۰۸). آسفالت گرم در ساختار روسازی به عنوان لایه رویه استفاده می شود تا تنش وارده در اثر چرخ را توزیع کرده و نیز لایه های محافظت نشده زیرین را از اثر آب حفظ کند. برای آنکه مخلوط آسفالت بتواند هر دوی این وظایف را در طول عمر طراحی روسازی با کیفیت انجام دهد، باید در برابر تأثیرات آب و هوا و همچنین در برابر تغییر شکل دائمی و ترکهای ایجاد شده توسط بارگذاری و عوامل محیطی مقاومت خوبی از خود نشان دهد (هوانگ^۲، ۱۹۹۳). مصالح سنگی که درصد زیادی از حجم و وزن مخلوط آسفالتی را تشکیل می دهد به عنوان استخوان بندی و عضو باربر آن عمل می نمایند (توپال و همکاران^۳، ۲۰۰۸). بنابراین ویژگی های فیزیکی و معدنی مصالح سنگی تأثیر بسزایی در کیفیت و خصوصیات مخلوط های آسفالتی و همچنین در مقاومت شیار شدگی^۴ و تغییر شکل دائم^۵ مخلوط های آسفالتی خواهند داشت. از دیگر عوامل تأثیر گذار بر میزان شیار شدگی نوع سنگدانه ها و مشخصات هندسی آنهاست (ابو کودایس و همکاران^۶، ۲۰۰۸).

۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

به علت کاهش منابع طبیعی، افزایش روزافزون فعالیت های عمرانی و راه سازی و صرفه جویی در مصرف انرژی و جنبه های زیست محیطی، محققین به دنبال پیدا کردن جایگزینی مناسب برای مصالح مصرفی در ساخت جاده ها می باشند. تولید پلیمرها در سرتاسر جهان به بیش از ۱۰۰ میلیون تن در سال می رسد. اغلب ضایعات پلیمری شامل ضایعات پلاستیک، لاستیک و مواد پلی اتیلنی^۷ از جمله^۸ XLPE، به ترتیب

¹ Richardson

² Huang, Y.H.

³ Topal et al.

⁴ Rutting

⁵ Permanent deformation

⁶ Abo-qudais et al.

⁷ Polyethylene

⁸ Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

از بسته بندی، صنایع خودرو و کابلهای الکتریکی تولید می شود، که تولید این ضایعات باعث آلودگی های زیست محیطی و همچنین ایجاد هزینه های زیاد در جداسازی و بازسازی این مواد می شود. بنابراین بازیافت این مواد بسیار مورد توجه است (استرویک و همکاران^۱، ۲۰۰۰). پلی اتیلن کراس لینک (XLPE) نوعی عایق مناسب برای کابلهای فشار قوی است که به دلیل ویژگی های مقاومتی، حرارتی و عایقی مناسب، بیش از ۵۰ سال است که به طور گسترده ای در پوشش کابلهای الکتریکی استفاده می شود. در سرتاسر جهان سالیانه مقدار زیادی کابلهای الکتریکی فشار قوی تولید می شود که خود دارای ضایعاتی می باشد. به دلیل روانی^۲ پایین XLPE و نبود تکنولوژی مناسب، این ماده به ندرت بازیافت می شود. از پرکاربرد ترین روشهای دفع ضایعات XLPE سوزاندن و دفن کردن این ماده در زیر خاک است. سوزاندن XLPE باعث ایجاد آلودگی محیط زیست و هزینه اولیه بالا می شود و از طرفی دفن کردن آن احتیاج به تملک زمین های بلا استفاده دارد. و همچنین به دلیل برگشت طولانی مدت این مواد به طبیعت باعث آلودگی زیست محیطی می شود. طبق بررسی های انجام شده در ژاپن، میزان دفن ضایعات XLPE حدود ۱۰۰۰۰ تن در سال ۲۰۰۳ تخمین زده شده است (تکودا و همکاران^۳، ۲۰۰۳). و همچنین در کشور سوئد ضایعات XLPE حدود ۴۰۰۰۰ تن در سال ۲۰۰۷ تخمین زده شده است (کریستین^۴، ۲۰۰۷). در شکل ۱-۱ محل نگهداری این ضایعات نشان داده شده است. تاکنون تحقیقات گسترده ای در زمینه استفاده از ضایعات پلیمری در ساخت راهها توسط سازمان های مرتبط با محیط زیست و راه انجام شده است. اما در این میان راهکاری برای استفاده از ضایعات XLPE ارائه نشده است.

¹ Struik et al.

² fluidity

³ Tokuda et al.

⁴ Christéen



شکل ۱-۱ محل نگهداری ضایعات XLPE

به منظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست و همچنین کاهش هزینه های ساخت با توجه به ارزان و حتی رایگان بودن ضایعات XLPE، بر آن شدیم این تحقیق را به منظور بررسی امکان استفاده از ضایعات XLPE در مخلوط آسفالتی انجام دهیم. بنابراین هدف اصلی از این تحقیق بررسی اثر ضایعات XLPE به عنوان سنگدانه بر روی خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی می باشد. که بدین منظور از ضایعات XLPE به عنوان جایگزین ریزدانه، با در صدهای حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵، مانده بر روی الک ۸ استفاده شده است.

۱-۳- مزایای این پژوهش

مزایای اصلی این پژوهش را می توان در سه مورد توضیح داد:

الف) جنبه های زیست محیطی:

با توجه به اینکه هنوز راهکار مناسبی برای بازیافت ضایعات XLPE ارائه نشده است، روش های موجود برای بازیافت ضایعات این ماده، که شامل سوزاندن و دفن کردن آنها در خاک است، سبب آلودگی هوا و

خاک می‌شود. در نتیجه استفاده از این ضایعات در مخلوط آسفالتی می‌تواند راهکاری مناسب برای بازیافت این ماده باشد.

(ب) جنبه‌های فنی:

با توجه به ویژگی‌های ضایعات XLPE، به نظر می‌رسد این ماده بازیافتی بتواند برخی خواص روسازی آسفالتی از جمله مدول برجهنگی^۱ و عمر خستگی^۲ را بهبود بخشد و از لحاظ فنی مفید باشد.

(ج) جنبه‌های اقتصادی:

با توجه به اینکه ضایعات XLPE در اغلب موارد رایگان و تقریباً غیرقابل بازیافت هستند، هزینه کمتری (فقط هزینه خرد کردن) را نسبت به سنگ‌دانه معمولی دارند. بنابراین با استفاده از آن‌ها با هزینه کمتر، مصالح ساخت روسازی تأمین می‌گردد.

۱-۴- فرضیات پژوهش

با توجه به خاصیت ارتجاعی بیشتر، چگالی و جذب آب کمتر ضایعات XLPE در مقایسه با سنگ‌دانه طبیعی، انتظار می‌رود که با جایگزینی این مواد با سنگ‌دانه طبیعی در درصد‌های مورد نظر، برخی از خواص روسازی آسفالتی بهبود پیدا کرده و در عین حال اثرات مطلوب زیست محیطی را در پی خواهد داشت.

۱-۵- سؤال‌های اصلی پژوهش

هدف اصلی این پژوهش دستیابی به روسازی آسفالتی سازگار با محیط‌زیست و همچنین دارای

^۱ resilient modulus

^۲ fatigue life

ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و متناسب با آیین‌نامه می باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی سؤالات زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

(۱) آیا می‌توان از ضایعات پلی‌اتیلن کراس لینک به عنوان سنگ‌دانه در مخلوط آسفالتی استفاده کرد؟

(۲) تأثیر استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگ‌دانه ریز با مقادیر مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ درصد حجمی، مانده بر روی الک ۸، بر رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی چگونه است؟

(۳) آیا استفاده از ضایعات XLPE می‌تواند بر قابلیت جذب انرژی روسازی آسفالتی تأثیر مثبت بگذارد؟

(۴) نتایج آزمایش مدول برجهندگی و خستگی برای نمونه‌های شاهد و دارای XLPE با در صدهای مختلف، در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد چگونه است؟

(۵) نتایج آزمایش ارزیابی حساسیت رطوبتی^۱ مخلوط آسفالتی به روش مقاومت مارشال برای نمونه‌های شاهد و دارای XLPE با مقادیر مختلف چگونه است؟

(۶) آیا استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگ‌دانه در روسازی آسفالتی راه حل مناسبی برای بازیافت آن می باشد؟

۱-۶- جنبه‌های نوآوری پژوهش

با توجه به تحقیقات و مروری بر کارهای انجام شده، می‌توان گفت که هنوز راهکاری با صرفه اقتصادی و مناسب، برای بازیافت ضایعات XLPE انجام نشده است. به نظر می‌رسد با استفاده از این ضایعات در روسازی آسفالتی، علاوه بر بازیافت این مصالح، بتوان برخی از ویژگی‌های این روسازی را بهبود داد. در این

¹ moisture susceptibility

تحقیق ضایعات XLPE در مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد حجمی، مانده بر روی الک ۸، با سنگ‌دانه ریز طبیعی در مخلوط روسازی آسفالتی جایگزین شده است. و همچنین رفتار نمونه های مخلوط آسفالتی حاوی XLPE در مقایسه با نمونه های شاهد با استفاده از آزمایش خستگی، مدول برجهندگی و تست ارزیابی حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۱-۷- روش تحقیق

در این تحقیق برای ساخت نمونه ها از استاندارد مارشال (ASTM1559) استفاده شده است. قطر استاندارد نمونه ها ۴ اینچ (۱۰۱/۶ میلیمتر) و ارتفاع آنها ۲/۵ اینچ (۶۳/۵ میلیمتر) است و نمونه ها با ۵۰ ضربه در هر طرف (ترافیک متوسط) متراکم شده اند. از XLPE به عنوان جایگزین مصالح سنگی هم اندازه (مانده بر روی الک ۸ با سایز ۱/۱۸ تا ۲/۳۶ میلیمتر) و با در صدهای حجمی ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ در مخلوط آسفالتی استفاده شده است. و برای این مقادیر از درصد های قیر ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ درصد وزن مصالح سنگی برای ساخت نمونه ها استفاده شده است. سپس میزان قیر بهینه برای نمونه های شاهد و نمونه های حاوی ۰، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ در صد XLPE تعیین شده است. پس از تعیین میزان قیر بهینه، برای نمونه های با در صد های مختلف، برای انجام هر آزمایش، ۳ نمونه با میزان قیر بهینه ساخته شده و آزمایشات خستگی، مدول برجهندگی و ارزیابی حساسیت رطوبتی با روش مقاومت مارشال با سه بار تکرار، بر روی نمونه ها انجام می شود.

۱-۸- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تهیه و تنظیم شده است که به شرح زیر است:

- در فصل اول، کلیات پژوهش و شناخت کلی از روسازی آسفالتی و ضایعات XLPE ، مزایای پژوهش و همچنین ضرورت و هدف انجام این مطالعه به صورت مختصر بیان شده است.
- در فصل دوم، مطالبی در ارتباط با خصوصیات و مشخصات روسازی آسفالتی، خلاصه‌ای از کارهای انجام شده قبلی در زمینه‌ی استفاده از مواد بازیافتی در روسازی آسفالتی مطرح شده است.
- در فصل سوم، خصوصیات مصالح مصرفی، آزمایش‌ها و روش انجام آن‌ها توضیح داده شده است.
- در فصل چهارم، بررسی و مقایسه اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها و تشریح نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیان شده است.
- فصل پنجم، به نتیجه‌گیری کلی از آزمایش‌ها و همچنین پیشنهادهایی در رابطه با ادامه تحقیق اختصاص داده شده است.

فصل دوم

ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مخلوط آسفالتی

بتن آسفالتی پوسته متراکم و سیاه رنگی است که قسمت عمده و بطور کلی استخوان بندی آن را مصالح سنگی دارای دانه بندی پیوسته (با کمترین فضای خالی) تشکیل می دهد و ذرات آن توسط قیر به هم چسبیده اند. بتن آسفالتی از جمله مصالحی است که به وفور برای روسازی راه ها و فرودگاه ها استفاده می شود. روسازی راه ها به عنوان سطوحی که مورد بارگذاری مکرر و متعدد محورهای سنگین قرار می گیرند، باید دارای مقاومت کافی در برابر خستگی، ترک خوردگی، خزش و لغزش باشند (ریچارد سون، ۲۰۰۸). آسفالت گرم در ساختار روسازی به عنوان لایه رویه استفاده می شود تا تنش وارده در اثر چرخ را توزیع کرده و نیز لایه های محافظت نشده زیرین را از اثر آب حفظ کند. برای آنکه مخلوط آسفالت بتواند هر دوی این وظایف را در طول عمر طراحی روسازی با کیفیت انجام دهد، باید در برابر تاثیرات آب و هوا و همچنین در برابر تغییر شکل دائمی و ترکهای ایجاد شده توسط بارگذاری و عوامل محیطی مقاومت خوبی از خود نشان دهد (هوانگ، ۱۹۹۳).

۲-۲- خرابی های روسازی و مکانیزم آنها

جاده ها سرمایه ملی هر کشور هستند که امکان ارتباط بین نقاط مختلف را فراهم می کنند. با توجه به اینکه هزینه احداث جاده ها با گذشت زمان رو به افزایش است انجام فعالیت هایی که به کمک آنها بتوان هزینه های حفظ و نگهداری راه ها یا احداث مجدد آنها را کاهش داد بسیار حائز اهمیت خواهد بود. با توجه به اینکه روسازی اغلب جاده های ایران از نوع روسازی انعطاف پذیر است، مطالعات در زمینه ویژگی های مخلوط آسفالتی اهمیت خاصی پیدا می کند که در این راستا تحقیقات بسیاری برای بهبود خصوصیات روسازی های آسفالتی انجام گرفته است.

طول عمر روسازی راه از سرفصل های مهم در اقتصاد ملی به شمار می آید. ایالات متحده آمریکا

سالانه ۲۵ میلیارد دلار در محافظت از روسازی راه ها و خدمات ترافیکی هزینه می کند. یک روسازی خوب باید با ایجاد سطحی هموار و صاف برای راننده، حجم بالای عبور و مرور را تحمل کند و تنشهای اعمالی به سطح روسازی را به لایه های زیرین پخش و منتقل کند (سوسا و همکاران^۱، ۱۹۹۱).

خرابی هایی که در طول عمر مفید روسازی رخ می دهند، عمدتاً شامل تغییر شکل‌های دائمی در مسیر چرخ وسایل نقلیه، ترکهای ناشی از خستگی^۲، و خرابی های ناشی از عریان شدگی^۳ می باشند.

۳-۲- پدیده تغییر شکل ماندگار

در سالهای اخیر با افزایش حجم ترافیک سنگین در جاده ها، شیار شدگی در سطح رویه های آسفالتی به عنوان یکی از مهمترین خرابی ها (مخصوصاً در مناطق گرمسیر) مورد توجه قرار گرفته است. تغییر شکل‌های ماندگار و یا به عبارت دیگر شیار شدگی؛ فرو رفتگی های طولی هستند که در مسیر عبور چرخ وسایل نقلیه ایجاد می شوند. براساس تحقیقات انجام شده، پدیده شیار شدگی یکی از مهمترین مکانیزم خرابی در روسازی های انعطاف پذیر شناخته شده است. این خرابی علاوه بر به وجود آوردن هزینه های سنگین مرمت و بهسازی، سبب بروز مشکلات شدید ایمنی برای استفاده کنندگان از راه شده و از این طریق خسارت های زیادی را به بار می آورند. عوامل متعددی از جمله در صد قیر، در صد فضای خالی آسفالت، دانه بندی، جنس و نوع مصالح سنگی و روش طرح اختلاط بر میزان و شدت شیار شدگی تاثیر گذارند.

¹ Sousa et al.

² Fatigue Cracking

³ stripping

۲-۳-۱- تعریف شیار شدگی و اهمیت بررسی آن

تغییر شکل دائم معمولاً یکی از دلایل اساسی شیار شدگی روسازی می باشد (پاردهان^۱، ۱۹۹۵). شیار شدگی در روسازی های آسفالتی به صورت فرورفتگی های طولی در زیر مسیر چرخ ها نمایان شده و با بر آمدگی های کناره همراه است.

شیار شدگی عمر خدمت دهی مفید روسازی را کاهش داده و با تحت تاثیر قرار دادن خصوصیات کنترلی وسایل نقلیه و ایجاد مشکلات در ایمنی راه ها، خطرات جدی را برای استفاده کنندگان از راه ایجاد می کند (سوسا و همکاران، ۱۹۹۱). افزایش عمق شیار علاوه بر ایجاد مشکلات در ایمنی راه ها می تواند باعث تجمع آب در سطح راه و همچنین ایجاد پدیده عریان شدگی در مخلوط آسفالتی شود (پاردهان، ۱۹۹۵). شیار شدگی همچنین می تواند پدیده موسوم به قیر زدگی^۲ را به همراه داشته باشد. در صورتی که شدت شیار شدگی زیاد باشد، شدت قیر زدگی نیز زیاد می شود، به نحوی که سطح آسفالت به سطحی بسیار صاف و صیقلی تبدیل می شود. این عامل سبب می گردد که اصطکاک بین لاستیک های وسایل نقلیه و رویه آسفالتی از بین رفته و احتمال تصادفات ترافیکی افزایش یابد. تاثیر دیگر شیار شدگی بر عملکرد روسازی، کاهش ضخامت روسازی است که به رخداد خرابی روسازی در اثر ترکهای خستگی منتهی می شود (FHWA^۳, 1998).

۲-۳-۲- پارامترهای موثر بر شیار شدگی

عوامل موثر بر شیار شدگی را می توان بر دو دسته کلی عوامل درونی و بیرونی تقسیم کرد که خود این عوامل را می توان به پارامترهای گوناگون مربوط دانست. از جمله عوامل درونی می توان به

¹ Pardhan

² Bleeding

³ Federal Highway Administration (FHWA)

خصوصیات مصالح سنگی و قیر، نوع دانه بندی، مشخصات مخلوط آسفالتی و ضخامت لایه آسفالتی اشاره کرد. مصالح سنگی که در صد زیادی از حجم و وزن مخلوط آسفالتی را تشکیل می دهد به عنوان استخوان بندی و عضو باربر آن عمل می نمایند (توپال و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین ویژگی های فیزیکی و معدنی مصالح سنگی تاثیر بسزایی در کیفیت و خصوصیات مخلوط های آسفالتی و همچنین مقاومت شیار شدگی و تغییر شکل دائم مخلوط های آسفالتی دارند. از دیگر عوامل تاثیر گذار بر میزان شیار شدگی نوع سنگدانه ها و مشخصات هندسی آنهاست (ابو کودایس و همکاران، ۲۰۰۸).

قیر یکی از ارکان اصلی مخلوط آسفالتی بوده و به عنوان چسبنده ای برای نگهداری مصالح سنگی در کنار هم، مورد استفاده قرار می گیرد. تمایل به شیار شدگی به طرز قابل توجهی متاثر از سختی و میزان قیر بوده و تحقیقات زیادی به اهمیت قیر در بروز این پدیده پرداخته اند (پاردهان، ۱۹۹۵). تاثیر قیر در پدیده شیار شدگی متاثر از سختی و مقدار آن می باشد. با افزایش سختی قیر، سختی مخلوط آسفالتی و در نتیجه مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش می یابد (سوسا و همکاران، ۱۹۹۱).

برای یک ترکیب معین از سنگدانه ها، میزان بالاتر قیر بهینه باعث کاهش در صد فضای خالی و در پی آن افزایش پتانسیل شیار شدگی می گردد. گزارشات متعددی وجود دارد که بیان داشته اند کاهش در صد فضای خالی مصالح سنگی و در صد فضای خالی مخلوط آسفالتی، مقاومت در برابر تغییر شکل دائم را افزایش می دهند (پاردهان، ۱۹۹۵).

از جمله عوامل بیرونی می توان به شرایط آب و هوایی، ترافیک و نحوه ساخت روسازی های آسفالتی اشاره کرد. نتایج تحقیقات نشان می دهد که با افزایش دما از ۲۰ درجه به ۶۰ درجه سانتی گراد، شیار شدگی با ضریب بالایی افزایش می یابد (پاردهان، ۱۹۹۵).

از دیگر عوامل تاثیر گذار بر شیار شدگی می توان سرعت وسایل نقلیه را نام برد. به طور کلی با افزایش

سرعت عبور، عمق شیار شدگی کاهش می یابد. به همین دلیل در نزدیکی تقاطع ها به دلیل سرعت پایین وسیله های نقلیه میزان شیار شدگی بیشتری مشاهده می شود (پیراباروبان و همکاران^۱، ۲۰۰۳).

ازدیگر عامل بیرونی تراکم مخلوط آسفالتی است. تراکم آزمایشگاهی باید تا حد زیادی با تراکم انجام گرفته در محل شبیه و نزدیک باشد. زیرا تراکم عامل مهم و تاثیر گذار در طرح اختلاط و در ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیار شدگی است (لایدن و همکاران^۲، ۱۹۸۷).

۲-۴- پدیده خستگی در روسازی آسفالتی

به طور کلی، مبانی ساز و کارهای خستگی مخلوط آسفالتی پیچیده است. خستگی، حاصل تجمع آسیب در مصالح، تحت اثر بارگذاری مکرر می باشد. نتیجه این تجمع آسیب در مصالح، به وجود آمدن ترک در مخلوط آسفالتی است که یکی از خرابی های اساسی در روسازیهای انعطاف پذیر است و خود را به صورت ترک پوست سوسماری نشان می دهد. ویژگی های خستگی مخلوط آسفالتی، معمولا به وسیله بار تکراری آزمایشگاهی در آزمایشگاه تعیین می شود. مقاومت خستگی مخلوطهای آسفالتی، به توانایی آنها برای پاسخ به بارگذاری مکرر ترافیکی تحت شرایط محیطی غالب، بدون وقوع ترک قابل توجه یا به وجود آمدن خرابی ماندگار، اطلاق می شود. یکی از مسائل اصلی در رویکرد طراحی مکانیستیک روسازی، محدود کردن کرنش کششی بیشینه در پایین لایه آسفالتی و در نتیجه ترک خستگی در لایه های آسفالتی است (سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۷۹).

۲-۴-۱- تعریف ترک های خستگی

خرابی رویه های آسفالتی می تواند به علت خستگی ناشی از تکرار بارگذاری باشد. با گذشت زمان و در

¹ Pirabarooban et al.

² Liden et al.

اثر بارگذاری، سطح رویه به دلیل ایجاد تغییر شکل و ترک خوردگی، ناهموارتر می گردد. بررسی روسازی ها نشان می دهد که اگر چه خرابی روسازی ها با عمر آن ها متناسب است اما این تناسب خطی نیست، به طوری که در اوایل عمر روسازی شدت خرابی ها کم بوده و با گذشت زمان بر شدت آن ها افزوده می شود (آذر هوش، ۱۳۸۹).

در حالت کلی خرابی روسازی در دو گروه عمده تقسیم بندی می شوند:

- خرابی سازه ای
- خرابی سطحی یا عملکردی

۲-۴-۲ مکانیزم بروز ترک خوردگی براساس تئوری کلاسیک

مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر خستگی یکی از مهمترین خصوصیات مصالح آسفالتی می باشد که در طراحی روسازی انعطاف پذیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زمانی که یک روسازی انعطاف پذیر تحت تاثیر بارهای مکرر ناشی از وسایل نقلیه قرار می گیرد، لایه روسازی به صورت یک تیر خمشی عمل نموده و در زیر بار چرخ و در سطح روسازی، تنش های فشاری و در پایین ترین لایه آسفالتی، تنش ها و کرنش های کششی به وجود می آید. چنانچه تنش ها و کرنش های کششی ناشی از تکرار بارگذاری وسایل نقلیه در زیر لایه های آسفالتی از تنش های مجاز کششی آن لایه تجاوز نماید، منجر به ایجاد ترکهایی در زیر لایه آسفالتی می گردد که نهایتاً به سطح روسازی انتقال می یابد. از تجمع و بهم پیوستن این ترک ها در سطح روسازی، ترک های پوست سوسماری یا ترکهای خستگی به وجود می آید.

شکل ۱-۲ نشان می دهد که هنگام عبور وسایل نقلیه بر روی روسازی، حرکت بارهای چرخ باعث می شود که حالت تنش قسمت های بالا و پایین لایه روسازی به سرعت از حالت کشش به فشار تغییر کند.

طبق تئوری الاستیک بیشترین تنش در زیر لایه رویه ایجاد می شود (خالید و همکاران^۱، ۲۰۰۳).



شکل ۱-۲ شیار شدگی با شدت زیاد (www.pavementinteractive.org)

بیشتر محققین براین باورند که ترک ها ابتدا در زیر لایه رویه پدید آمده و سپس به سمت بالا رشد می کنند. در اغلب مراحل طراحی، عمر خستگی روسازی جدید با در نظر گرفتن تنش ها یا کرنش های کششی در زیر لایه آسفالتی تعیین می شوند. در این روند فرض بر این است که ترکهای خستگی در زیر لایه های آسفالتی ایجاد شده و به صورت قائم و به سمت بالای سطح روسازی پخش می شوند. این ترک ها در واقع به علت اثر تنش های ایجاد شده در تماس تایلر با روسازی و در زیر تاثیر پدید می آید (آذر هوش، ۱۳۸۹).

۲-۴-۳- عوامل موثر بر عمر خستگی روسازی آسفالتی

عوامل و پارامترهای متعددی می توانند بر رفتارهای خستگی مخلوط آسفالتی تاثیر گذار باشند. این

موارد عبارتند از:

¹ Khalid et al.

- ضخامت لایه آسفالتی
- نوع بارگذاری (کنترل تنش، کنترل کرنش)
- شکل فرکانس و دوره استراحت در بارگذاری
- تراکم مخلوط آسفالتی
- خصوصیات مخلوط آسفالتی از جمله فضای خالی، درصد و مشخصات قیر، نوع، شکل و دانه بندی مصالح و فیلر، سختی مخلوط، شرایط محیطی.

۲-۵- خرابی های ناشی از رطوبت

خرابی های ناشی از رطوبت برای اولین بار در اوایل قرن بیستم میلادی مشاهده شد و تاکنون به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل مخرب روسازی های آسفالتی مطرح است. یکی از اثرات مهم رطوبت کاهش مقاومت در طی زمان است که می تواند موجب خرابی های سطحی نظیر شیار خوردگی، اعوجاج، کشیدگی و ترک خوردگی ناشی از خستگی در آسفالت شود (کلاسن و همکاران^۱، ۱۹۹۷). علت اصلی حساسیت رطوبتی که در نهایت منجر به اضمحلال روسازی می گردد به طور کلی می تواند به دو مکانیزم اصلی تفکیک شود:

- کاهش پیوستگی
- کاهش چسبندگی

کاهش چسبندگی در اثر نفوذ آب میان قیر و سنگدانه بوجود می آید که عریان شدگی مصالح سنگی از

¹ Classen et al.

لایه قیر را به همراه دارد. کاهش پیوستگی در اثر نرم شدن قیر در مخلوط آسفالتی به وجود می آید. ممکن است دو مکانیزم به طور همزمان در روسازی ایجاد شود و حساسیت رطوبتی را در مخلوط آسفالتی به وجود آورد. علاوه بر این موارد، آسیب رطوبتی ممکن است تابعی از چند عامل دیگر مانند تغییر در چسبنده های قیری، کاهش مقدار قیر همراه با افزایش ترافیک عبوری، تغییر در کیفیت مصالح و سنگدانه ها و کنترل کیفیت ضعیف در اجرا باشد.

۲-۵-۱- دوام در آسفالت

منظور از دوام در مخلوط آسفالتی، مقاومت آنها در برابر عوامل جوی و افزایش عمر روسازی است. مخلوط های آسفالتی که در اثر تغییرات رطوبت یا دما ترک خورده و یا شکسته و خورد می شوند، نباید در لایه های روسازی به ویژه قشر رویه مصرف شوند.

در مخلوط آسفالتی متداول، عریان شدگی سنگدانه ها از اندود قیری پدیده ای است که به علت تاثیرات رطوبت بر مخلوط آسفالتی به وجود می آید. برای مقابله با این خرابی باید خاصیت چسبندگی قیر و مصالح سنگی بهبود یابد. روش های بهبود خاصیت چسبندگی قیر و مصالح سنگی عبارتند از:

- افزایش ضخامت اندود قیری
- مصرف قیر اصلاح شده (قیر اصلاح شده با استفاده از مواد افزودنی از قبیل ضد عریان شدگی)
- استفاده از افزودنی ها به قیر
- استفاده از در صد قیر بیشتر (برای مواردی که درصد قیر مصرفی کمتر از در صد قیر بهینه باشد)

۲-۵-۲- روش های جلوگیری از پدید آمدن خرابی رطوبتی

روش های کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی برای جلوگیری از خرابی عبارتند از (ایپس و

همکاران^۱، ۲۰۰۳):

- پوشش دار کردن سنگدانه ها
- هوازگی سطح سنگدانه ها
- تغییر در مصالح
- تغییر در طرح اختلاط و اجرا
- استفاده از افزودنی های ضد عریان شدگی

۲-۶-۲- مروری بر تحقیقات و کارهای انجام شده در زمینه

استفاده از مواد ضایعاتی در آسفالت

۲-۶-۱- ضایعات پلی اتیلن ترفتالات^۲

در تحقیقی به بررسی امکان استفاده از ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (PET) در مخلوط های آسفالتی جهت کاهش معضلات زیست محیطی در زمینه بازیافت و دفن این مواد و تاثیر آن بر ویژگی مخلوطهای آسفالتی می پردازد. برای این منظور، مشخصات مکانیکی مخلوطهای تهیه شده با پلی اتیلن ترفتالات با نمونه های شاهد مورد مقایسه قرار گرفتند. در این تحقیق پارامترهای مقاومت مارشال^۳، روانی، نسبت

¹ Epps et al.

² Polyethylene Terephthalate (PET)

³ Marshall stability

مارشال^۱ و نسبت مقاومت به روانی مورد بررسی قرار گرفت (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷).

در این پژوهش مواد PET به دو شکل مورد استفاده قرار می گیرد:

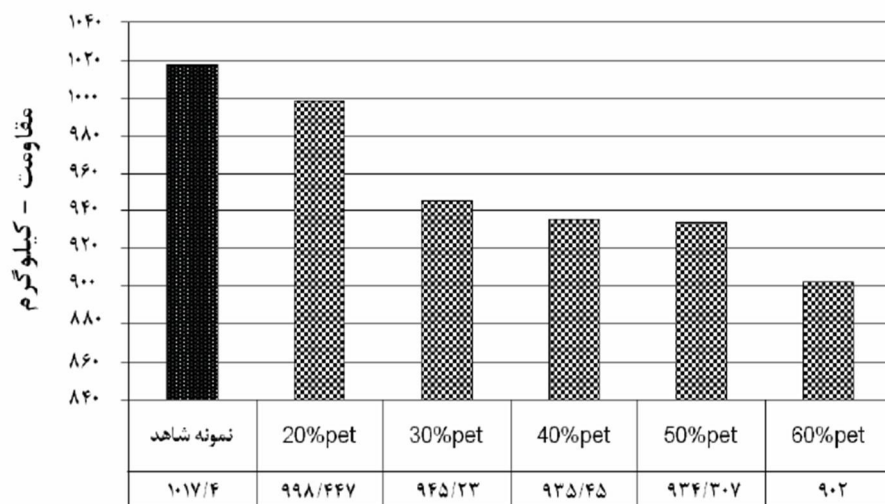
الف) گرانول (PET): بصورت دانه های با قطر حدود ۳ میلیمتر که با مقادیر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد، جایگزین مصالح سنگی هم اندازه (مانده روی الک شماره ۸ با سایز ۲/۳۶-۴/۷۵ میلیمتر) شده اند.

ب) چیپس (PET): به خرده های بطری که توسط دستگاه آسیاب تهیه می شوند اصطلاحاً چیپس PET گفته می شود. چیپسهای استفاده شده در این آزمایشات، پولکهای عبوری از صافی با قطر ۱۲ میلیمتر بوده اند. چیپسهای PET با در صد های ۱، ۳ و ۵ (نسبت به وزن کل مخلوط) به مخلوط اضافه شده اند.

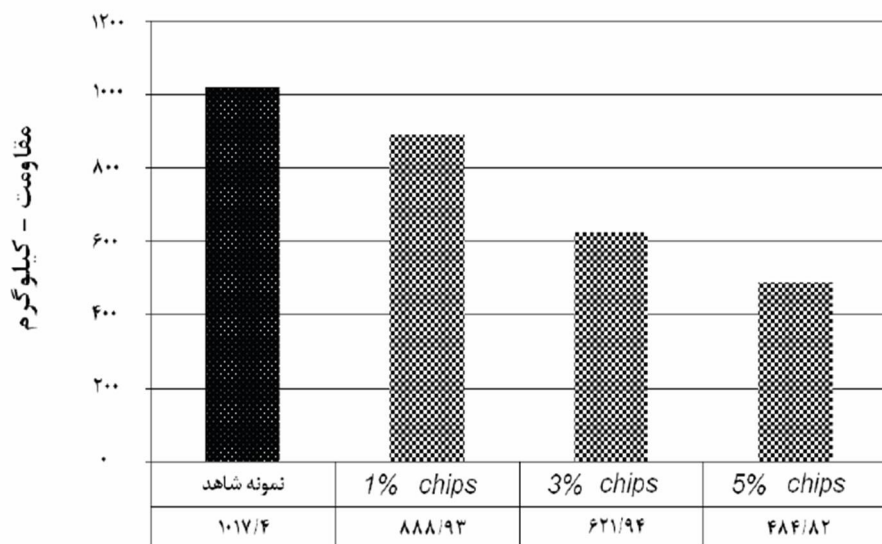
شکل ۲-۲ نتایج مقاومت مارشال را برای نمونه های شاهد و دارای گرانول PET نشان می دهد. در مخلوط های دارای گرانول PET، همانطور که ملاحظه می شود با افزایش مقدار PET در مخلوط آسفالتی مقدار مقاومت مارشال کاهش می یابد. این کاهش مقاومت در هنگام افزایش درصد گرانولهای PET ممکن است بخاطر کمتر بودن اصطکاک داخلی گرانولهای PET نسبت به مصالح سنگی باشد. همانطور که مشاهده می شود بیشینه مقاومت نمونه های دارای گرانول PET مربوط به نمونه های ۲۰ درصدی می باشد که باعث کاهش ۱/۸ درصدی مقاومت مارشال گردیده است این در حالی است که میزان مقاومت این نمونه، علیرغم این کاهش، هنوز هم حدود ۲ برابر حداقل مقاومت مجاز آیین نامه ایران است.

در شکل ۲-۳ مشاهده می شود که با افزودن چیپسهای PET، مقدار مقاومت بطور قابل توجهی کاهش می یابد بنظر می رسد اصلی ترین دلیل این موضوع، پولکی بودن دانه های چیپس PET باشد.

¹ Marshall Quotient (MQ)



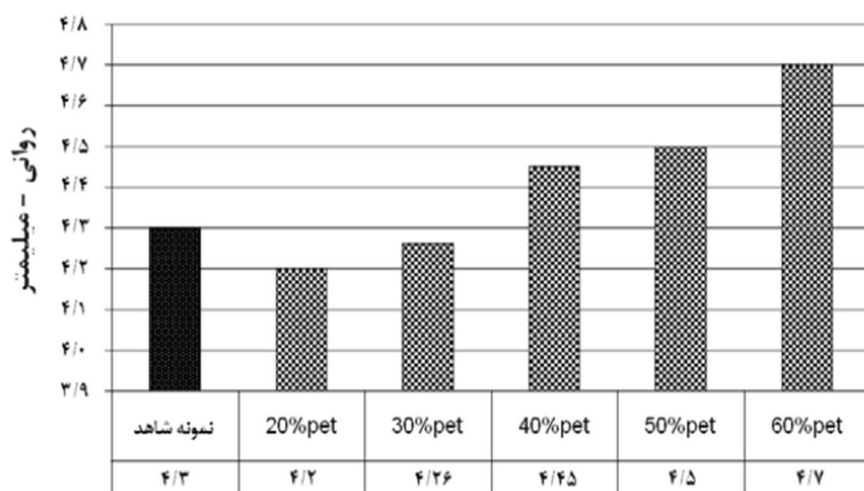
شکل ۲-۲ نتایج مقاومت مارشال برای آزمایش جایگزینی گرانول PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)



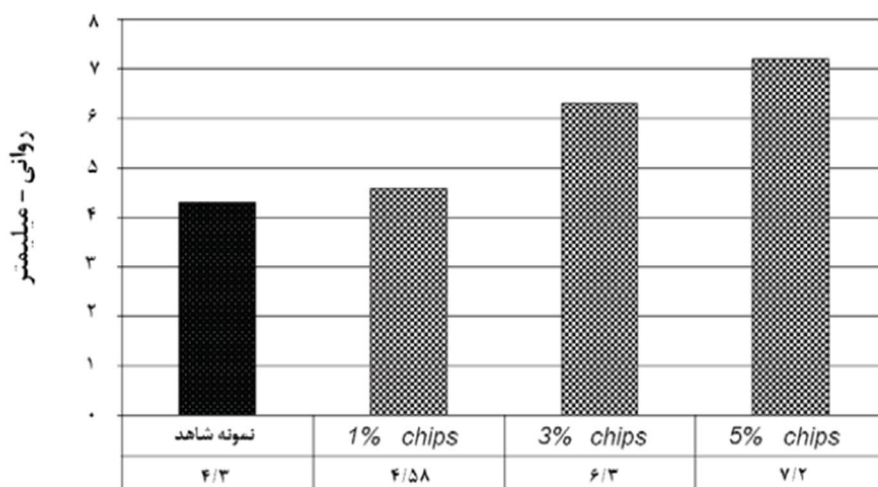
شکل ۳-۲ نتایج مقاومت مارشال برای آزمایش افزودن چپس PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)

شکل ۴-۲ مقدار روانی را برای نمونه شاهد و نمونه های دارای گرانول PET نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمونه های حاوی ۲۰٪ گرانول PET دارای کمترین میزان روانی هستند. ولی با بیشتر شدن درصد جایگزینی گرانول، مقدار روانی در حال افزایش است. بنظر می رسد کاهش روانی در نمونه های حاوی ۲۰٪ به دلیل چسبندگی بهتر گرانولهای PET و قیر به یکدیگر است. ولی با افزایش میزان جایگزینی گرانول، عامل اصطکاک داخلی به چسبندگی غلبه می کند.

با توجه به شکل ۲-۵ مشاهده می شود در نمونه های حاوی چیپس PET، مقدار روانی نیز همانطور که انتظار می رفت، افزایش قابل ملاحظه ای داشته که مانند پارامتر مقاومت، پولکی بودن چیپسهای PET می تواند دلیل آن باشد.



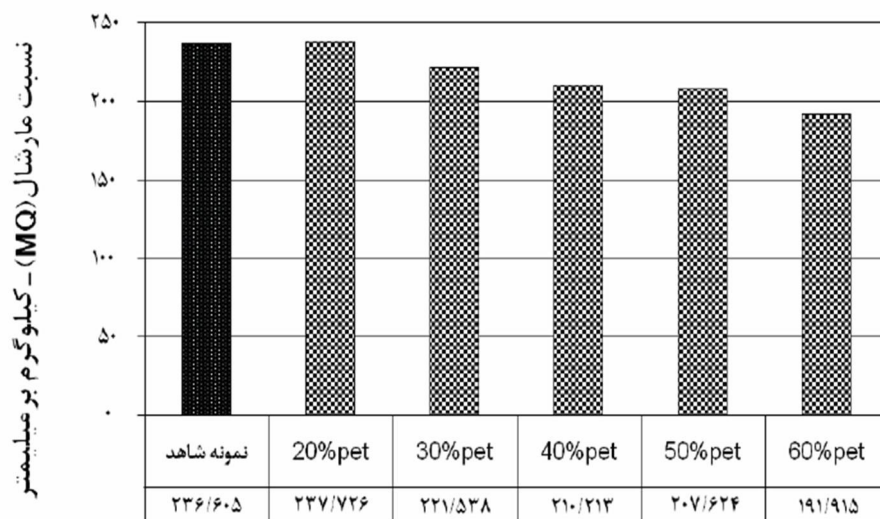
شکل ۲-۴ مقایسه روانی نمونه ها با درصدهای مختلف گرانول PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)



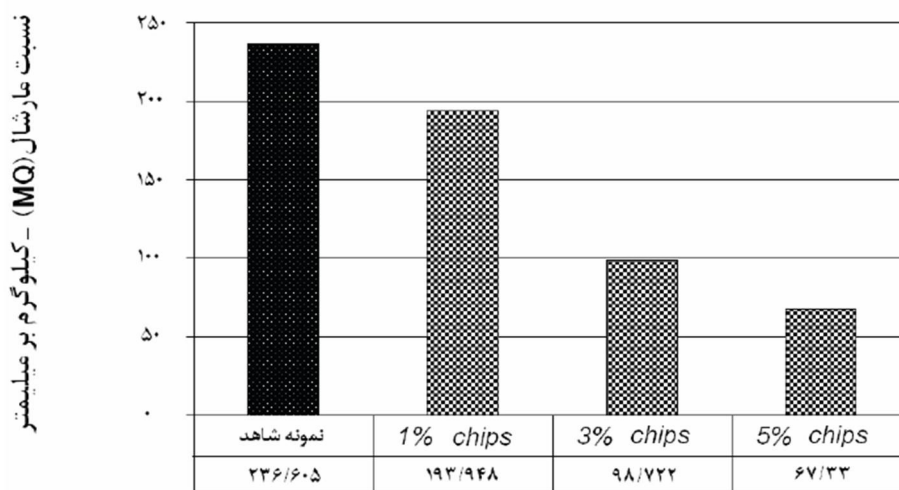
شکل ۲-۵ مقایسه روانی نمونه ها با درصدهای مختلف چیپس PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)

از آنجا که نسبت مارشال، نسبت پایداری به تغییر شکل را بیان می کند، هر اندازه این میزان بیشتر

باشد، مخلوطی مستحکمتر و با قابلیت بارگذاری بیشتر و در عین حال انعطاف پذیرتر بدست می آید (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷). مقادیر نسبت مارشال برای نمونه های شاهد، دارای گرانول PET و همچنین نمونه های دارای چیپس PET در شکلهای ۲-۶ و ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ مقایسه نسبت مارشال با درصدهای مختلف گرانول PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)



شکل ۲-۷ مقایسه نسبت مارشال با درصدهای مختلف چیپس PET (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷)

نتایج این تحقیقات نشان می دهد که جایگزینی گرانولهای PET، با ۲۰ درصد سنگدانه های هم اندازه

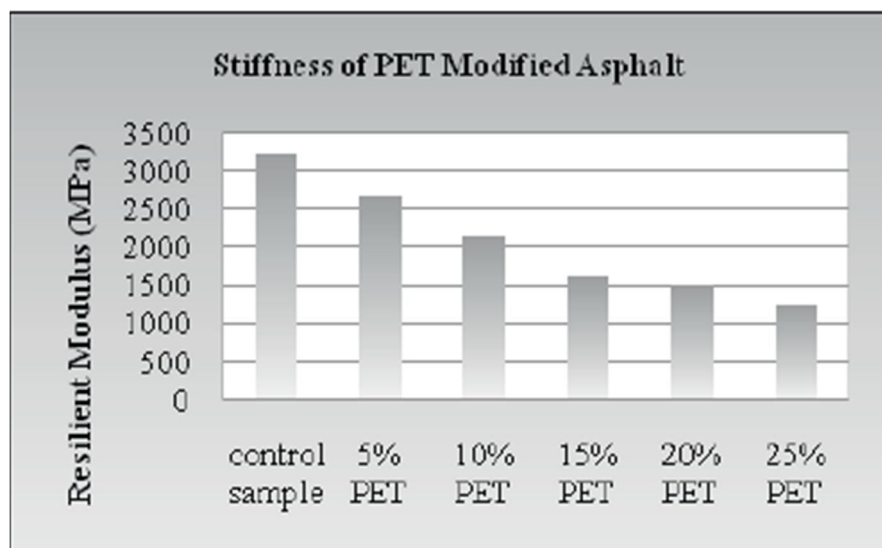
(مانده روی الک شماره ۸)، باعث کاهش ۲/۸ درصدی وزن مخصوص می شود. در این مخلوط، مقدار روانی نیز نسبت به مخلوط شاهد کاهش می یابد. اگرچه جایگزینی گرانولهای PET باعث کاهش ۱/۸ درصدی مقاومت مارشال گردید، لیکن مقدار نسبت مارشال، تقریباً با مخلوطهای شاهد برابری می کند. (امیر عابدین مقانکی و همکاران، ۱۳۸۷).

در پژوهشی دیگر از ضایعات PET به عنوان جایگزین ریز دانه هم اندازه با سایز ۱/۱۸ تا ۲/۳۶ میلیمتر و با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ در صد وزن مخلوط آسفالتی استفاده شد. و آزمایش های مدول برجهندگی و تغییر شکل دائم بر روی مخلوط آسفالتی صورت گرفت. همانطور که در شکل ۲-۸ مشاهده می شود نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیر مستقیم^۱ (ITSM) نشان داد که مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد با افزایش در صد PET کاهشی بوده است. و افزایش PET در مخلوط آسفالتی علاوه بر این که مدول برجهندگی آن را نسبت به نمونه شاهد افزایش نداده است بلکه باعث کاهش آن شده است (رحمان و همکاران^۲، ۲۰۱۳).

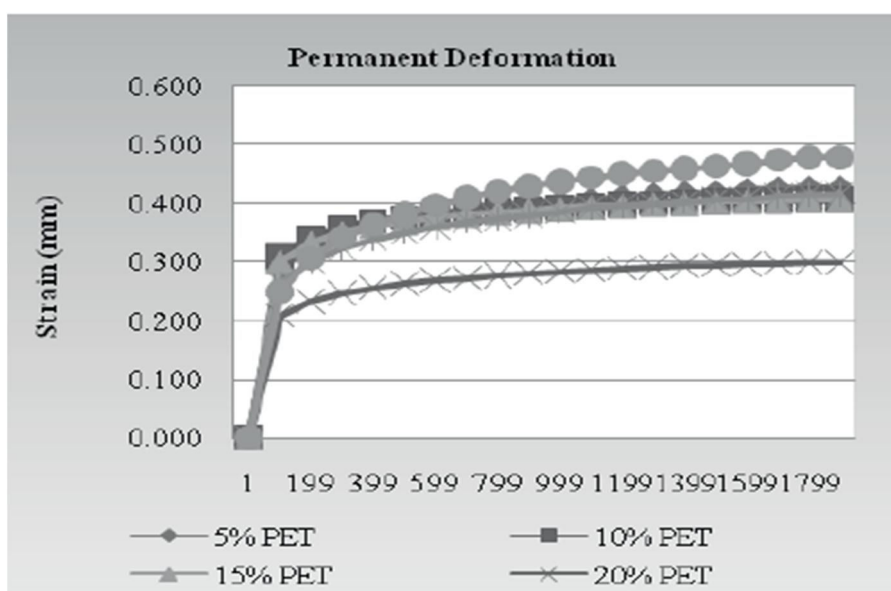
شکل ۲-۹ اثر ۱۸۰۰ سیکل با تنش ۱۰۰ کیلو پاسکال را بر روی نمونه های شاهد و حاوی PET را نشان می دهد. نتایج نشان داد که کمترین تغییر شکل دائم در نمونه های ۲۰ در صدی رخ داده است و وجود PET باعث کاهش تغییر شکل دائم در مخلوط آسفالتی می شود.

¹ Indirect Tensile Stiffness Modulus Test (ITSM)

² Rahman et al.



شکل ۸-۲ مدول برجهدگی نمونه های شاهد و حاوی PET (رحمان و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۹-۲ ویژگی تغییر شکل دائم در نمونه های شاهد و حاوی PET (رحمان و همکاران، ۲۰۱۳)

امیر مدرس و همکاران^۱ اثر استفاده از PET را به عنوان اصلاح کننده قیر بر روی مدول برجهدگی و

^۱ Modarres et al.

خستگی مخلوط آسفالتی در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار دادند. و همچنین اثر استفاده از PET به عنوان اصلاح کننده قیر را با استایرن بوتادین استایرن^۱ مقایسه کردند. PET با در صدهای ۲ تا ۱۰ در صد وزن قیر و به روش خشک به مخلوط آسفالتی اضافه شد. و سپس تست مدول برجهندگی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه ها انجام گرفت. نتایج نشان داد در نمونه های حاوی ۲% مدول برجهندگی نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت اما در حالت کلی با افزایش مقدار PET مقدار مدول برجهندگی نسبت به نمونه های شاهد کاهش یافت. و همچنین در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد اثر مدول برجهندگی برای نمونه های حاوی PET و SBS تقریباً با هم برابر بود، اما در دمای ۵ درجه سانتی گراد SBS باعث کاهش مدول برجهندگی نسبت به PET شده بود. از طرفی هر دو اصلاح کننده باعث بهبود عمر خستگی در مخلوط آسفالتی شد اما نمونه های حاوی SBS رفتار خستگی بهتری را نسبت به نمونه های حاوی PET از خود نشان داد (امیر مدرس و همکاران، الف ۲۰۱۴). و همچنین مدل‌های خستگی و مدول برجهندگی برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با PET ایجاد شد (امیر مدرس و همکاران، ب ۲۰۱۴).

۲-۶-۲- ضایعات پلی پروپیلین^۲ و پلی اتیلن با دانسیته زیاد^۳ و کم^۴

در تحقیقی اثر ضایعات پلاستیک های بازیافتی از جمله پلی پروپیلین، پلی اتیلن با دانسیته زیاد و کم به عنوان اصلاح کننده قیر بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این مواد باعث بهبود مقاومت در برابر شیار شدگی و افزایش مدول برجهندگی در مخلوط آسفالتی می شود (دالهاث و همکاران^۵، ۲۰۱۵). مقدس نژاد و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۴ اثر پلی اتیلن با

^۱ Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

^۲ Polypropylene (pp)

^۳ High-density polyethylene (HDPE)

^۴ Low-density polyethylene (LDPE)

^۵ Dalhat et al.

^۶ Moghadas Nejad et al.

دانسیته زیاد در مخلوط آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این پلی اتیلن باعث افزایش عمر خستگی، مقاومت در برابر شیار شدگی و افزایش مدول برجهنگی می شود. علاوه بر این با افزایش مقدار این پلی اتیلن در مخلوط آسفالتی، مدول برجهنگی، عمر خستگی و مقاومت در برابر شیار شدگی در حال افزایش است و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی نیز افزایش می یابد.

۲-۶-۳- خرده شیشه ها و ضایعات شیشه

در سال های اخیر به دلیل حجم زیاد مواد آلاینده محیط زیست، تحقیقات زیادی بر روی بازیافت و استفاده مجدد ضایعات بازیافتی انجام شده است. طبق تحقیقات صورت گرفته، خرده شیشه ها و ضایعات شیشه حدود ۳ تا ۵ درصد زباله های خانگی را تشکیل می دهد (وو و همکاران^۱، ۲۰۰۵). شیشه یک ماده غیر فلزی و معدنی است که به واسطه ی پخت برخی مواد خام متشکل از سیلیکات و سایر اکسید ها ساخته می شود. شیشه های معمولی شکننده هستند. این خصوصیت فیزیکی برای خرد کردن شیشه ی بازیافتی برای رسیدن به اندازه ی مورد نظر بکار می رود.

اولین استفاده از آسفالت شیشه ای در سال ۱۹۶۰ بود که آمریکا و کانادا از آن برای ساختن جاده هایی به منظور بررسی مقاومت روسازی ها در برابر آب استفاده کردند. حدود ۲۰ سال پیش بود که محققان از خرده شیشه به عنوان سنگدانه در بتن آسفالتی استفاده کردند. از اوائل دهه ۷۰ تا دهه ۸۰ میلادی در شهر بالتیمور^۲ (مریلند، آمریکا) از شیشه برای روسازی بسیاری از پیاده رو ها استفاده کردند. این پیاده رو ها به دلیل قابلیت انعکاس نور شیشه، در شب می درخشیدند (وو و همکاران، ۲۰۰۵).

با انجام آزمایشات کشش غیر مستقیم دینامیکی بر روی مخلوط های آسفالتی معمولی و مخلوط های حاوی خرده شیشه نتایج نشان داد که رفتار دینامیکی مخلوط آسفالتی در نمونه های حاوی خرده شیشه

¹ Wu et al.

² Baltimore city

نسبت به نمونه های معمولی بهبود یافته است (عربانی، ۲۰۱۱). نتایج آزمایش شیار شدگی نشان داده است که ثبات نمونه های با اندازه دانه های شیشه ی ۹.۵ میلی متر کمتر از نمونه های با تکه های شیشه ی ۴.۵ میلی متر است. همچنین میزان سطح پوشیده نشده توسط قیر در نمونه های حاوی خرده شیشه های ۹.۵ میلی متری بیشتر است (و و همکاران، ۲۰۰۵). اندازه ی مناسب شیشه برای آسفالت بتنی به عنوان سنگدانه برابر ۴.۷۵ میلی متر و کوچکتر از آن است (سعید حسامی و همکاران، ۱۳۹۲).

نرخ جذب قیر شیشه نزدیک به صفر است که برای چسبندگی فیلم قیری به تکه های شیشه اصلا مناسب نیست. هرچه اندازه ی تکه های شیشه ی مورد استفاده در آسفالت کوچکتر باشد سطح مخصوص بزرگتری داشته و چسبندگی بهتری با قیر خواهد داشت. اگر اندازه ی تکه های شیشه مورد استفاده در بتن آسفالتی بزرگ باشد می تواند موجب خرابی و سائیدگی جدی تایلر شود و پس از خرد شدن توسط ترافیک عبوری باعث کاهش مقاومت لغزشی روسازی شود (و و همکاران، ۲۰۰۵). زاویه اصطحاک داخلی بیشتر که ناشی از زاویه دار تر بودن تکه های شیشه ای است نقش مهمی را در افزایش مدول سختی مخلوط های حاوی شیشه به عهده دارد. از آن جایی که سطح صاف تکه های شیشه باعث می شود تا قیر به خوبی جذب آن نشود وقتی میزان تکه های شیشه در مخلوط آسفالتی از یک حدی بیشتر شود کاهش مدول سختی را به همراه دارد (عربانی، ۲۰۱۱).

در صد بهینه ی شیشه برای استفاده در بتن آسفالتی ۱۰ تا ۱۵ در صد وزن مخلوط است. البته در بعضی از منابع این مقدار را ۱۰ درصد (و و همکاران، ۲۰۰۵) و در برخی دیگر با توجه به آزمایشات مارشال و کشش غیر مستقیم برای نمونه های با سنگدانه های دانه بندی شده برای توپکا و بیندر، ۱۵ در صد بیان کرده اند (عربانی، ۲۰۱۱).

۲-۶-۴- ضایعات لاستیک

استفاده از ضایعات لاستیک در بتن آسفالتی می تواند به دو روش خشک و تر انجام شود. روش تر به اصلاح قیر با جایگزینی ۵ تا ۲۵ درصد وزنی با خرده لاستیک در درجه حرارت بالا اطلاق می شود. روش خشک شامل مخلوط کردن خرده لاستیک با سنگدانه است (به جای اضافه کردن آن به آسفالت). تفاوت اصلی این دو روش در اندازه ی لاستیک تکه شده، مقدار لاستیک مصرفی، عملکرد لاستیک و امکانات اختلاط می باشد (سعید حسامی و همکاران، ۱۳۹۲).

به دلیل وزن مخصوص کمتر لاستیک نسبت به سایر سنگدانه ها، وزن مخصوص آسفالت تهیه شده از لاستیک بازیافتی، با افزایش میزان لاستیک کاهش می یابد. همچنین به دلیل مقاومت تراکمی پایین تر و خاصیت الاستیسیته ی بیشتر لاستیک، پایداری و روانی آسفالت با افزایش میزان لاستیک کاهش می یابد. البته میزان پایداری و روانی، با توجه به محدوده ی مارشال، هر دو قابل قبول هستند و میزان قیر بهینه به دلیل جذب آب لاستیک، اندکی افزایش خواهد یافت (سعید حسامی و همکاران، ۱۳۹۲).

در پژوهشی که در سال ۲۰۰۹ میلادی، توسط عربانی و همکاران انجام گردید، از دانه بندی توپکا و بیندر برای ساخت نمونه های آسفالتی و روش خشک جهت افزودن لاستیک ضایعاتی به مخلوط آسفالتی استفاده گردید. براساس نتایج این پژوهش افزودن خرده لاستیک ضایعاتی به صورت قابل ملاحظه ای توانایی نمونه های آسفالتی را در برابر پدیده شیار شدگی افزایش می دهد. دلیل این امر تاثیر لاستیک بر خصوصیات سختی نمونه ها و قیر مصرفی و همچنین تغییر در بافت نمونه ها عنوان گردید. تاثیر کم تغییرات دما بر روی خصوصیات نمونه های آسفالتی و همچنین افزایش انعطاف پذیری از دیگر نتایج بدست آمده در این پژوهش بوده است.

۲-۶-۵- سنگدانه های بتن بازیافتی^۱

سنگدانه های بتن بازیافتی از خرد کردن اجزای بتنی بدست می آیند. به دلیل سیمان چسبیده شده به آنها، این سنگدانه ها دارای خصوصیات شیمیایی و مکانیکی متفاوتی نسبت به سنگدانه های طبیعی دارد. همچنین سیمان چسبیده شده به سنگدانه ها که تخلخل زیادی هم دارد، باعث می شود تا سنگدانه های بتن بازیافتی مقاومت سایشی و چگالی کمتری را نسبت به سنگدانه های طبیعی داشته باشند، و ظرفیت جذب آب آنها را افزایش می دهد. سنگدانه های بتن بازیافتی در بسیاری از زمینه های حمل و نقل مانند سنگدانه ی اساس، سنگدانه ی بتن سیمان پرتلند، در روسازی محصور شده و محصور نشده مورد استفاده قرار گرفته است (سعید حسامی و همکاران، ۱۳۹۲). سنگدانه های بتن بازیافتی ابتدا به عنوان مصالح پر کننده استفاده می شد ولی اکنون از این مواد در راهسازی به عنوان مصالح زیر اساس و همچنین در عضوهای غیر سازه ای مانند جدول کنار راه، پیاده رو ها استفاده می شود. با این حال، به دلیل تحقیقات اندکی که بر روی سازگاری RCA با مخلوط آسفالتی صورت گرفته است، از RCA در مخلوط آسفالتی کمتر استفاده شده است. در میان مواد مختلف زائد ساختمانی، بتن قابل توجه ترین ماده برای سنگدانه های بازیافتی است (لی^۲، ۲۰۰۲). در کشور های اروپایی و کشورهایمانند استرالیا و ژاپن به دلیل کمبود سنگدانه های طبیعی و منابع قرضه، استفاده از بتن بازیافتی در پروژه های عمرانی حدود ۲۰ سال رایج است (سعید حسامی و همکاران، ۱۳۹۲).

در تحقیقی نمونه های مخلوط آسفالتی، برای لایه رویه، حاوی ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد RCA، ساخته شدند. نتایج نشان داد که نمونه های حاوی ۱۰ تا ۲۰ درصد RCA، نسبت مارشال بیشتری در مقایسه با نمونه های دیگر دارند ولی نمونه های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد، مقادیر کمتری دارند. نسبت

^۱ Recycled concrete aggregates (RCA)

^۲ Li w

مارشال بیشتر نشان دهنده ی نمونه با سختی بیشتر و مقاومت بیشتر در مقابل تغییر شکل‌های ماندگار است. همچنین مدول ارتجاعی برای نمونه با ۱۰ درصد RCA، بیشتر از سایر نمونه ها بدست آمد و در درصد های بیشتر، با افزایش درصد RCA، مدول ارتجاعی کاهش پیدا کرد. نمونه های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد RCA مقاومت بیشتری در مقابل تغییر شکل های ماندگار نسبت به در صدهای دیگر بتن بازیافتی دارند (اکتاس و همکاران^۱، ۲۰۱۲). اما در حالت کلی نمونه های شاهد تغییر شکل ماندگار کمتر و مدول ارتجاعی بیشتری را نسبت به نمونه های دارای RCA از خود نشان دادند (پارانائویتانا^۲، ۲۰۰۶؛ رادویک^۳، ۲۰۱۷).

۲-۶-۶- ضایعات پلی اتیلن کراس لینک در روسازی بتنی

روسازی بتن غلتکی (RCCP)^۴ یکی از انواع روسازی بتنی است که به دلیل روش اجرای آسان و عدم نیاز به آرماتور فولادی، مدت ها است که مورد توجه قرار گرفته است. RCCP برخلاف سایر روسازی‌های بتنی به اندازه‌ای خشک است که می‌توان در زمان اجرا آن را به وسیله‌ی غلتک متراکم کرد. با توجه به رشد ضایعات صنایع، محققین به استفاده از این ضایعات در روسازی بتن غلتکی گرایش پیدا کرده اند. سالانه مقدار زیادی سیم و کابل فشارقوی برق تولید می‌شود که این تولیدات مقدار زیادی ضایعات دارد. یکی از این ضایعات مربوط به پلی‌اتیلن کراس لینک (XLPE) است که در این سال‌ها به سرعت در حال افزایش است. در واقع XLPE ماده‌ای تجزیه‌ناپذیر است که به عنوان عایق کابل‌های فشارقوی برق استفاده می‌شود. در تحقیقی امکان استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگ‌دانه در مخلوط RCCP مورد ارزیابی قرار گرفته است. ضایعات XLPE به عنوان سنگ‌دانه با نسبت های حجمی مختلف جایگزین درشت‌دانه

¹ Ektas et al.

² Parनावithana et al.

³ Radevic et al.

⁴ Roller Compacted concrete Pavement

طبیعی مخلوط بتنی شده است. این جایگزینی با درصدهای حجمی ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ انجام شده است. در ادامه وزن مخصوص، مدت زمان تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خمشی برای درصدهای آزمایش و نمونه‌های شاهد اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد استفاده از ضایعات XLPE ویژگی‌های بتن تازه و بتن سخت شده را تغییر می‌دهد. ضایعات XLPE سبب کاهش وزن مخصوص و مدت زمان تراکم می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که جایگزینی ۵ درصد حجمی درشت‌دانه با ضایعات XLPE، سبب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزهی RCCP شده است. علاوه بر این، مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه این مخلوط بتنی از حداقل مقاومت‌های فشاری و خمشی تعیین شده در آیین‌نامه روسازی بتن غلتکی بیشتر شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها استفاده از ضایعات XLPE در درصدهای بیشتر از ۵ درصد حجمی درشت‌دانه در بتن غلتکی، برای مسیرهایی با ترافیک سبک، محوطه‌های صنعتی، مسیرهای فرعی و راه‌های روستایی و پیاده‌روها توصیه شده است. همچنین استفاده از ضایعات XLPE همواره سبب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی RCCP شده است. در مجموع، استفاده از ضایعات XLPE در RCCP از وارد شدن این ضایعات به محیط‌زیست جلوگیری کرده و نیاز به سنگ‌دانه طبیعی را نیز کاهش می‌دهد و سبب کاهش هزینه محل‌های دفن زباله و ذخیره انرژی می‌شود (شمسایی، ۱۳۹۵).

فصل سوم

مصالح مصرفی، طرح اختلاط و روش انجام

آزمایش‌ها

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

۳-۱-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه مورد استفاده در این مطالعه، از ترکیب سنگ کوهی و پایه آهکی است. بدین صورت که سنگدانه های درشت دانه (بالای الک ۴) از مصالح پایه آهکی و سنگدانه های ریزدانه (زیر الک ۴) از نوع ماسه کوهی انتخاب شده است. سنگدانه های پایه آهکی از معدن سیدون در ۲۰ کیلومتری شهرستان شاهرود و سنگدانه های کوهی از کارخانه آسفالت راه سازان کویر واقع در شهر میامی استان سمنان تهیه شده است. سنگدانه های مصرفی در شکل ۳-۱ و مشخصات آنها در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شده است.



شکل ۳-۱ سنگدانه های مصرفی

جدول ۳-۱ مشخصات مصالح سنگی

ویژگی	استاندارد	واحد	نتایج
سایش لس آنجلس	ASTM-D131	%	۲۵
وزن مخصوص درشت دانه	ASTM-C127	g/cm ³	۲/۶۸
جذب آب درشت دانه	ASTM-C127	%	۰/۵۸
درصدافت وزنی با سولفات سدیم(درشت دانه)	ASTM-C88	%	۱/۵
درصد شکستگی	ASTM-D5821	%	۶۱
ارزش ماسه ای	ASTM-D2419	%	۷۸
وزن مخصوص ریز دانه	ASTM- C128	g/cm ³	۲/۷۱
جذب آب ریز دانه	ASTM-C128	%	۲/۲
وزن مخصوص فیلر	ASTM-C188	g/cm ³	۲/۷۳
درصد افت وزنی با سولفات سدیم(ریزدانه)	ASTM-C88	%	۱/۸

۳-۱-۱-۱- دانه بندی سنگدانه ها

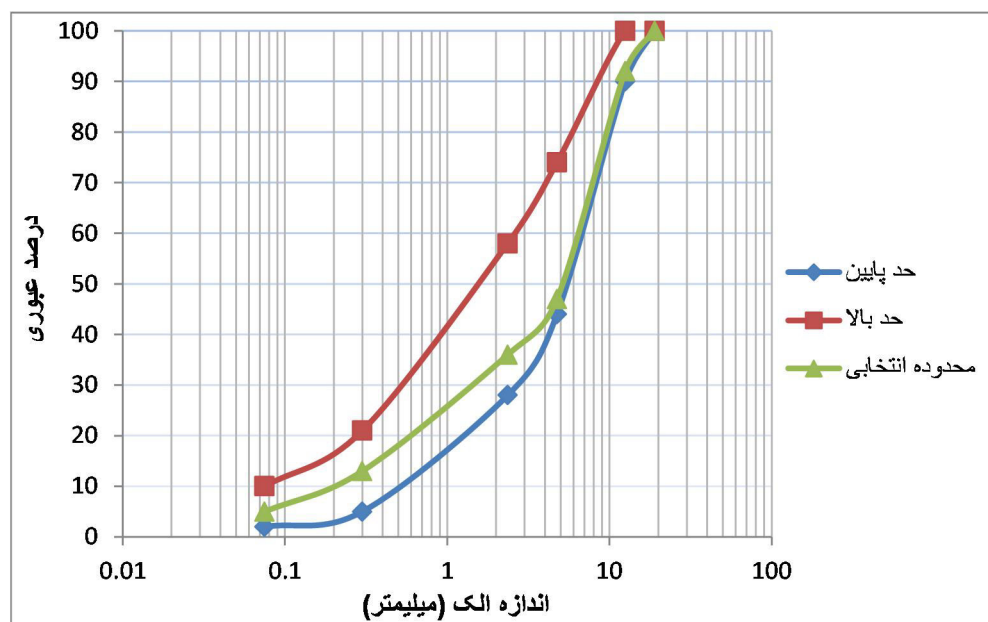
دانه بندی مصالح سنگی یکی از مهمترین عواملی است که بر روی استقامت و ظرفیت باربری آسفالت تاثیر می گذارد. دانه بندی مصالح سنگی با انجام آزمایش دانه بندی و رسم منحنی دانه بندی مشخص می شود. دانه بندی مناسب مصالح سنگی آسفالت با توجه به عوامل متعددی از قبیل: نوع روسازی، نوع و محل قرار گرفتن لایه مورد نظر در سیستم روسازی، ضخامت لایه آسفالتی و اندازه بزرگترین دانه انتخاب می شود. حدود دانه بندی های مناسب در هر مورد توسط آیین نامه مشخص می شوند که معمولا به صورت دو منحنی حدی هستند که منحنی دانه بندی مصالح سنگی 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 نوع دانه بندی، به یکی از سه نوع: توپر، توخالی (باز)، و یک اندازه تقسیم نمود.

دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش، دانه بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر و با توجه به ستون ۴ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ است. آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شد. دانه بندی مصالح سنگی در جدول ۳-۲ قابل مشاهده است. و منحنی دانه بندی نیز در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲ دانه بندی مصالح سنگی

شماره دانه بندی اندازه الک	درصد وزنی رد شده ازهر الک	درصد وزنی رد شده ازهر الک انتخابی
۱۹ میلیمتر	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلیمتر	۹۰-۱۰۰	۹۲
۴/۷۵ میلیمتر	۴۴-۷۴	۴۷
۲/۳۶ میلیمتر	۲۸-۵۸	۳۶
۰/۳ میلیمتر	۵-۲۱	۱۳
۰/۷۵ میلیمتر	۲-۱۰	۵



شکل ۳-۲ منحنی دانه‌بندی

۳-۱-۱-۲- وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت‌دانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت‌دانه از استاندارد ASTM C127 استفاده شده است. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل موردنیاز شامل ترازو، سبد سیمی با سوراخ‌های ۳/۳۵ میلی‌متری یا ریزتر، مخزن آب و الک‌های استاندارد است. ابتدا نمونه‌ها را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک کرده، سپس آن را برای ۱ تا ۳ ساعت در دمای محیط قرار داده تا خنک شود. سپس سنگ‌دانه‌ها برای ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها را از آب بیرون آورده و روی یکپارچه جاذب رطوبت پهن کرده تا لایه سطحی آب رو سنگ‌دانه‌ها از بین برود. وزن نمونه را که در حالت اشباع با سطح خشک^۱، اندازه‌گیری کرده و بلافاصله پس از تعیین وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، نمونه را درون سبد سیمی قرار داده و وزن ظاهری آن در آب ۲۱ تا

¹ Saturated Surface Dry (SSD)

۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شود. سپس نمونه را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک نموده و ۱ تا ۳ ساعت در هوای محیط خنک می‌شود. در پایان وزن خشک نیز ثبت می‌شود. با داشتن ۳ وزن ذکرشده، با استفاده روابط موجود در استاندارد ASTM C127 وزن مخصوص‌ها و درصد جذب آب به دست می‌آید.

۳-۱-۱-۳- وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه از استاندارد ASTM C128 استفاده شده است. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، پیکنومتر، قالب مخروطی ناقص و میله متراکم کننده مخصوص است. در روش انجام آزمایش ابتدا نمونه در یک ظرف مناسب تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. پس از سرد شدن نمونه، سنگ‌دانه‌های ریز به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور قرار داده شده‌اند. در ادامه آب اضافی روی سنگ‌دانه‌ها به‌طوری‌که ریزدانه‌ها بیرون ریخته نشوند، تخلیه می‌شود. نمونه را روی یک سطح صاف و غیر جاذب پهن و صاف‌کرده و در معرض جریان هوای گرم قرار داده می‌شود. این کار تا زمانی که نمونه به حالت اشباع با سطح خشک می‌رسد ادامه می‌یابد. برای اطلاع از دستیابی به این حالت، مخروط قالب رو یک سطح صاف و غیر جاذب رطوبت از طرف قطر بزرگ قرار داده می‌شود. قسمتی از ریزدانه‌ها را به صورت سست داخل مخروط ریخته تا از مخروط سرریز کند. سنگ‌دانه‌های ریز به آرامی با ۲۵ ضربه درون قالب مورد تراکم قرار داده می‌شود. برای هر ضربه میله تقریباً از فاصله ۵ میلی‌متری روی سنگ‌دانه‌ها رها می‌شود. ماسه سست از روی قالب کنار زده شده و قالب به صورت عمودی بالا کشیده می‌شود. اگر سنگ‌دانه‌ها رطوبت سطحی داشته باشند به شکل قالب مانده و چنانچه ریزش کمی داشته باشند، یعنی ریزدانه به حالت اشباع با سطح خشک رسیده است. در ادامه قسمتی از پیکنومتر را با آب پرکرده و مقدار

۵۰۰ گرم از ریزدانه اشباع با سطح خشک را درون آن ریخته و با افزودن آب پیکنومتر تا ۹۰ درصد حجم آن پر می‌شود. سپس پیکنومتر به صورت دستی تکان داده شده و ۲۰ دقیقه منتظر مانده تا حباب‌ها خارج شود و تا خط نشانه پر می‌شود. وزن نمونه حاوی آب و ریزدانه ثبت می‌شود. سپس سنگ‌دانه‌های ریز را از پیکنومتر خارج کرده و در دمای ۱۱۰ درجه خشک می‌شوند. پس از سرد شدن نمونه وزن خشک ریزدانه‌ها نیز ثبت می‌شود. وزن پیکنومتر با آب نیز ثبت می‌شود. با داشتن وزن‌های ذکر شده و با استفاده از روابط استاندارد ASTM C128 وزن مخصوص‌های مورد نیاز و درصد جذب آب ریزدانه‌ها به دست می‌آید.

۳-۱-۱-۴- سایش لس آنجلس^۱ (ASTM-D131)

در این آزمایش مقاومت ساییدگی دانه‌های سنگی درشت‌دانه کوچک‌تر از ۳۷/۵ میلی‌متر به وسیله دستگاه لس آنجلس انجام می‌شود. ابتدا به کمک جدول ۳-۳ یکی از دانه‌بندی‌های مشخص شده انتخاب می‌شود. سپس با توجه به دانه‌بندی انتخاب‌شده، از جدول ۳-۴ تعداد گلوله‌ها تعیین می‌شود.

جدول ۳-۳- دانه‌بندی‌های انتخابی

وزن نمونه به گرم				اندازه غربال به میلی‌متر	
D	C	B	A	مانده روی غربال	رد شده از غربال
-	-	-	۱۲۵۰±۲۵	۲۵	۳۷/۵
-	-	-	۱۲۵۰±۲۵	۱۹/۱	۲۵
-	-	۲۵۰۰±۱۰	۱۲۵۰±۱۰	۱۲/۵	۱۹/۱
-	-	۲۵۰۰±۱۰	۱۲۵۰±۱۰	۹/۵	۱۲/۵
-	۲۵۰۰±۱۰	-	-	۶/۳	۹/۵
-	۲۵۰۰±۱۰	-	-	۴/۷۵	۶/۳
۵۰۰±۱۰		-	-	۲/۳۶	۴/۷۵

^۱ Los Angeles

جدول ۳-۴- انتخاب تعداد گلوله‌ها برحسب دانه‌بندی

دانه بندی گروه A	۱۲ گلوله
دانه بندی گروه B	۱۱ گلوله
دانه بندی گروه C	۸ گلوله
دانه بندی گروه D	۶ گلوله

طبق جدول دانه‌بندی B انتخاب شد. سپس مصالح عبوری از الک مشخص شده را شسته و روی ترازو به اندازه ۵ کیلوگرم وزن می‌کنیم. نمونه وزن شده را داخل دستگاه ریخته و به کمک جدول ۳-۴ تعداد ۱۱ گلوله انتخاب می‌شود. دستگاه لس‌آنجلس دارای یک دریچه در بالا برای ریختن نمونه و گلوله‌ها و یک سینی برای ریختن نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش است. بعد از ۵۰۰ دور چرخیدن دستگاه، استوانه را می‌چرخانیم و نمونه را به همراه گلوله‌ها روی سینی ریخته و پس از جدا کردن گلوله‌ها نمونه را با الک نمره ۱۲ الک می‌کنیم. و مانده روی این الک را دوباره شسته و توسط ترازو وزن می‌کنیم. درنهایت به کمک رابطه ۳-۱، درصد سایش مصالح مشخص می‌شود.

$$\text{درصد سایش} = \frac{\text{وزن نهایی} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن نهایی}} \times 100 \quad (1-3)$$

۳-۱-۱-۵- ارزش ماسه‌ای (ASTM-D2419)

آزمایش ارزش ماسه‌ای به اختصار هم‌ارز ماسه^۱ را که در تعیین مرغوبیت مصالح جهت راه‌سازی، بتن‌سازی، آسفالت و لایه‌های زهکشی و... به کار میرود، می‌توان مکمل آزمایش دانه‌بندی دانست و عملاً برای تعیین نسبت حجم ماسه به کل حجم خاک (ماسه، لای و رس) و همچنین تعیین میزان جذب آب ریزدانه و تورم آن‌هاست و به‌طور خلاصه تعیین می‌نماید که ماسه تا چه حد تمیز است. هرچه درصد ریزدانه داخل ماسه‌ها کمتر باشد، ماسه تمیزتر است. این مقدار برای لایه رویه آسفالتی باید حداقل ۵۰

¹ Sand Equivalent (S.E)

باشد.

آزمایش بر روی دانه‌های کوچک‌تر از $4/75$ میلی‌متر (الک شماره ۴) انجام می‌شود. ابتدا 100 گرم از مصالح جدا می‌شود. سپس استوانه مدرج تا علامت ۴ اینچ (۱۰ سانتیمتر) از محلول شستشو پر می‌شود. با استفاده از قیف، نمونه داخل لوله‌آزمایش ریخته شده و مدت ۱۰ دقیقه انتظار لازم است تا کاملاً خیس شود. با چوب‌پنبه در لوله را بسته، لوله به صورت افقی ۹۰ بار در مدت ۳۰ ثانیه که دامنه رفت‌وآمد ۳۰ سانتیمتر است، تکان داده می‌شود. لوله را عمودی روی میز قرار داده، پس از برداشتن چوب‌پنبه، با آب‌پاشی به وسیله بطری پلاستیکی حاوی محلول شستشو، جدار لوله شسته تا علامت ۱۵ اینچ ($37/5$ سانتیمتر) پر می‌شود. محلول ۲۰ دقیقه بی حرکت روی میز گذاشته می‌شود و پس از سپری شدن این زمان ارتفاع مخلوط داخل استوانه خوانده می‌شود. (H_1)

سنبه فولادی به آهستگی در لوله آزمایش پایین برده می‌شود و انتهای آن روی ماسه قرار داد می‌شود و به کمک نشانه متصل به میله سنبه بر روی استوانه، عددی که نشانه مزبور در برابر آن قرار گرفته است خوانده می‌شود. (H_2)

این آزمایش حداقل باید ۲ بار انجام شود و در نهایت درصد ارزش ماسه‌ای محاسبه می‌شود.

۳-۱-۱-۶- آزمایش درصد افت وزنی مصالح^۱ (دوام)

مصالح سنگی که در ساختن آسفالت‌ها به کار می‌روند باید در برابر عوامل جوی مقاوم باشند. مصالحی که در اثر یخبندان و یا در اثر تغییرات رطوبت شکسته و خرد می‌شوند نباید در لایه‌های آسفالتی روسازی مصرف شوند. نشانه‌ای از مقاومت مصالح سنگی در برابر عوامل جوی به کمک آزمایش دوام و استفاده از سولفات سدیم یا منیزیم انجام می‌گیرد. نحوه انجام آزمایش به این ترتیب است که مقدار معینی از مصالح

¹ Sodium sulfate soundness

سنگی پس از آنکه به مدت ۱۶ تا ۱۸ ساعت در محلول اشباع شده سولفات سدیم و سولفات منیزیم قرار گرفت از محلول خارج شده و در یک گرمخانه با گرمای ثابت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد تا کاملاً خشک شود. این عمل چندین بار (معمولاً ۵ بار) تکرار می‌شود. پس از آن نمونه مصالح به کمک جریان آب کاملاً شسته شده و پس از خشک شدن در گرمخانه با استفاده از الک دانه‌بندی جدید آن تعیین می‌شود. با مقایسه دانه‌بندی جدید مصالح با دانه‌بندی اولیه آن، مقدار متوسط افت وزنی مصالح سنگی که در اثر خرد و شکسته شدن دانه‌ها به وجود آمده است تعیین می‌شود. آزمایش تعیین مقاومت مصالح سنگی در برابر عوامل جوی معمولاً فقط در مواردی به کار می‌رود که اطلاعات تجربی کافی در مورد نحوه عملکرد مصالح سنگی موردنظر در شرایط جوی موردبحث موجود نباشد. مصالح سنگی در برابر سولفات منیزیم مقاومت کمتری در مقایسه با سولفات سدیم از خود نشان می‌دهند و لذا میزان افت آن‌ها بیشتر است. طبق آیین نامه سازمان برنامه و بودجه، افت مصالح سنگی در آزمایش دوام پس از آنکه به تعداد ۵ بار با استفاده از محلول سولفات سدیم مورد آزمایش قرار گرفت نباید از ۰.۸٪ وزنی مصالح بیشتر شود. آیین نامه ASTM-C88 حداکثر افت مصالح سنگی را وقتی به تعداد ۵ بار با استفاده از محلول سولفات سدیم و یا سولفات منیزیم مورد آزمایش قرار می‌گیرد به ترتیب به ۰.۱۲٪ و ۰.۱۸٪ محدود می‌کند.

۳-۱-۱-۷- آماده سازی ضایعات XLPE

به دلیل ویژگی‌های عایقی مناسب XLPE، این ماده به عنوان یک ماده عایق به طور گسترده‌ای در پوشش سیم‌ها و کابل‌های الکتریکی فشار قوی استفاده می‌شود. ضایعات XLPE مورد استفاده در این مطالعه از شرکت کابل مغان، شهرستان شاهرود تهیه شده است و دارای وزن مخصوص ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که پس از خرد کردن آنها (شکل ۳-۳ ب) توسط دستگاه آسیاب با مصالح سنگی هم اندازه مانده بر روی الک ۸ (۱/۱۸ تا ۲/۳۶ میلی‌متر) در مخلوط آسفالتی جایگزین شده است.

شکل ۳-۳ الف مربوط به این ضایعات قبل از خرد شدن است.



(الف)

(ب)

شکل ۳-۳ ضایعات XLPE، (الف) قبل از خرد شدن، (ب) پس از خرد شدن

۳-۱-۲- قیر مصرفی

در این تحقیق از قیر خالص ۶۰/۷۰ AC- پالایشگاه پاسارگاد تهران استفاده شده است. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۳-۵ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۵- مشخصات فیزیکی قیر مصرفی

نتایج	استاندارد	آزمایش
۶۵	ASTM-D5	درجه نفوذ (25 °C , 0.1 mm)
۵۵	ASTM-D36	نقطه نرمی (°C)
۱۰۰	ASTM-D113	کشش پذیری (25 °C, cm)
۲۸۸	ASTM-D92	نقطه اشتعال (°C)
۱/۰۲۷	ASTM-D70	وزن مخصوص (g/cm ³)

۳-۱-۲-۱- آزمايش درجه نفوذ (ASTM-D5)

آزمایش درجه نفوذ قیر برای تعیین سختی نسبی قیرهای دمیده و قیرهای خالص استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای درجه نفوذ در نام‌گذاری قیرهای خالص و قیرهای دمیده است. قیرهای خالص تنها بر این اساس نام‌گذاری می‌شوند اما معیار نام‌گذاری قیرهای دمیده علاوه بر درجه نفوذ قیر، درجه نرمی قیر نیز است. به‌عنوان نمونه، قیرهای ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰، ۸۵-۱۰۰ و ... از جمله قیرهای خالص معمول در راهسازی می‌باشند. دو عددی که همراه قیر خالص می‌آید بیانگر آن است که درجه نفوذ قیر در این محدوده قرار دارد. برحسب تعریف، درجه نفوذ قیر عبارت است از مقدار طولی (برحسب میلی‌متر) است که یک سوزن استاندارد با شکل معین تحت اثر باری معادل ۱۰۰ گرم در مدت ۵ ثانیه در قیری که در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد است، نفوذ نماید. یکی از موارد کاربردی نتایج این آزمایش آن است که هر چه آب‌وهوای منطقه‌ای که قرار است قیر را در آنجا استفاده نماییم گرم‌تر باشد یا میزان آمدوشد بیشتر و بار وسایل نقلیه سنگین‌تر باشد، باید از قیری با درجه نفوذ کمتر استفاده نمود و بالعکس هرچه آب‌وهوای منطقه مورد نظر سردتر باشد، باید از قیرهای با درجه نفوذ بیشتری استفاده نمود. بنابراین هرچه قیر سخت‌تر باشد، درجه نفوذ آن کمتر و هرچه درجه نفوذ قیر بیشتر باشد قیر نرم‌تر خواهد بود. قیرهایی که درجه نفوذ آن‌ها حدود ۸۰ باشد، در آسفالت‌هایی نظیر بتن آسفالتی و قیرهای با درجه نفوذ بیشتر در ماکادام قیر و آسفالت سرد بکار برده می‌شوند.

در صورتی که آزمایش درجه‌ی نفوذ را در دمایی مساوی با نقطه‌ی نرمی قیر انجام دهیم برای همه‌ی قیرها درجه‌ی نفوذ ۸۰۰ به دست می‌آید لذا پارامتری به نام درجه نفوذ تعریف شده است که نشانه‌ی حساسیت قیر به تغییرات دما است. هرچه نشانه‌ی درجه نفوذ کمتر باشد حساسیت قیر به تغییرات دما بیشتر است.

روش آزمایش بدین صورت است که ابتدا مقداری قیر را حدود ۶۰ درجه یا تا دمایی بالاتر از نقطه نرمی گرم می‌نماییم و سپس درون ظرف مخصوص می‌ریزیم. این ظرف دارای ۵/۵ سانتیمتر قطر و ۳/۵ سانتیمتر ارتفاع است. باید دقت شود که سطح قیر کاملاً صاف و بدون حباب باشد. جهت صاف نمودن سطح قیر می‌توان از کاردک استفاده نمود. ظرف حاوی قیر در معرض هوای آزمایشگاه قرار داده می‌شود تا قیر سرد شود. سپس ظرف قیر در داخل حمام آب گرم با درجه حرارت ۲۵ درجه قرار داده می‌شود تا پس از یک ساعت و نیم قیر با آب داخل حمام به تعادل برسد.

سپس ظرف از درون حمام آب گرم خارج می‌شود و سطح آن با دستمال نخی خشک می‌شود. طوری ظرف زیر دستگاه تعیین درجه نفوذ قرار داده می‌شود که نوک سوزن و نوک تصویر آن در سطح براق قیر بر روی هم منطبق شوند. حال درجه دستگاه صفر می‌شود و با زدن کورنومتر، سوزنی که وزن آن با متعلقاتش ۱۰۰ گرم است رها می‌شود و طی ۵ ثانیه مقدار نفوذ سوزن روی صفحه مدرج قرائت می‌شود و یادداشت می‌شود. این آزمایش برای هر نمونه (هر ظرف) ۵ تا ۱۰ بار انجام می‌شود و مقادیر به دست آمده یادداشت می‌شود. توجه نمایید که مقادیر به دست آمده برحسب دهم میلی‌متر است. باید دقت نمایید که فواصلی سوزن در قیر نفوذ می‌کند از یکدیگر فاصله تقریباً یکسانی داشته باشند و به لبه ظرف بیش از حد نزدیک نباشد تا خطای آزمایش کم شود. این تعداد آزمایش سبب می‌شود که خطای آزمایش کاهش یابد. میانگین اعداد به دست آمده همان میزان درجه نفوذ قیر خواهد بود.

۳-۱-۲-۲- آزمایش نقطه نرمی (ASTM-D36)

نقطه نرمی قیر عبارت است از درجه حرارتی که در آن قیر حالت نرمی پیدا می‌کند. به‌طور کلی می‌توان گفت که همه قیرها در این درجه حرارت به یک گرانبوی مشخص می‌رسند. نقطه نرمی قیر به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود که یکی از این روش‌ها، روشی به نام حلقه و گلوله است که در آن نقطه نرمی

را درجه حرارتی که در آن گلوله‌ها از حلقه عبور نموده و به سطح برنجی تحتانی به فاصله ۲۵ میلی‌متری برسد، تعریف می‌کنند. روش انجام این آزمایش بدین صورت است که ابتدا حلقه‌ها را روی سطح شیشه‌ای که به روغن آغشته است، قرار می‌دهیم. روغن سبب می‌شود که قیر به شیشه نچسبد. عمق این حلقه‌ها در حدود ۸ میلی‌متر است. قیر را که قبلاً داغ شده است به آرامی در داخل حلقه‌ها می‌ریزیم به طوری که حلقه کاملاً پر شود. چون عملاً پر کردن حلقه‌ها به صورت کامل بسیار مشکل است بهتر است به اندازه‌ای قیر در داخل آن‌ها ریخته شود که نیاز به ریختن مجدد نداشته باشد اما اگر کمی زیادتر ریخته شد، مشکلی پیش نخواهد آمد، چراکه پس از سرد شدن قیر داخل حلقه‌ها، سطح حلقه‌ها را با کاردک صاف خواهیم نمود تا اضافه قیر حلقه‌ها برداشته شود. برای صاف نمودن سطح قیر لازم است که کاردک داغ شده را با زاویه ۴۵ درجه روی سطح حلقه‌ها بکشیم. سطح زیرین حلقه‌ها نیز به جهت استفاده از سطح شیشه‌ای، خودبه‌خود صاف خواهد شد. پس از سرد شدن قیر و صاف نمودن سطح آن، حلقه‌ها در جای خود در داخل بشر قرار داده می‌شود. سپس بشر تا حدود ۵ سانتی‌متر بالای حلقه‌ها از آب مقطر پر می‌شود. البته لازم است گفته شود که در آزمایشگاه به علت محدودیت‌های موجود از آب معمولی استفاده می‌شود.

حال مجموعه بشر در دستگاه گرم‌کن قرار داده می‌شود تا دمای آب درون آن به ۲۵ درجه سانتی‌گراد برسد که برای رسیدن به این هدف لازم است بشر به مدت ۱۵ دقیقه در گرم‌کن بماند. در پایان ۱۵ دقیقه باید دمای آب داخل بشر به ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسیده باشد. اکنون بشر را از گرم‌کن بیرون آورده و ساچمه‌ها در مرکز حلقه‌ها روی قیر قرار داده می‌شود و بشر روی چراغ گذاشته می‌شود. نکته بسیار مهم در این آزمایش، روند گرمادهی به بشر و محتوی آن یعنی قیر است. از آنجاکه این آزمایش به حرارت بسیار حساس است، پس لازم است که در همه آزمایش‌ها از یک سرعت حرارت دهی استفاده شود. بنابراین حرارت نیز به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که در هر دقیقه ۵ درجه به دمای آب افزوده شود و این مهم در حین حرارت دادن با دماسنج کنترل می‌شود. عملیات گرمادهی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا ساچمه‌های روی

قیرها به سطح تیغه فلزی زیرحلقه‌ها برسند و برای هرکدام دمایی که این عمل اتفاق افتاده است قرائت و یادداشت می‌شود. سپس متوسط دو دمای به‌دست‌آمده به‌عنوان نقطه نرمی قیر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱-۳- فیلر مصرفی

از رایج‌ترین فیلرهای مصرفی که خاصیت ضد‌عریان‌شدگی نیز دارد فیلر آهکی است که به‌طور مؤثری استعداد عریان‌شدگی را در مخلوط آسفالتی تعدیل می‌کند. توجه شود که این ماده چندمنظوره به کار می‌رود یعنی علیرغم کنترل حساسیت رطوبتی دارای مزایای دیگری نیز به شرح زیر است:

الف - به‌عنوان یک فیلر سختی مخلوط را افزایش و شیار شدگی را کاهش می‌دهد.

ب - مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را در دمای پایین بهبود می‌بخشد.

پ - پیرشدگی آسفالت و اثرات مضر آن را به‌طور مطلوبی اصلاح می‌کند.

ت - با ایجاد واکنش بین ذرات، باعث تعدیل پایداری در برابر رطوبت و دوام می‌شود.

با این توصیف و با توجه به سهولت دسترسی به این ماده در کشور، در این تحقیق از فیلر آهکی استفاده شده است.

۳-۲- طرح اختلاط و روش انجام آزمایشات

۳-۲-۱- ساخت نمونه‌ها

روش‌های مختلفی برای طرح آسفالت وجود دارد که یکی از این روش‌ها، روش مارشال است. در هر طرح آسفالت باید معیارهایی تعیین و مشخص گردد که بر اساس آن‌ها آسفالت ساخته می‌شود. این معیارها عبارت‌اند از:

۱) وزن مخصوص واقعی آسفالت متراکم شده

۲) درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده

۳) مقاومت فشاری آسفالت متراکم شده

۴) تغییر شکل نسبی آسفالت متراکم شده

۵) درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده

برای تعیین معیارهای فوق لازم است بر روی نمونه‌های ساخته شده به روش مارشال، آزمایش‌هایی صورت پذیرد. در این بخش ابتدا روند ساخت نمونه‌ها شرح داده می شود و سپس به آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌ها به منظور تعیین مشخصات نمونه‌های آسفالتی پرداخته می شود.

همان‌طور که ذکر شد از روش مارشال برای تهیه نمونه‌ها طبق دستورالعمل استاندارد ASTM-D1559 استفاده شده است. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶/۳۵ سانتی‌متر) انجام می‌شود. عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته شده با چکش ۱۰ پوندی (۴/۵ کیلوگرمی) و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد. تعداد ضربات نیز بسته به میزان ترافیک طرح مسیر موردنظر متفاوت است.

روش آزمایش بدین صورت است که ابتدا نمونه‌های مصالح سنگی که قبلاً دانه‌بندی شده است در آن ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در آن قرار داده می شود به طوری که دمای آن به حدود ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد و رطوبت سنگ‌دانه‌ها گرفته شود. لازم به یادآوری است که نمونه‌های دانه‌بندی شده همگی دارای وزن ۱۲۰۰ گرم و دانه‌بندی کاملاً یکسان می‌باشند؛ علت این امر آن است که بتوان تاثیر این دو عامل را در آزمایش حذف کرد. تعداد این نمونه‌ها باید ۲۰ عدد باشد که ۵ عدد از آن‌ها به عنوان ذخیره

تهیه می‌شوند و در صورتی که حین ساخت نمونه آسفالت خطایی صورت گرفت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین باید ۲۰ نمونه آسفالتی ساخته شود. این ۲۰ نمونه به ۵ گروه ۴ تایی تقسیم خواهند شد که هر گروه دارای درصد قیر یکسانی است. از درصد قیر های ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ برای ساخت نمونه ها استفاده شده است.

جهت شروع فرایند آزمایش، ابتدا یک عدد قالب با تمام قطعات آن در اون قرار داده می شود تا با سنگ‌دانه‌ها هم دما شود و سپس یک نمونه را از اون بیرون آورده و درون ظرف مخلوط‌کن ریخته می شود و ظرف روی ترازویی قرار داده می شود که هم وزن در کفه مقابل ترازو، وزنه وجود دارد. از فرمول زیر درصد وزنی قیر لازم محاسبه می‌شود:

$$\frac{X}{1200} \times 100 = 4 \rightarrow X = 50gr \quad (2-3)$$



شکل ۳-۴ توزین قیر

لازم به ذکر است که رابطه بالا برای هر گروه مساوی با درصد قیر مربوط به آن گروه قرار داده می شود. در کفه‌ای که وزنه‌ها قرار دارند ۵۰ گرم وزنه اضافه می‌شود و سپس قیر مذاب به آرامی در ظرف

مخلوط‌کن ریخته می‌شود. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که نشانه دو کفه روبروی هم بایستند و وزن دو کفه برابر شود. در اینجا یادآور می‌شویم که نباید دمای قیر بیش از ۱۳۷ درجه سانتی‌گراد باشد زیرا در دمای بالای ۱۳۷ درجه مشخصات قیر تغییر خواهد کرد. بنابراین باید سعی شود دمای قیر در حدود ۱۳۷-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد.

به‌وسیله کاردک‌ها سنگ‌دانه‌ها با قیر ریخته شده مخلوط می‌شود و سپس برای مخلوط شدن کامل در دستگاه مخلوط‌کن قرار داده می‌شود. برای آنکه در حین مخلوط شدن، دمای مخلوط کاهش نیابد باید گرم‌کن مخصوص زیر کاسه مخلوط‌کن قرار داده شود. مدت ۵ دقیقه عمل مخلوط کردن ادامه می‌یابد اما باید توجه نمود که زمان مناسب برای قطع نمودن عمل هم زدن خود فرد آزمایشگر تعیین می‌شود؛ بدین صورت که باید تمامی سنگ‌دانه‌ها به قیر آغشته شده باشند و سنگ‌دانه‌ای خشک و به اصطلاح سفید نمانده باشد. احیانا پس از پایان میکس سنگ‌دانه‌های سفید مشاهده شد، با کاردک آن‌ها مخلوط می‌شوند تا کیفیت مطلوب حاصل شود.



شکل ۳-۵ دستگاه مخلوط‌کن

حال قالب از اون بیرون آورده می شود و ابتدا به اندازه ۲-۳ سانتی متر مصالح ریزدانه به وسیله کاردکها در قالب ریخته می شود و سپس سایر مصالح به طور یکنواخت به داخل قالب افزوده می شود. توجه داشته باشید که قبلا قالب به روغن آغشته شده است؛ این عمل سبب می شود که نمونه در پایان راحت تر از قالب بیرون بیاید و به بدنه قالب نچسبد. قالب مارشال از ۳ قسمت تشکیل شده است که عبارتند از :

- استوانه اصلی (قالب)

- سری قالب

- کفی قالب

قالب و سری قالب به صورت نری و مادگی می باشند که به راحتی بر روی یکدیگر قرار می گیرند. پس ریختن تمام مخلوط به داخل قالب، با کاردک آن ها را در داخل قالب اندکی مخلوط نموده تا از یکنواختی آن اطمینان حاصل شود. این کارها باید در زمان اندکی انجام می شود تا از افت چشمگیر دما جلوگیری شود.



شکل ۳-۶ ریختن مصالح آغشته به قیر در قالب

حال نمونه زیر چکش تراکم مارشال قرار داده می شود. سطح چکش قبلا به روغن آغشته شده است.

در صورت استفاده از چکش‌های دستی باید نمونه ۵۰ بار بافاصله زمانی یکسان کوبیده شود. پس از کوبیدن ۵۰ ضربه، قالب بیرون آورده و برگردانده می‌شود تا از سمت دیگر آن زیر چکش قرار داده شود. این سمت نمونه نیز با ۵۰ ضربه کوبیده می‌شود. در مورد تعداد ضربات باید این نکته در نظر گرفته شود که این تعداد بسته به نوع ترافیک طرح مسیر می‌تواند مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه را اختیار نماید. در این مطالعه از ۵۰ ضربه (ترافیک متوسط) برای متراکم کردن نمونه‌ها استفاده شده است.



شکل ۳-۷ چکش مارشال

حال نمونه‌ها در محلی امن قرار داده می‌شود تا در دمای محیط سرد شوند. این مراحل برای سایر نمونه‌ها انجام می‌شود و البته باید توجه داشته داشت که میزان درصد قیر هر گروه به‌درستی افزوده شود. در این مرحله وزن مخصوص واقعی، درصد فضای خالی، مقاومت فشاری و تغییر شکل نسبی نمونه‌های

متراکم شده محاسبه می‌شود.

۳-۲-۱-۱-آزمایش محاسبه درصد فضای خالی (رایس) (ASTM-D2041)

فضای خالی در یک نمونه متراکم شده به حباب‌های هوای درون نمونه اطلاق می‌شود که به صورت درصد حجمی نسبت به حجم نمونه کوبیده شده بیان می‌گردد. میزان فضای خالی آسفالت از جمله پارامترهای بسیار مهم در طرح آسفالت است زیرا در نظر نگرفتن این پارامتر می‌تواند عمر مفید راه و عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر بگذارد. در صورتی که درصد فضای خالی آسفالت کمتر از یک درصد باشد، سبب بیرون زدن قیر از آسفالت می‌شود و در صورتی که بیش از حد مجاز باشد، استحکام و مقاومت آسفالت را کاهش می‌دهد و راه نفوذ آب به داخل آسفالت را فراهم نموده که سبب فروپاشی بافت مستحکم آسفالت خواهد شد.

برای قشر رویه حداقل ۳ درصد فضای خالی می‌تواند حالت انعطاف‌پذیر آسفالت را حفظ نموده و از بروز پدیده قیر زدگی جلوگیری نماید. از جمله عواملی که در میزان فضای خالی آسفالت مؤثرند، عبارت است از دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد قیر آسفالت و کوبیدگی قشر آسفالت؛ که این عوامل برای حصول به میزان درصد فضای خالی مناسب توسط آیین‌نامه‌ها کنترل می‌شود زیرا حدود مجاز دانه‌بندی کاملاً مشخص بوده و حداقل و حداکثر کوبیدگی نسبی آسفالت نیز تعیین شده و نیز درصد قیر مناسب به کمک آزمایش مارشال با رعایت درصد فضای خالی تعیین می‌شود.

هرچه عمل غلتک زنی و تراکم بیشتر باشد، درصد فضای خالی آسفالت کاهش می‌یابد که حداقل کوبیدگی نسبی مطابق آیین‌نامه برابر ۹۷٪ نسبت به تراکم ماکزیمی است که در آزمایشگاه به دست می‌آید اما از آنجاکه شرایط آزمایشگاه و عمل با یکدیگر تطابق ندارند، درصد فضای خالی آسفالت همواره بیشتر از آن است که پیش‌بینی می‌شود؛ بنابراین برای رسیدن به ۳٪ فضای خالی در قشر رویه آسفالت

لازم است حداقل کوبیدگی نسبی را به ۹۸ تا ۹۹٪ افزایش داد.

روش آزمایش بدین صورت است که ابتدا نمونه‌ها داخل سینی گذاشته، سپس به مدت ۱۰ دقیقه درون گرم‌کن قرار داده می‌شود تا خوب بازشوند. ارلن تمیز و وزن می‌شود. ارلن به‌اندازه‌ای از آب پر می‌شود که بعد از زدن چند ضربه با کف دست به دهانه آن، دیگر آبی از آن خارج نشود. بار دیگر بدنه بیرونی آن خشک می‌شود و مورد توزین قرار داده می‌شود.

حال یک نمونه از گرم‌کن خارج شده و اجازه داده می‌شود تا سرد شود. سپس به روش چارک کردن مقدار ۱۲۰ گرم مخلوط آسفالت جدا شده و درون ارلن خشک و تمیز ریخته می‌شود. مقداری آب در ارلن ریخته می‌شود به طوری که حدود ۲ سانتی‌متر از سطح مخلوط آسفالت بالاتر بیاید. سر ارلن با درپوش به‌خوبی بسته می‌شود و ارلن به دستگاه تخلیه هوا متصل می‌شود تا هوای درون منافذ مخلوط آسفالت خارج شود. برای تسریع این عمل، هرچند دقیقه یک‌بار ارلن تکان داده می‌شود. عملیات مکش هوا تا زمان خروج کامل حباب‌های هوا از میان خلل و فرج مخلوط آسفالت ادامه می‌یابد.

پس از خروج کامل هوا، ارلن از دستگاه جدا شده و تا زیر لوله نازل از آب پر می‌شود و مورد توزین قرار داده می‌شود. این مراحل برای سایر نمونه‌ها انجام داده می‌شود و نتایج در جدولی یادداشت می‌شود.



شکل ۳-۸ نمونه متراکم نشده داخل ارلن

درصد فضای خالی آسفالت و مصالح سنگی مطابق فرمول‌های زیر به دست می‌آید:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-B}, \quad B = D - C \quad (3-3)$$

A: وزن نمونه آسفالتی در هوا (g)

D: وزن ارلن محتوی آب تا خط نشانه و نمونه بدون هوا (g)

C: وزن ارلن پر از آب (g)

G_{mm} : وزن مخصوص ماکزیمم آسفالت (g/cm^3)

$$P_{gm} = 100 \times \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \quad (4-3)$$

P_{gm} : نسبت وزن مخصوص‌هایی محاسباتی آسفالت

G_{mb} : وزن مخصوص واقعی آسفالت که از آزمایش مارشال به دست آمده است (g/cm^3)

$$V_V = 100 - P_{gm} \quad (5-3)$$

V_v : درصد حجمی فضای خالی آسفالت

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (6-3)$$

G_{sb} : وزن مخصوص قیر واقعی (g/cm^3)

P_1, P_2, P_3 : درصد مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر

G_1, G_2, G_3 : وزن مخصوص مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر (g/cm^3)

$$V.M.A = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \rho_s \quad (7-3)$$

$V.M.A$: درصد فضای خالی مصالح سنگی

ρ_s : درصد قیر آسفالت

۲-۱-۲-۳- مقاومت فشاری و روانی مارشال

مقاومت فشاری مارشال عبارت است از حداکثر باری که نمونه تحت آزمایش مارشال بدون اینکه شکستگی در آن ایجاد شود، تحمل می‌نماید. این مقاومت به‌تنهایی معیار پایداری محسوب نمی‌شود بلکه باید جهت تعیین این معیار، دو پارامتر مقاومت فشاری مارشال و روانی باهم بررسی شوند. تغییر شکل نسبی آسفالت یا همان روانی به میزان وارفتگی یا به‌عبارت‌دیگر تغییر شکل آسفالت تحت بار وارده اطلاق می‌شود. هر چه تغییر شکل نسبی بیشتر باشد، میزان وارفتگی آسفالت تحت تاثیر بار بیشتر خواهد بود. تعریف دیگری که می‌توان از روانی ارائه داد عبارت است از میزان فشردگی نمونه قبل از شکستن که در جهت عمود بر آن است.

روش آزمایش بدین‌صورت است که نمونه‌ها را پس از خارج کردن از قالب و انجام آزمایش تعیین وزن

مخصوص واقعی، به مدت ۳۰ الی ۴۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای 60 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند. در طول این مدت لازم است با دماسنج پیوسته دمای حمام آب را کنترل نماییم تا در محدوده موردنظر باشد. علت انتخاب این شرایط برای نمونه‌ها آن است که بتوان حتی‌الامکان بدترین شرایطی را که ممکن است در عمل آسفالت ایجاد شود، را فراهم نمود.



شکل ۳-۹ نمونه‌ها در داخل حمام آب

قبل از آنکه نمونه در بین دو فک دستگاه قرار داده شود، لازم است فک‌ها مانند نمونه‌ها گرم شود و سپس روغن کاری شود. سپس نمونه در داخل فک‌ها قرار داده می‌شود و گیج‌ها صفر می‌شوند. حال می‌توان دستگاه را روشن کرده و بارگذاری را شروع کرد. چون دستگاه خودکار است، زمانی که نمونه دچار شکستگی شد، می‌توان به راحتی از روی مانیتور مقادیر مقاومت و وارفتگی را قرائت نمود. هنگامی نمونه دچار شکست می‌شود، درجه بارگذاری افزایش مقاومتی را نشان نمی‌دهد و ثابت می‌ماند؛ دقیقاً در همین لحظه است که باید مقدار وارفتگی قرائت شود. در این مرحله باربرداری نموده و نمونه از بین فک‌ها خارج می‌شود و مطابق فرمول زیر مقاومت مارشال به دست می‌آید.

$$\text{ضریب تصحیح} \times \text{قرائت درجه گیج مقاومت} = \text{نیروی مقاومت آسفالت} \quad (۸-۳)$$

علت اعمال ضریب تصحیح آن است که نمونه‌ها برای آنکه قابل مقایسه با یکدیگر باشند لازم است از شرایط یکسانی برخوردار باشند اما از آنجاکه حجم نمونه‌ها یکسان نیست و غالباً ضخامت نمونه‌ها نیز از ۴ اینچ کمتر است، بنابراین تصحیح نمونه‌ها برحسب ضخامت و حجم ضرورت می‌یابد. میزان وارفتگی یا روانی نیز مستقیماً از گِیج روانی برحسب یک‌دهم میلی‌متر به دست می‌آید.

۳-۲-۲- تصویر برداری به روش سی تی اسکن^۱

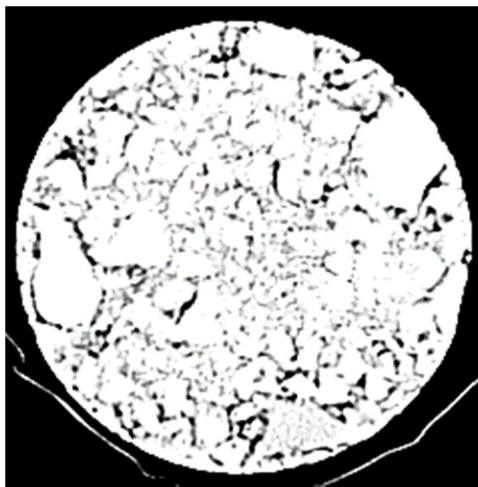
تصویر برداری به روش سی تی اسکن به منظور نمایان کردن ساختار داخلی مخلوط آسفالتی از جمله آرایش سنگدانه‌ها و توزیع فضای خالی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (زانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۷؛ زانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۶). در حقیقت نتایج تصویر برداری سی تی اسکن مبنی بر تفاوت چگالی مواد می‌باشد. به همین دلیل تشخیص و تفکیک موادی که دارای چگالی یکسانی هستند با این روش کمی دشوار است (حسن و همکاران^۴، ۲۰۱۵). شکل ۳-۱۰ تصویر برداری سی تی اسکن را برای مخلوط آسفالتی شاهد و حاوی XLPE نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-۱۱ الف، در نمونه حاوی XLPE همانطور که مشاهده می‌شود سنگدانه‌ها به دلیل چگالی بیشتر پررنگ تر دیده شده و XLPE موجود در نمونه به دلیل چگالی کمتر نسبت به سنگدانه‌ها کم رنگ تر می‌باشد و همچنین فضاهای خالی نمونه تاریک ترین رنگ را دارند. شکل ۳-۱۱ ب، برخی از فضای خالی نمونه (ناحیه‌های آبی) و برخی از XLPE‌های جایگزین سنگدانه موجود (ناحیه‌های سبز) در مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد.

1 X-Ray Computed Tomography (CT) Scanning

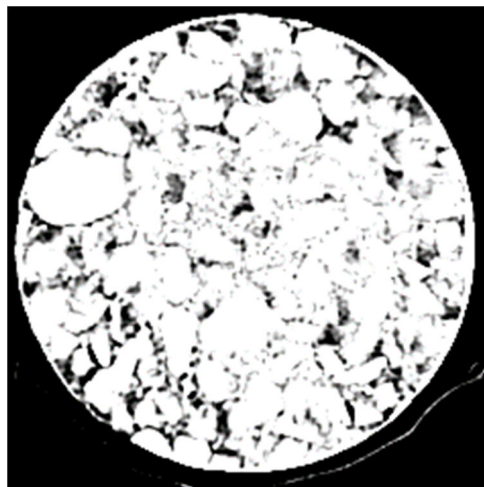
2 Zhang et al.

3 Zhang et al.

4 N.A. Hassan

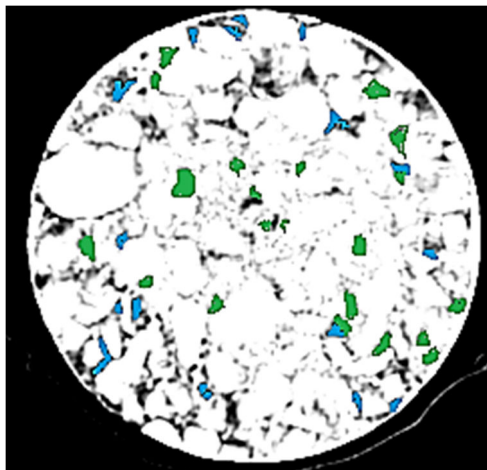


(الف)

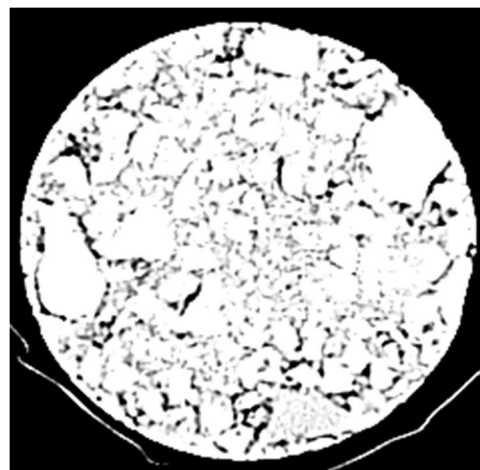


(ب)

شکل ۳-۱۰ تصویر برداری سی تی اسکن از (الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه دارای XLPE



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۱ نمونه مارشال دارای XLPE (الف) تصویر تفکیک برخی از ذرات XLPE و فضای خالی نمونه، (ب) تصویر از نمونه اصلی

۳-۲-۳- دستگاه آزمایش آسفالت ناتینگهام^۱

از دستگاه آزمایش آسفالت ناتینگهام جهت انجام آزمونهای غیر مخرب بروی نمونه های آسفالتی استفاده گردیده است. این دستگاه در سال ۱۹۸۰ برای تعیین خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی

^۱ Nottingham asphalt tester (NAT)

تحت شرایط بارگذاری دینامیکی ساخته شد. اساس عملکرد این دستگاه تعیین رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی به کمک آزمایشات سختی به روش کشش غیر مستقیم در اثر بارگذاری مکرر^۱، خزش غیر محوری^۲، خستگی به روش کشش غیر مستقیم^۳ و خزش محوری با بارگذاری مکرر^۴ می باشد. ضریب پواسون به طور معمول ۰/۳۵ در نظر گرفته می شود که بهترین مقدار برای نشان دادن رفتار مواد آسفالتی است. این ضریب جزو داده های ورودی دستگاه پیش از آزمایش مدول سختی به حساب می آید (عربانی، ۲۰۱۱).



شکل ۳-۱۲ دستگاه ناتینگهام

¹ Repeated load indirect tensile stiffness

² Unaxial creep

³ Indirect tensile fatigue test

⁴ Repeated load axial creep

۳-۲-۱- آزمایش تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیر مستقیم

به منظور تعیین مدول سختی دینامیکی نمونه های آسفالتی به روش کشش غیر مستقیم براساس استاندارد ASTM D4123 ، ابتدا نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه کنترل دما قرار گرفتند تا بطور همگن به دمای ۲۵ درجه برسند. سپس در محل قاب بارگذاری دستگاه ناتینگهام قرار داده شدند. صفحات بارگذاری در بالا و پایین نمونه بصورت موازی و در راستای ارتفاع نمونه استقرار یافته است.

آزمایش مدول سختی با اعمال نیرویی خطی در راستای محور قطرهای نمونه انجام شده است. هر سیکل از آزمایش به مدت یک ثانیه به طول می انجامد. مدت زمان بارگذاری و باربرداری ۰/۱ ثانیه است و پس از آن به مدت ۰/۹ ثانیه به نمونه اجازه استراحت داده می شود.

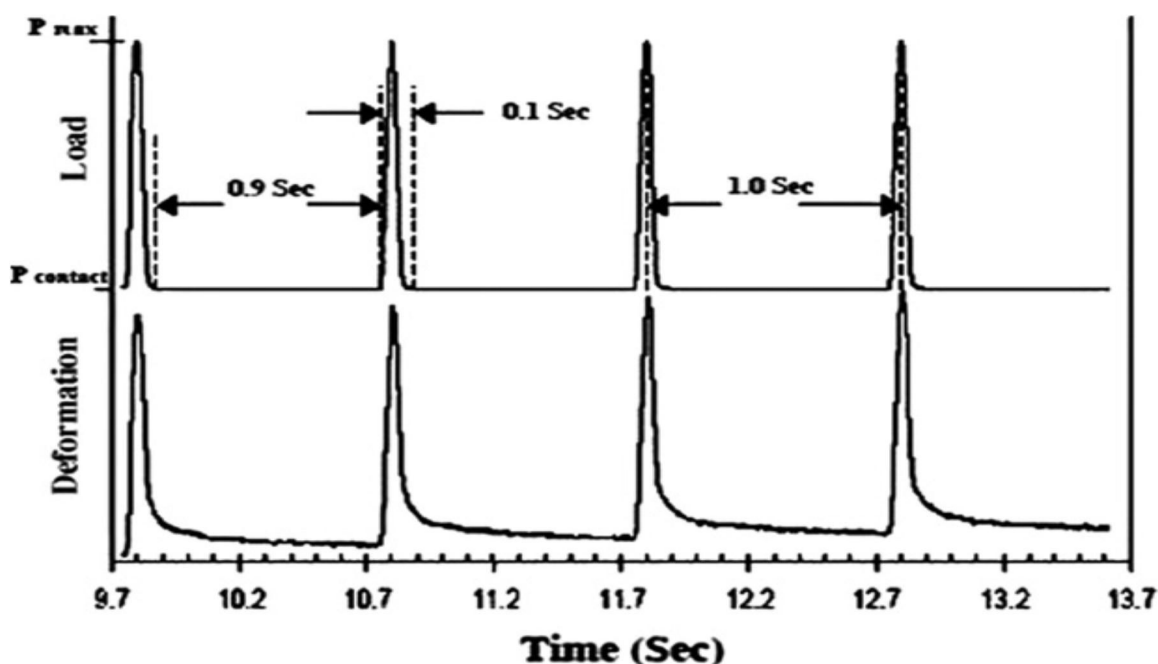
برروی هر نمونه آزمایش تعیین مدول سختی به روش کشش غیر مستقیم دو مرتبه بارگذاری انجام می شود که در بارگذاری مرتبه دوم، نیرو در امتداد قطری از نمونه که ۹۰ درجه نسبت به حالت اول چرخیده است، اعمال می گردد. تغییر شکل افقی نمونه ها توسط دو حسگر اندازه گیری می شود. لازم به ذکر است که باید تغییر شکل ها در محدوده الاستیک حفظ گردد. این آزمایش روشی غیر مخرب برای اندازه گیری مدول سختی نمونه های آسفالتی است.

مدول سختی بدست آمده در مرتبه دوم کمتر از مدول بدست آمده در مرتبه اول است. این اختلاف زمانی مشهودتر است که از مواد با سختی پایین استفاده شود و یا آزمایش در دمای خیلی بالا انجام گیرد. این تفاوت ناشی از این واقعیت است که پس از بارگذاری مرحله اول، تغییر شکل الاستیک در درون نمونه ها به کلی از بین نرفته است.

نمودار بارگذاری و تغییر شکل برحسب زمان در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. ضریب پواسون نمونه ها در آزمایش های دینامیکی برابر ۰/۳۵ فرض می گردد که این ضریب جزو داده های ورودی

دستگاه قبل از انجام آزمایش است.

با توجه به نمودار تغییر شکل - زمان دیده می شود که در مدت زمان بارگذاری، تغییر شکل افزایش می یابد و در مدت زمان باربرداری، تغییر شکل با شیب زیاد کاهش می یابد اما در دوره استراحت این کاهش با شیب کمتری صورت می گیرد.



شکل ۳-۱۳ نمودار بارگذاری و تغییر شکل بر حسب زمان

همچنین با توجه به نمودار دیده می شود که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌ها نیز افزایش می یابد.

تغییر شکل افقی نمونه‌ها توسط دو حسگر اندازه‌گیری می‌شود. مدول سختی نمونه‌های آسفالتی تابعی از بارگذاری، تنش، تغییر شکل افقی، درصد قیر و ضریب پواسون است. علاوه بر این مدول سختی به عواملی مانند دمای آسفالت و طول زمان بارگذاری بستگی دارد.

داده‌های ورودی برای تعیین مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی بوسیله دستگاه نائینگهام عبارتند از:

ضخامت L ، نسبت پواسون ν ، تغییر شکل‌های افقی مطلوب H ، دما و زمان خیز و عکس‌العمل نمونه‌های آسفالتی. نسبت پواسون برای نمونه‌های آسفالتی 0.35 و تغییر شکل‌های افقی مطلوب برابر 5 میکرون در نظر گرفته می‌شود.

همانطور که در فصل یک ذکر گردید، دستگاه ناتی‌نگهام مدول سختی نمونه‌های آسفالتی را بوسیله اندازه‌گیری نیروی عمودی از طریق رابطه $3-8$ محاسبه می‌کند.

$$SM = \frac{P}{LH} \times (0.27 + \nu) \quad (9-3)$$

که در این رابطه:

SM : مدول سختی (MPa)

P : میزان حداکثر نیروی عمودی تکرار شونده (N)

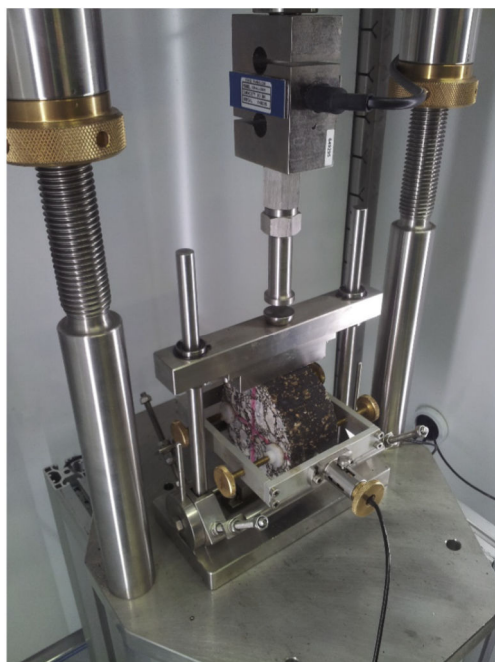
ν : ضریب پواسون که در مخلوط‌های آسفالتی 0.35 فرض می‌شود.

L : ضخامت متوسط نمونه آسفالتی (mm)

H : متوسط تغییر شکل افقی مطلوب (mm)

نحوه بارگذاری و جاگذاری حسگرها در آزمایش تعیین مدول سختی به روش کشش غیرمستقیم در شکل $3-14$ نشان داده شده است.

در این پایان‌نامه جهت تعیین مدول برجهندگی دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و دارای XLPE، از تنش ثابت 100 کیلوپاسکال استفاده شده است و این آزمایش برای دو دمای 5 و 25 درجه سانتی‌گراد و 3 بار تکرار برای درصد‌های مختلف 0 ، 25 ، 50 ، 75 و در کل در 24 مرحله آزمایش صورت گرفته است.



شکل ۳-۱۴ نحوه اعمال بارگذاری و محل سنسورها

۳-۲-۳-۲- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم^۱

خستگی مخلوط آسفالتی به روش آزمایش کشش غیر مستقیم براساس استاندارد ASTM D4123 بدست می آید. آزمون ITFT بر روی نمونه هایی با ابعادی به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت ۴۰ میلیمتر تحت اثر بارگذاری مکرر با پالسهای یک هرتز انجام می گیرد، تا گسیخته شود. گسیختگی به وسیله اندازه گیری میزان تغییر شکل عمودی نمونه تعیین می شود. آزمایش خستگی معمولاً به دو صورت بارگذاری با تنش ثابت و بارگذاری با کرنش ثابت انجام می گیرد. در آزمایش با تنش ثابت، کرنش با تعداد پالسهای بارگذاری افزایش می یابد و در آزمایش با کرنش ثابت، تنشها با تعدادهای پالسهای بارگذاری کاهش می یابد (ASTM D4123). که در این تحقیق از روش تنش ثابت استفاده شده است.

با داشتن کرنش کششی معین برای هر میزان از تنش می توان رابطه بین کرنش کششی و تعداد

¹ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)

سیکلهای منجر به شکست را رسم کرد. در نتیجه اعمال تنش عمودی فشاری در آزمایش خستگی، تنش و کرنش کششی غیر مستقیم به صورت افقی اتفاق می افتد و تکرار بارگذاری در نهایت منجر به ایجاد ترک عمودی در مرکز نمونه خواهد شد. نحوه بارگذاری در آزمایش خستگی نیز به مانند آزمایش مدول سختی، به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می پذیرد. روابط و پارامترهای مربوط به خستگی، از جمله عمر خستگی و تعداد سیکل های لازم برای شکست ناشی از خستگی به وسیله آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم تعیین می شود. آزمایش خستگی هنگامی به پایان می رسد که ترک عمودی در نتیجه تکرار اعمال کرنش کششی غیر مستقیم در مرکز نمونه ایجاد گردد. محدوده اعمال تنش در آزمایش خستگی ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوپاسکال می باشد (ASTM D4123). در این پژوهش آزمایش خستگی تحت تنش ثابت ۱۰۰ کیلو پاسکال و در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی گراد و ۳ بار تکرار برای درصد های مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و در کل در ۲۴ مرحله آزمایش صورت گرفته است. کرنش ایجاد شده در نمونه ها به طور پیوسته توسط دو حسگر دستگاه اندازه گیری شده است.

۳-۲-۴- آزمایش استقامت مارشال (ASTM-D1075)

یکی از آزمایش های مورد استفاده برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، آزمایش مارشال است. در این روش ۱۲۰۰ گرم مصالح سنگی در دمای ۱۴۰ تا ۱۷۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه نگهداری شده و سپس قیر مطابق استاندارد تا دمای ۱۴۰ درجه گرم شده و با درصد بهینه با مصالح مخلوط می گردد. پس از اختلاط مناسب، نمونه ها را در قالب های استوانه ای به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی متر ریخته و به کمک چکش ۴/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۶ سانتی متر از هر طرف ۵۰ ضربه برای تراکم، به نمونه ها وارد می شود. در این آزمایش نمونه ها به دو صورت تقسیم می شوند. دسته اول که شامل نمونه های اشباع هستند، برای مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و دسته دوم

که شامل نمونه های خشک هستند به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در آب با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و هر دو دسته بلافاصله پس از اتمام زمان مقرر، زیر جک مارشال قرار می گیرند (ASTM D1075). نسبت مقاومت مارشال در حالت اشباع (M_1) به حالت خشک (M_2) را نسبت مارشال^۱ می نامند که این نسبت با توجه به استاندارد ASTM D1075 نباید کمتر از ۷۵ درصد شود. نمایی از دستگاه مقاومت مارشال در تصویر قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۵ دستگاه مارشال

¹ Marshal Stability Ratio (MSR)

فصل چهارم

نتایج آزمایش‌ها و بحث در آن

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی XLPE برای دستیابی به قیر بهینه بیان می‌شود. در ادامه فصل نتایج آزمایش‌های مدول برجهندگی، خستگی و ارزیابی حساسیت رطوبتی به روش مارشال ذکر می‌شود و در انتهای فصل به کمک نمودارها، نتایج باهم مقایسه می‌شود.

۴-۲- نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌ها به‌منظور

محاسبه درصد قیر بهینه

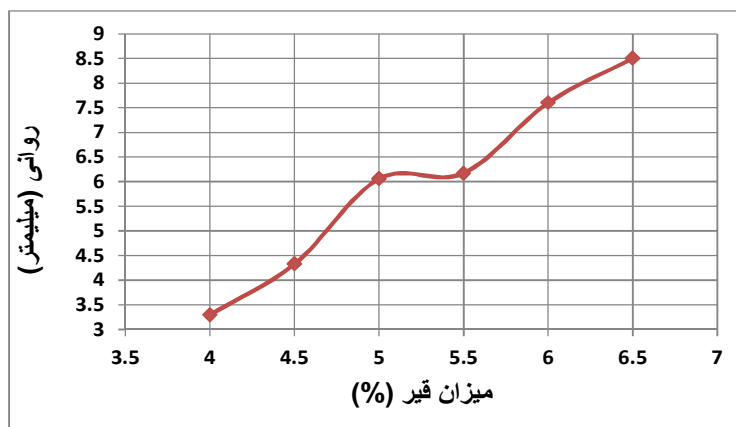
۴-۲-۱- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های شاهد

نمونه‌های شاهد مخلوط آسفالتی در ۶ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ ساخته شده‌اند. در جدول زیر مشخصات هر گروه به تفکیک قابل مشاهده است.

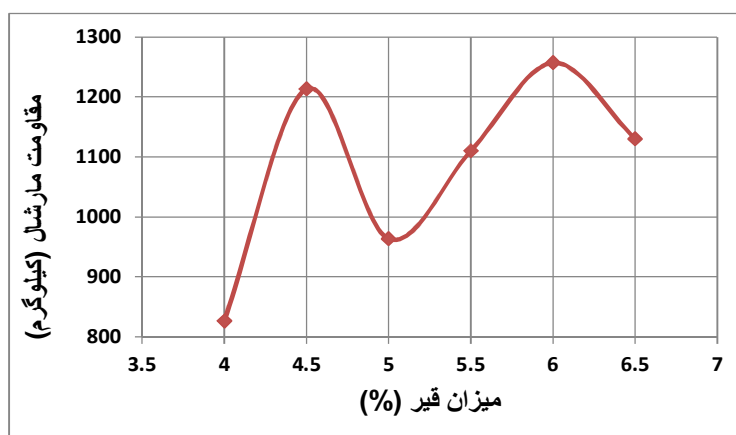
در ادامه با رسم نمودارهای مقاومت مارشال-درصد قیر، روانی-درصد قیر، وزن مخصوص-درصد قیر، فضای خالی نمونه-درصد قیر و فضای خالی مصالح سنگی-درصد قیر، درصد بهینه و مناسب قیر به دست می‌آید. در تمامی نمودارها محور افقی درصد قیر است.

جدول ۴-۱ مشخصات نمونه‌های شاهد

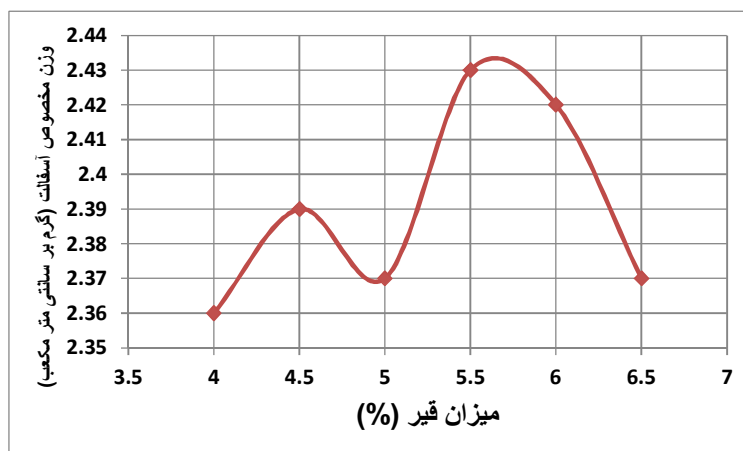
نمونه	وزن خشک (g)	وزن غوطه‌وری	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ^۳)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۴۹	۷۲۲	۸۴۰	۳/۳	۲/۳۷	۲/۴۸	۱۲/۴۹	۴/۴۵
۲	۱۲۴۴	۷۱۷	۸۴۰	۳/۴	۲/۳۶	۲/۴۸	۱۲/۸۶	۴/۸۳
۳	۱۲۴۵	۷۲۰	۸۰۰	۳/۲	۲/۳۶	۲/۴۸	۱۲/۸۶	۴/۴
۴	۱۲۵۳	۷۳۰	۱۰۹۰	۴	۲/۳۹	۲/۴۸	۱۲/۲۱	۳/۵
۵	۱۲۵۵	۷۳۲	۱۳۵۰	۴/۵	۲/۴	۲/۴۸	۱۱/۸۴	۳/۶
۶	۱۲۴۶	۷۲۰	۱۲۰۰	۴/۵	۲/۳۷	۲/۴۸	۱۲/۹۵	۳/۶
۷	۱۲۴۸	۷۲۰	۹۵۰	۷	۲/۳۶	۲/۴۷	۱۳/۷۷	۴/۴۵
۸	۱۲۵۱	۷۲۳	۸۴۰	۵	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۳/۴۰	۴/۰۵
۹	۱۲۵۷	۷۲۶	۱۱۰۰	۶/۲	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۳/۴۰	۴/۰۵
۱۰	۱۲۶۵	۷۴۵	۱۰۹۰	۶	۲/۴۳	۲/۵۳	۱۱/۶۸	۳/۹۵
۱۱	۱۲۵۹	۷۴۲	۱۱۵۰	۶	۲/۴۳	۲/۵۳	۱۱/۶۸	۳/۹۵
۱۲	۱۲۶۸	۷۴۵	۱۰۹۰	۶/۵	۲/۴۲	۲/۵۳	۱۲/۰۴	۳/۴
۱۳	۱۲۷۵	۷۵۰	۱۴۰۰	۷/۵	۲/۴۳	۲/۵	۱۲/۱۵	۳/۶
۱۴	۱۲۶۹	۷۴۳	۱۲۷۰	۸	۲/۴۱	۲/۵	۱۲/۸۷	۳/۶
۱۵	۱۲۶۵	۷۴۰	۱۱۰۰	۷/۳	۲/۴۱	۲/۵	۱۲/۸۷	۳/۶۵
۱۶	۱۲۶۰	۷۳۰	۱۱۲۰	۸/۵	۲/۳۸	۲/۴۵	۱۴/۴۱	۳/۳
۱۷	۱۲۹۹	۷۵۲	۱۱۳۰	۸/۷	۲/۳۷	۲/۴۵	۱۴/۷۷	۳/۲
۱۸	۱۲۷۱	۷۳۵	۱۱۴۰	۸/۳	۲/۳۷	۲/۴۵	۱۴/۷۷	۳/۲



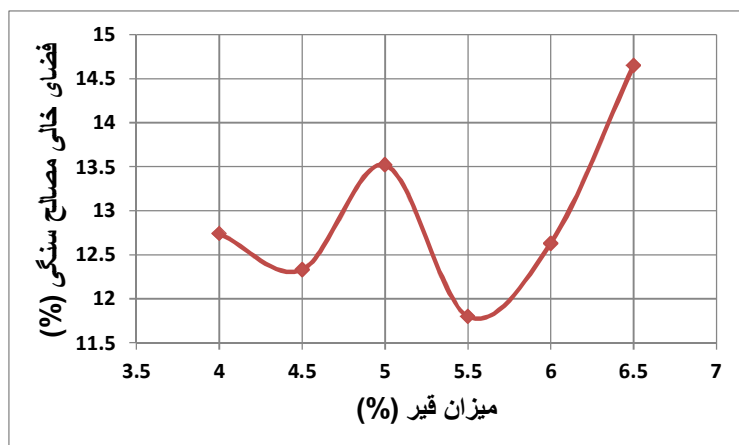
شکل ۱-۴ نمودار درصد وزنی قیر-روانی



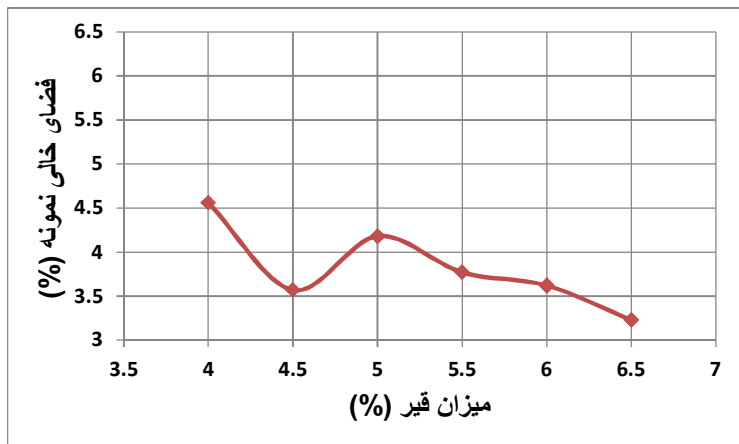
شکل ۲-۴ نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال



شکل ۳-۴ نمودار درصد وزنی قیر-وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۴ نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۵ نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با تحلیل و بررسی نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای نمونه های شاهد برابر ۴/۲۵ در نظر گرفته

شده است.

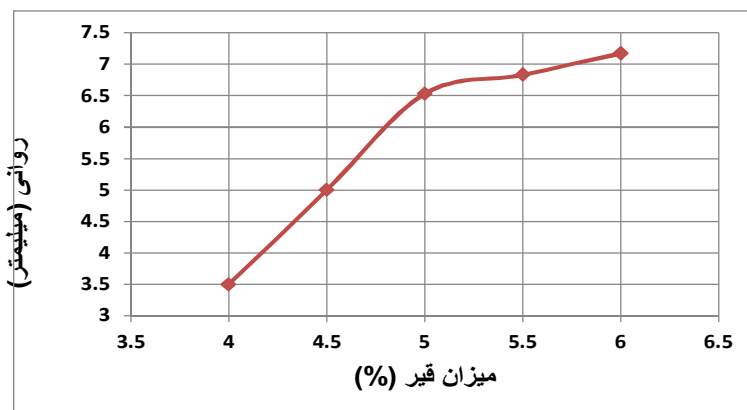
۴-۲-۲- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد XLPE

در این بخش نمونه‌ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شده‌اند و

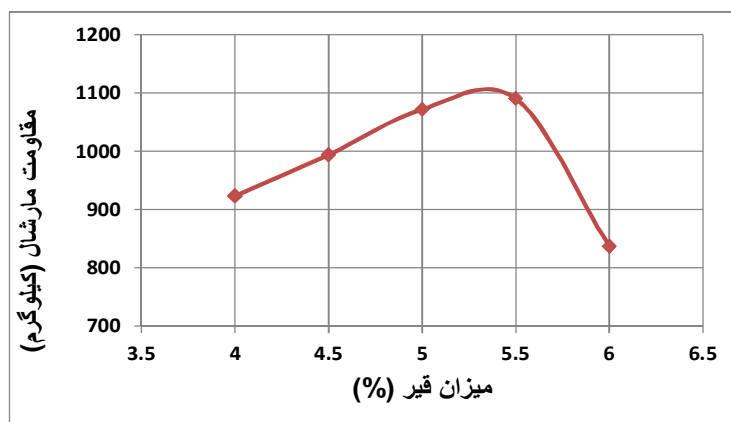
به همچنین قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می‌شود.

جدول ۴-۲ مشخصات نمونه‌های حاوی ۲۵٪ ضایعات XLPE

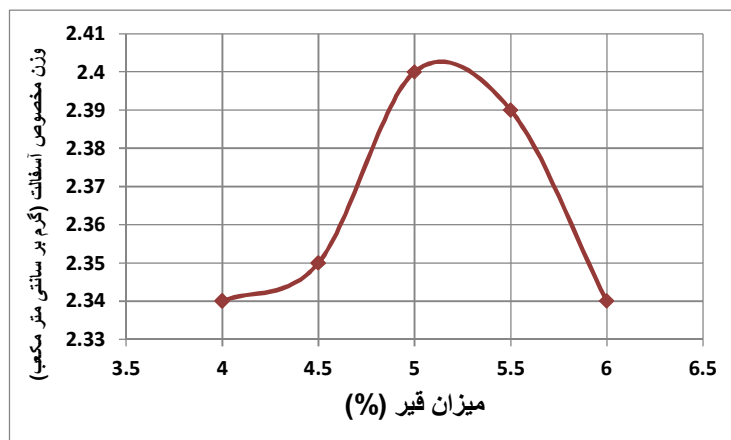
نمونه	وزن خشک (g)	وزن غوطه‌وری	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ^۳)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۱۹	۷۰۰	۱۰۳۰	۴	۲/۳۵	۲/۴۶	۱۳/۲۳	۴/۵
۲	۱۲۱۹	۶۹۲	۸۴۰	۳	۲/۳۱	۲/۴۳	۱۴/۷۱	۵
۳	۱۲۰۹	۷۰۰	۹۰۰	۳/۵	۲/۳۷	۲/۴۶	۱۲/۴۹	۴
۴	۱۲۲۰	۷۰۲	۹۲۰	۶/۵	۲/۳۵	۲/۴۵	۱۳/۶۸	۴
۵	۱۲۲۴	۷۰۴	۹۵۰	۴	۲/۳۵	۲/۴۶	۱۳/۶۸	۴/۵
۶	۱۲۱۹	۷۰۳	۱۱۱۱	۴/۵	۲/۳۵	۲/۴۶	۱۳/۶۸	۴/۵
۷	۱۲۲۶	۷۲۰	۱۰۰۰	۶/۲	۲/۴۲	۲/۵۳	۱۱/۵۷	۴/۲
۸	۱۲۳۴	۷۱۶	۱۱۰۰	۷/۱	۲/۳۸	۲/۴۸	۱۳	۴
۹	۱۲۳۴	۷۱۸	۱۱۱۵	۶/۳	۲/۳۹	۲/۵	۱۲/۶۷	۴/۵
۱۰	۱۲۴۳	۷۲۲	۱۰۰۰	۶	۲/۳۹	۲/۴۸	۱۳/۱۳	۳/۸
۱۱	۱۲۴۰	۷۲۳	۹۷۰	۷/۵	۲/۴	۲/۵	۱۳/۱۳	۴/۱
۱۲	۱۲۴۳	۷۲۰	۱۳۰۰	۷	۲/۳۸	۲/۴۸	۱۲/۷۷	۳/۹
۱۳	۱۱۴۵	۶۴۸	۶۵۰	۸	۲/۳۰	۲/۳۹	۱۶/۸۴	۳/۶
۱۴	۱۲۰۴	۶۹۵	۸۶۰	۶/۵	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۴/۳۱	۳/۹
۱۵	۱۲۰۰	۶۹۰	۱۰۰۰	۷	۲/۳۵	۲/۴۴	۱۵/۰۳	۳/۵



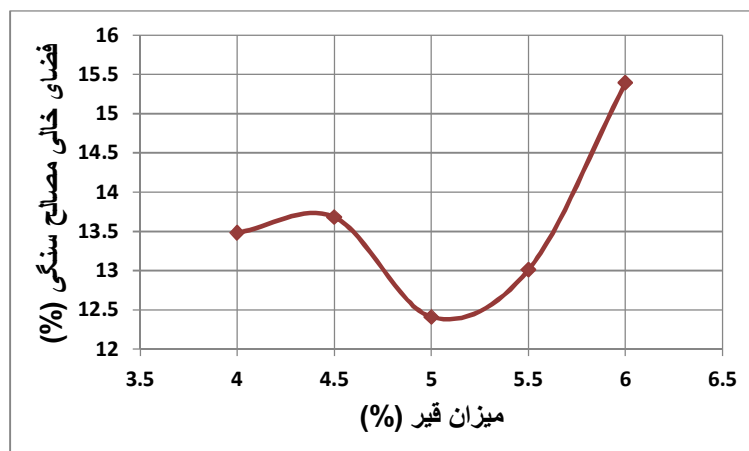
شکل ۴-۶ نمودار درصد وزنی قیر-روانی



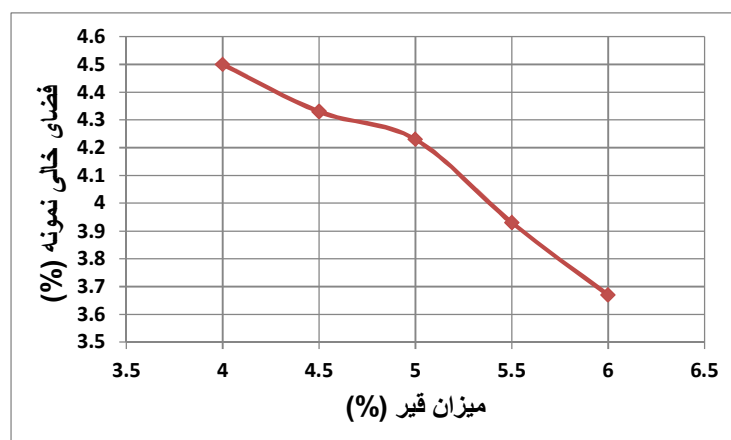
شکل ۴-۷ نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال



شکل ۴-۸ نمودار درصد وزنی قیر-وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۹ نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۱۰ نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای این گروه برابر با ۴ در نظر گرفته

شده است.

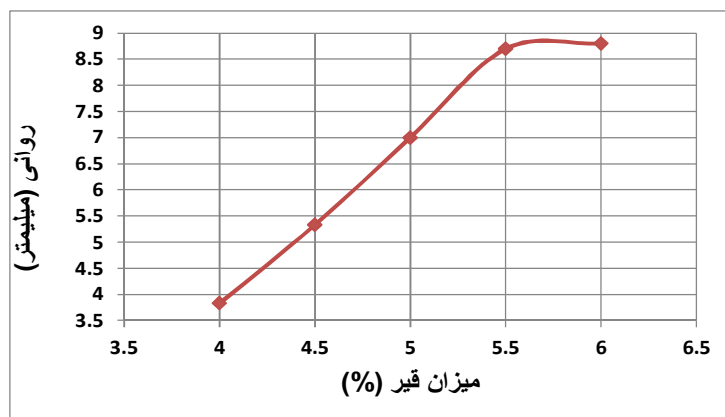
۴-۲-۳- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد XLPE

در این بخش نمونه‌ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شده‌اند و

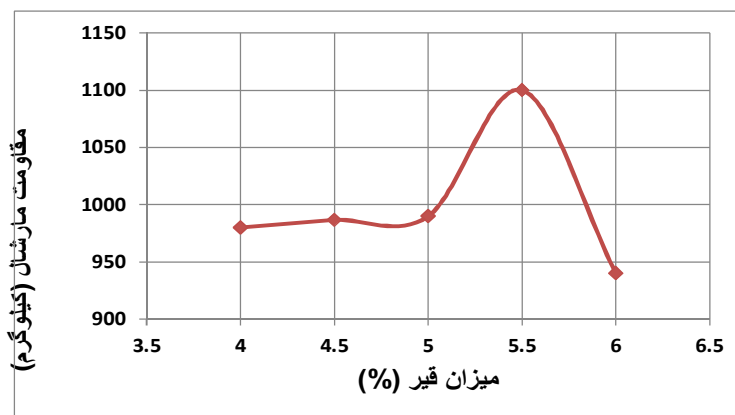
به همچنین قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می‌شود.

جدول ۳-۴ مشخصات نمونه‌های حاوی ۵۰٪ ضایعات XLPE

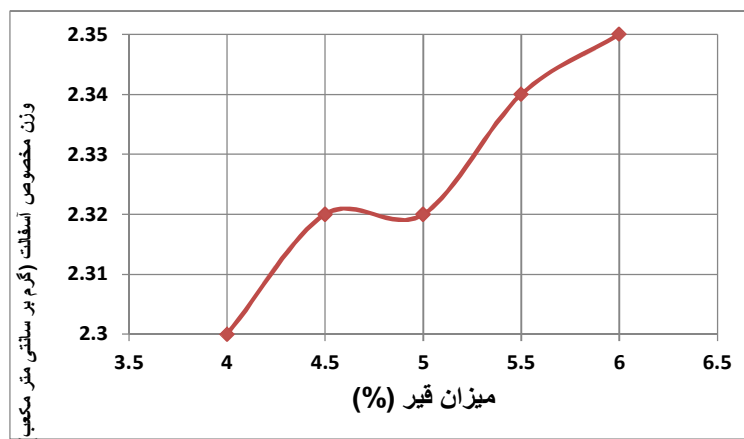
نمونه	وزن خشک (g)	وزن غوطه‌وری	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ^۳)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۰۰	۶۷۷	۹۹۰	۳	۲/۲۹	۲/۴۱	۱۵/۴۴	۵
۲	۱۲۰۲	۶۸۴	۱۱۰۰	۴	۲/۳۲	۲/۴۳	۱۴/۳۴	۴/۶
۳	۱۲۰۰	۶۷۵	۸۵۰	۴/۵	۲/۲۹	۲/۴۰	۱۵/۴۴	۴/۷
۴	۱۱۹۸	۶۸۱	۹۳۰	۵	۲/۳۲	۲/۴۳	۱۴/۷۸	۴/۵
۵	۱۲۰۵	۶۸۴	۱۰۸۰	۵	۲/۳۱	۲/۴۳	۱۵/۱۵	۵
۶	۱۲۰۸	۶۹۰	۹۵۰	۶	۲/۳۳	۲/۴۳	۱۴/۴۱	۴/۲
۷	۱۲۰۸	۶۹۰	۱۰۰۰	۶	۲/۳۳	۲/۴۲	۱۴/۸۶	۳/۷۵
۸	۱۲۰۱	۶۸۵	۱۰۰۰	۷	۲/۳۲	۲/۴۳	۱۵/۲۳	۴/۵
۹	۱۲۰۲	۶۸۰	۹۷۰	۸	۲/۳۰	۲/۴۱	۱۵/۹۶	۴/۵
۱۰	۱۲۱۶	۶۹۳	۱۱۲۰	۱۰	۲/۳۳	۲/۴۱	۱۵/۳۱	۳/۵
۱۱	۱۲۱۶	۶۹۹	۱۱۲۰	۸/۴	۲/۳۵	۲/۴۷	۱۴/۵۹	۴/۸
۱۲	۱۲۱۷	۷۰۰	۱۰۶۰	۷/۷	۲/۳۵	۲/۴۶	۱۴/۵۹	۴/۳
۱۳	۱۲۱۷	۷۰۰	۹۰۰	۸/۴	۲/۳۵	۲/۴۳	۱۵	۳/۳
۱۴	۱۲۲۵	۷۰۱	۹۵۰	۱۰	۲/۳۴	۲/۴۴	۱۵/۴	۴
۱۵	۱۲۲۸	۷۰۵	۹۷۰	۸	۲/۳۵	۲/۴۶	۱۵	۴/۵



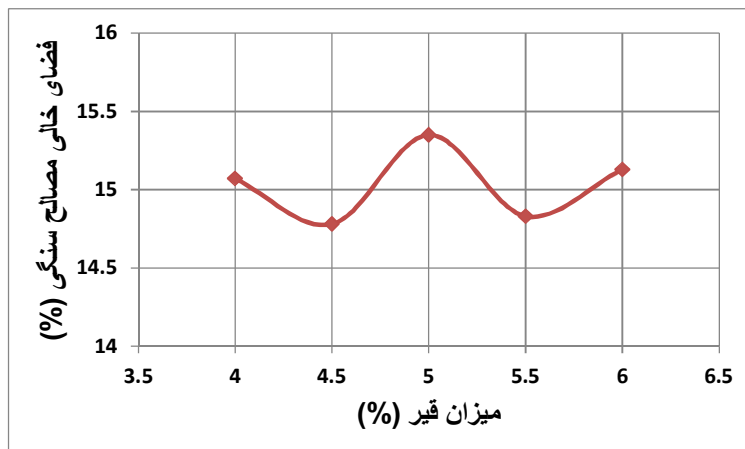
شکل ۴-۱۱ نمودار درصد وزنی قیر-روانی



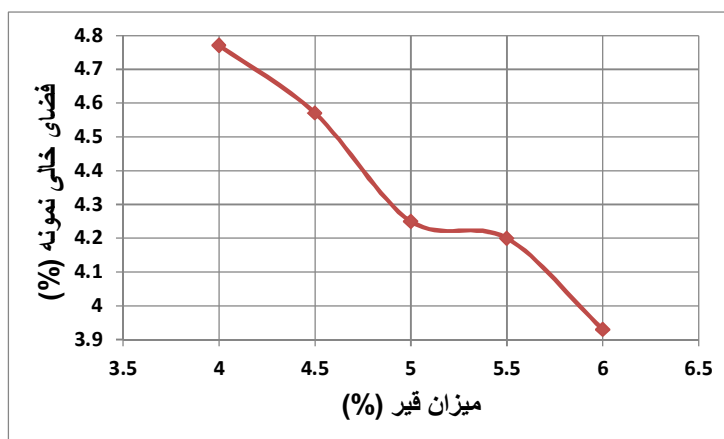
شکل ۴-۱۲ نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال



شکل ۴-۱۳ نمودار درصد وزنی قیر-وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۱۴ نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۱۵ نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای این گروه برابر با ۴ در نظر گرفته

شده است.

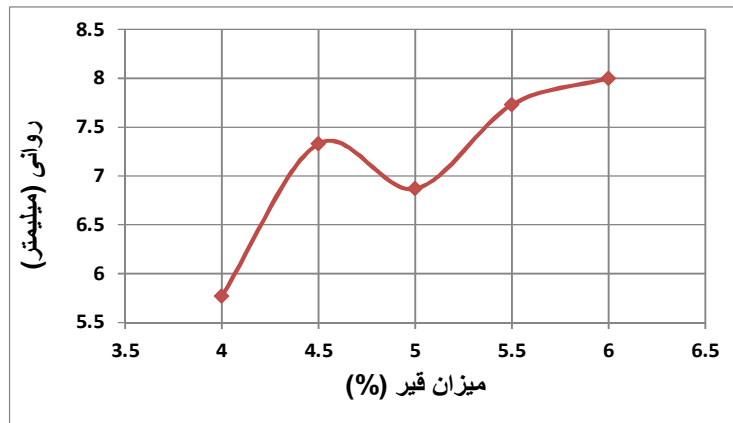
۴-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد XLPE

در این بخش نمونه‌ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شده‌اند و

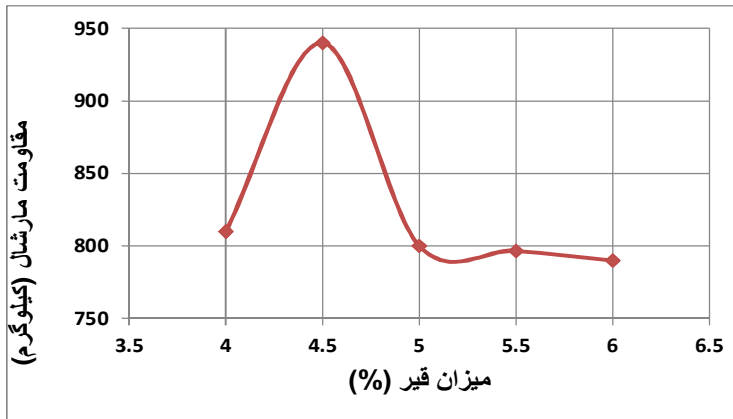
به همچنین قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می‌شود.

جدول ۴-۴ مشخصات نمونه‌های حاوی ۷۵٪ ضایعات XLPE

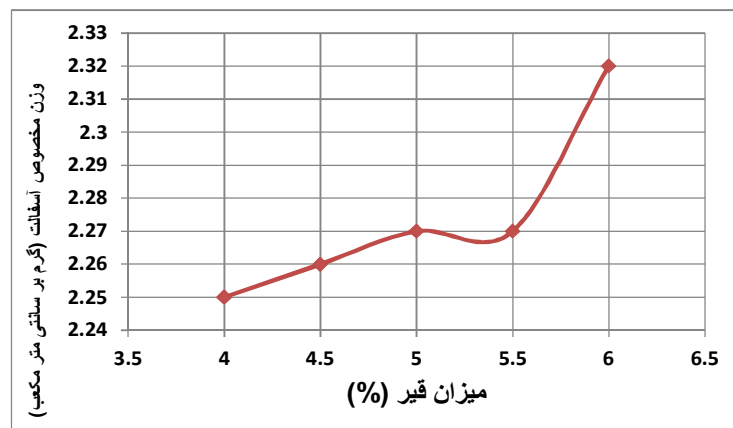
نمونه	وزن خشک (g)	وزن غوطه‌وری	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ^۳)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۱۷۸	۶۵۳	۸۵۰	۵/۷	۲/۲۴	۲/۴۳	۱۷/۲۹	۸
۲	۱۱۶۴	۶۵۸	۷۹۰	۴/۸	۲/۳۰	۲/۴۲	۱۵/۰۸	۵
۳	۱۱۸۲	۶۴۸	۷۹۰	۶/۸	۲/۲۱	۲/۳۵	۱۸/۴	۶
۴	۱۱۸۱	۶۶۵	۱۰۰۰	۷	۲/۲۹	۲/۴۵	۱۵/۸۹	۶/۶
۵	۱۱۸۲	۶۴۹	۹۰۰	۸	۲/۲۲	۲/۳۳	۱۸/۴۶	۵
۶	۱۱۹۱	۶۶۵	۹۲۰	۷	۲/۲۶	۲/۳۷	۱۶/۹۹	۴/۵
۷	۱۱۸۷	۶۶۷	۸۰۰	۷/۱	۲/۲۸	۲/۳۹	۱۶/۶۹	۴/۵
۸	۱۱۹۲	۶۶۵	۷۰۰	۶	۲/۲۶	۲/۴۰	۱۷/۴۲	۶
۹	۱۱۸۷	۶۶۳	۹۰۰	۷/۵	۲/۲۷	۲/۴۰	۱۷/۰۶	۵
۱۰	۱۱۹۵	۶۸۰	۸۲۰	۷	۲/۳۲	۲/۴۲	۱۵/۶۸	۴
۱۱	۱۱۹۳	۶۵۸	۸۰۰	۸	۲/۲۳	۲/۳۱	۱۸/۹۵	۳/۳
۱۲	۱۱۹۷	۶۶۵	۷۷۰	۸/۲	۲/۲۵	۲/۳۳	۱۸/۲۲	۳/۵
۱۳	۱۱۹۵	۶۸۲	۸۰۰	۸	۲/۳۳	۲/۴۱	۱۵/۷۶	۳/۵
۱۴	۱۱۹۸	۶۷۷	۷۷۰	۷/۵	۲/۳۰	۲/۳۷	۱۶/۸۵	۳
۱۵	۱۲۰۰	۶۸۷	۸۰۰	۸/۵	۲/۳۴	۲/۴۴	۱۵/۴	۴



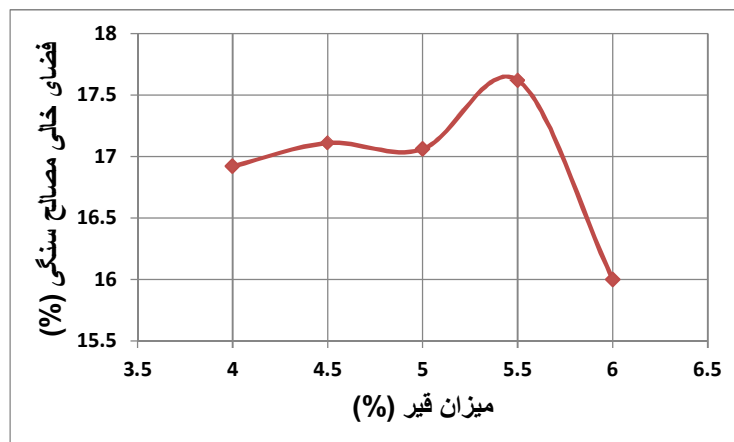
شکل ۴-۱۶ نمودار درصد وزنی قیر- روانی



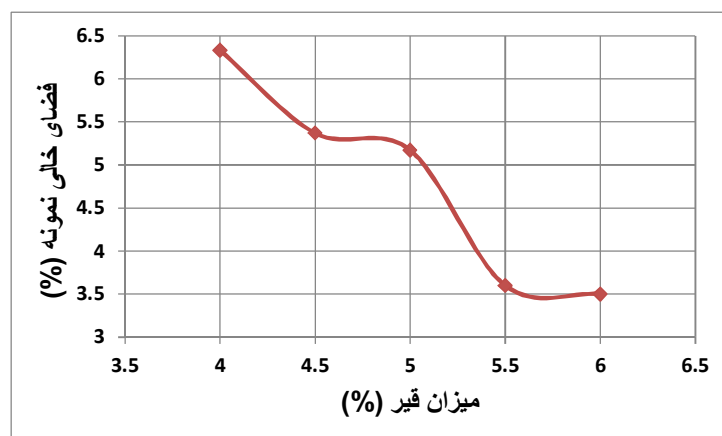
شکل ۴-۱۷ نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال



شکل ۴-۱۸ نمودار درصد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۱۹ نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



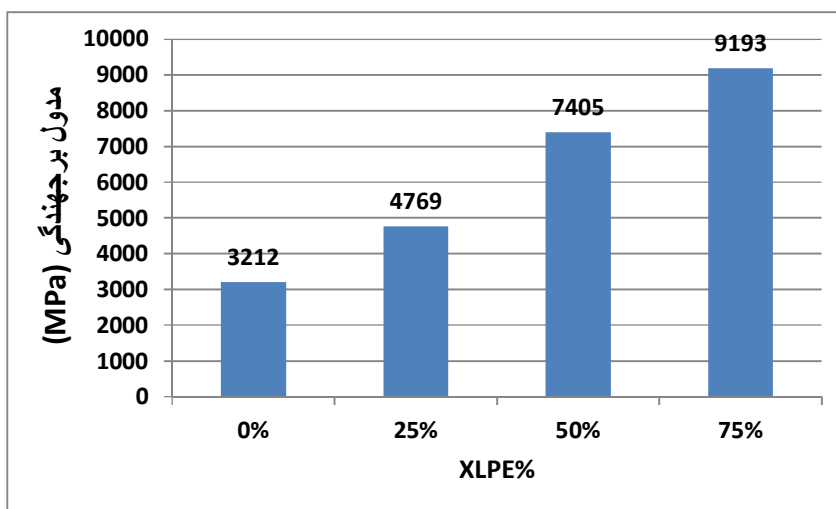
شکل ۴-۲۰ نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای این گروه برابر با ۴/۲۵ در نظر گرفته شده است.

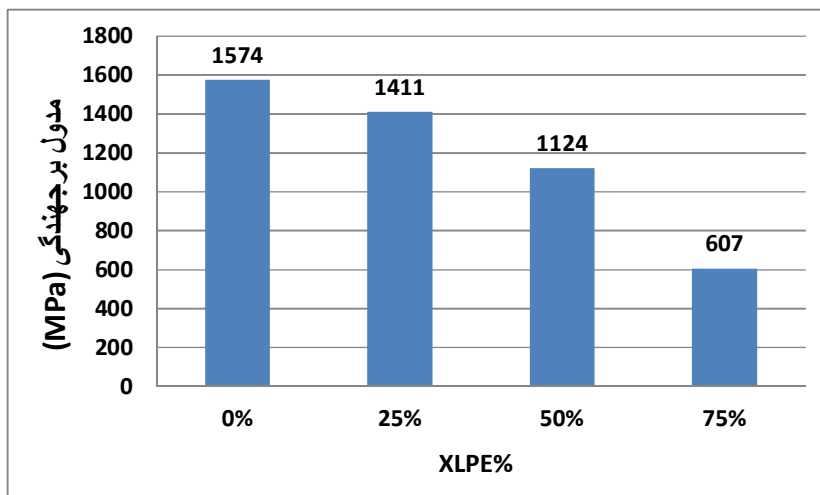
۴-۳- آزمایش تعیین مدول برجهندگی به روش کشش غیر

مستقیم

به منظور تعیین مقدار مدول برجهندگی در مخلوط آسفالتی، شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ نتایج آزمایش مدول برجهندگی را در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی گراد برای مقادیر مختلف XLPE نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش درجه حرارت، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی به دلیل کاهش ویسکوزیته و مدول سفتی قیر، کاهش می‌یابد. و از آنجایی که XLPE به عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالتی عمل می‌کند بخشی از قیر را به خود اختصاص می‌دهد و انتظار می‌رود به دلیل کمتر بودن سختی XLPE نسبت به سنگدانه‌ها، سختی مخلوط آسفالتی نیز کاهش و انعطاف پذیری آن نیز افزایش یابد. با توجه به شکل ۴-۲۱ همانطور که مشاهده می‌شود در دمای ۵ درجه سانتی گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه‌ها، مدول برجهندگی در حال افزایش است. و شکل ۴-۲۲ نشان می‌دهد که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه‌ها مدول برجهندگی رو به کاهش است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دمای پایین‌تر در اثر افزایش قابل توجه سختی قیر، و جذب تنش توسط سنگدانه‌ها و بخصوص XLPE‌های جایگزین سنگدانه، مدول برجهندگی، افزایشی و در دمای بالاتر به دلیل حساسیت پذیری قیر و کاهش سختی آن مدول برجهندگی، کاهش می‌یابد. و روانی بیشتر قیر در دمای بالا، که باعث جابجایی سنگدانه‌ها و از بین رفتن جذب تنش توسط آنها می‌شود. می‌تواند عامل این کاهش باشد. و این موضوع نشان می‌دهد که قیر نقش برجسته‌تری نسبت به ذرات XLPE جایگزین سنگدانه در نتایج مدول برجهندگی دارد. نتایج مدول برجهندگی کلیه نمونه‌ها در جدول پ-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱ مدول برجهنگی نمونه ها در دمای ۵ °C



شکل ۴-۲۲ مدول برجهنگی نمونه ها در دمای ۲۵ °C

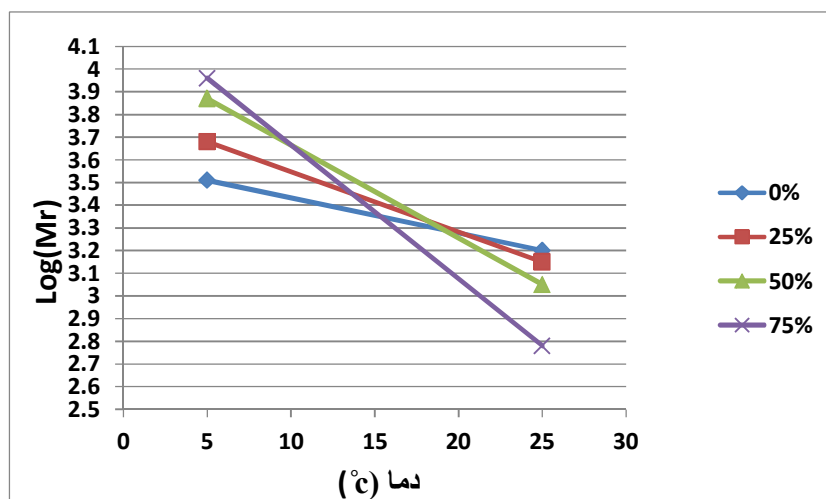
نرخ تغییرات مدول برجهنگی (M_T) با دما نشان دهنده حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی نسبت به تغییرات دما است. رابطه بین $\log(M_T)$ و دما برای ارزیابی حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی استفاده می شود. مقادیر بیشتر شیب (B) نشان دهنده حساسیت حرارتی بیشتر است. معادله کلی بین مدول

برجهندگی و دما (T) در رابطه (۴-۱) نشان داده شده است.

$$\text{Log}(M_r) = A + BT \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه A و B به ترتیب مقدار ثابت و شیب نمودار است.

همانطور که در شکل ۴-۲۳ مشاهده می شود با افزایش مقدار XLPE در مخلوط آسفالتی شیب نمودار در حال افزایش است و این بدین معنی است که با افزایش مقدار XLPE در مخلوط آسفالتی، حساسیت حرارتی مخلوط افزایش می یابد.



شکل ۴-۲۳ حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی در نمونه های شاهد و حاوی XLPE

۴-۴- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم

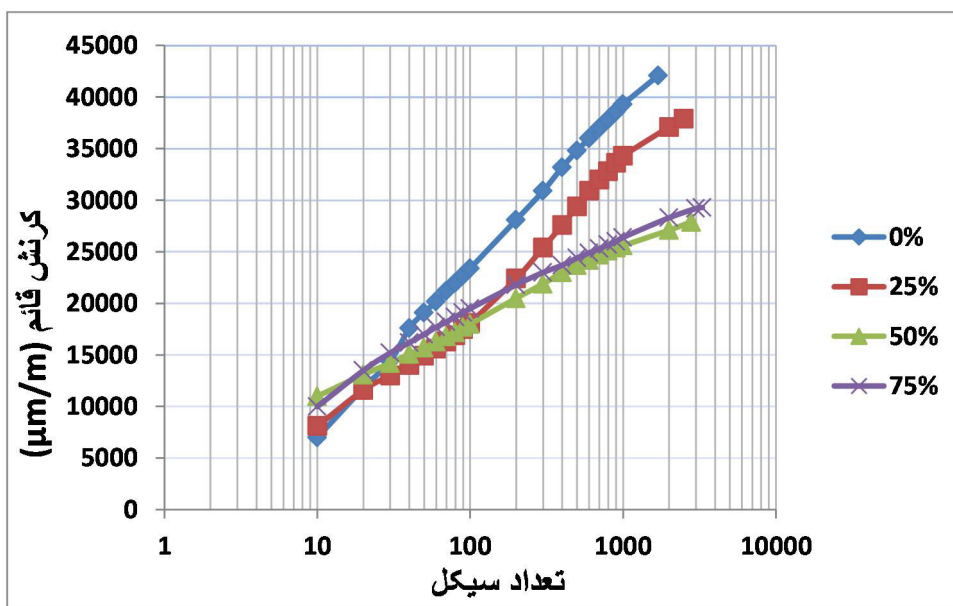
به منظور مقایسه رفتار خستگی نمونه های مخلوط آسفالتی، شکل های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ مقدار کرنش قائم در مقابل تعداد سیکل ها را برای نمونه های با مقادیر مختلف XLPE و برای دو دمای ۵ و ۲۵ درجه

سانتی گراد نشان می دهد. با توجه به شکل ۴-۲۴ مشاهده می شود که در دمای ۵ درجه سانتی گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه ها، مقدار کرنش کاهش یافته و از طرفی تعداد سیکل منجر به شکست نمونه ها، افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می شود این کاهش کرنش با افزایش XLPE، تا نمونه های ۵۰٪ ادامه داشته است. اما در نمونه های ۷۵٪ مقدار کرنش کمی از نمونه های ۵۰٪ بیشتر بوده است. روی هم رفته می توان نتیجه گرفت که ترکهای ایجاد شده در اثر خستگی در نمونه های با در صد پایین XLPE، می توانند باعث زودتر شکسته شدن نمونه شوند. و در نمونه های با در صد بیشتر XLPE رشد ترکها به تاخیر افتاده است و نمونه دیرتر منجر به شکست شده است. و این می تواند در اثر سخت شدن نمونه در دمای ۵ درجه سانتی گراد و همچنین چسبندگی و پیوستگی مناسب قیر و سنگدانه ها بخصوص XLPE در این دما باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در دمای ۵ درجه سانتی گراد، افزایش در صد XLPE در نمونه های آسفالتی سبب کاهش مقدار کرنش و افزایش سیکل منجر به شکست نمونه ها می شود. و مخلوط آسفالتی رفتار مناسبی را در این دما از خود نشان می دهد.

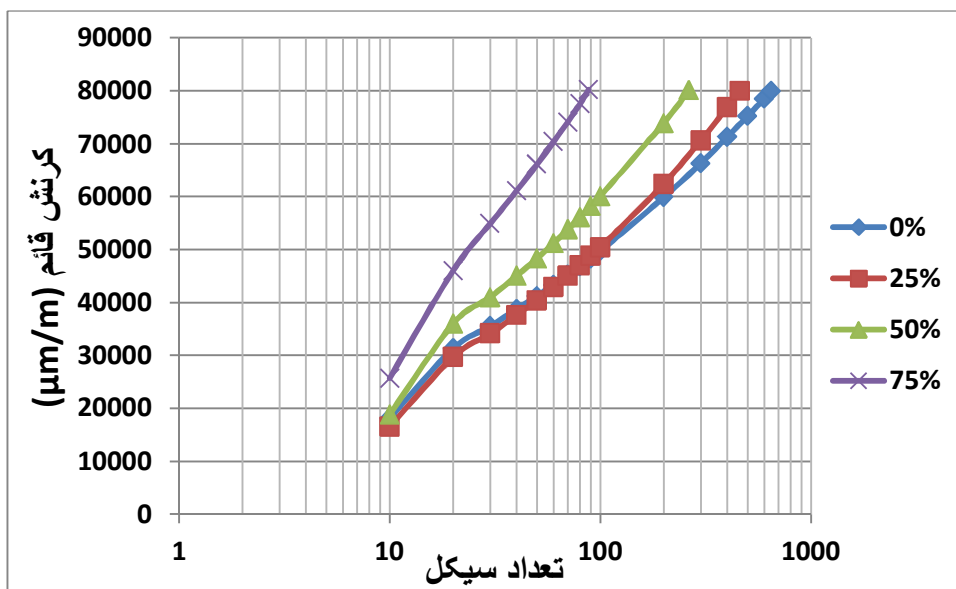
همانطور که در شکل ۴-۲۵ مشاهده می شود، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، با افزایش مقدار XLPE، کرنش برای همه نمونه ها تقریباً ثابت بوده است. اما تعداد سیکل منجر به شکست، کاهش یافته است. و این موضوع بیانگر این است که قیر، نقش برجسته تری نسبت به XLPE داشته است و علت این مسئله می تواند به دلیل حساسیت پذیری حرارتی قیر و افزایش روانی آن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و همچنین نبود پیوستگی مناسب بین سنگدانه بخصوص XLPE و قیر در این دما باشد.

شکلهای ۴-۲۶ و ۴-۲۷ تعداد سیکل منجر به شکست را در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی گراد نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود در دمای کمتر (۵ درجه سانتی گراد) تعداد سیکل منجر به شکست بیشتر است. و این می تواند به دلیل تغییرات مدول برجهندگی با تغییر دما، در نمونه های آسفالتی باشد. که در دمای پایین نمونه ها مقاومت خوبی در برابر بارها از خود نشان می دهند. نتایج

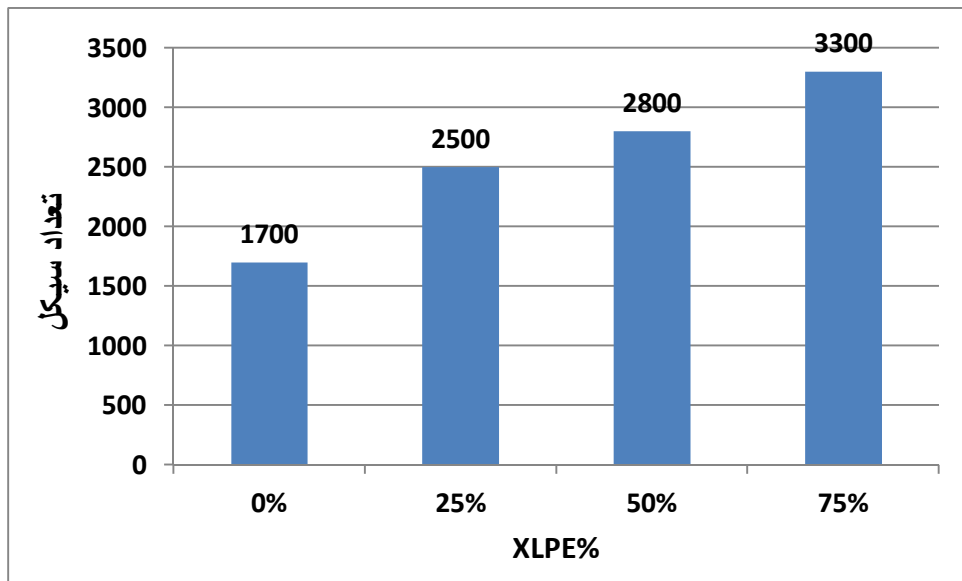
تعداد سیکل منجر به شکست کلیه نمونه ها در جدول پ-۲ نشان داده شده است.



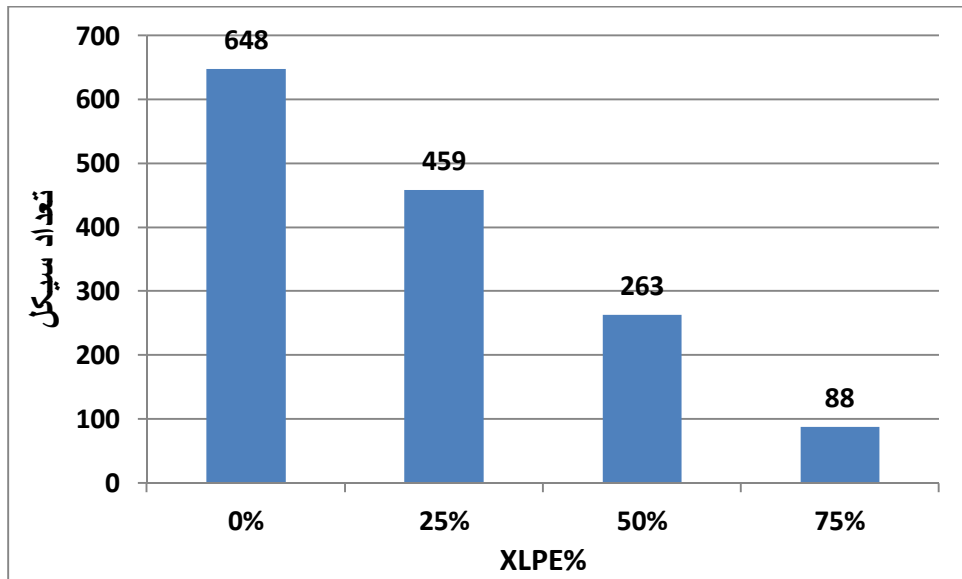
شکل ۲۴-۴ مقایسه رفتارخستگی نمونه ها در دمای ۵ °C



شکل ۲۵-۴ مقایسه رفتارخستگی نمونه ها در دمای ۲۵ °C



شکل ۴-۲۶ تعداد سیکل منجر به شکست در دمای ۵ °C



شکل ۴-۲۷ تعداد سیکل منجر به شکست در دمای ۲۵ °C

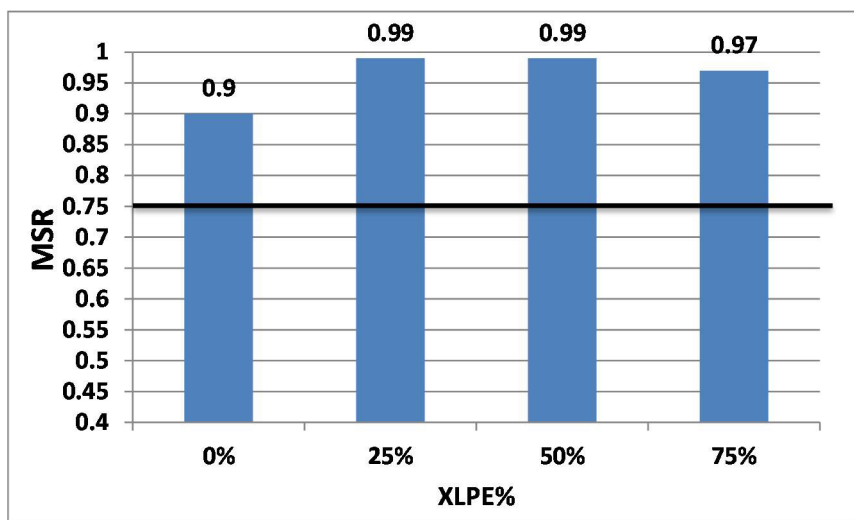
۴-۵- آزمایش ارزیابی حساسیت رطوبتی به روش مقاومت

مارشال

نتایج آزمایش مقاومت مارشال به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه ها در جدول ۵ و همچنین شکل ۴-۲۸ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می شود در تمام نمونه ها مقدار MSR بیشتر از مقدار مجاز (۰/۷۵) است. و نمونه های حاوی XLPE رفتار خوبی را در مقابل حساسیت رطوبتی از خود نشان داده اند.

جدول ۴-۵ مقادیر مقاومت مارشال و نسبت MSR برای نمونه ها

MSR	مقاومت فشاری ۳ نمونه اشباع (KN)	مقاومت فشاری ۳ نمونه خشک (KN)	درصد حجمی XLPE
۰/۹	۸/۹۵	۹/۹	۰
۰/۹۹	۹/۵۵	۹/۶۵	۲۵
۰/۹۹	۹/۷۵	۹/۸	۵۰
۰/۹۷	۷/۸۳	۸/۱	۷۵



شکل ۴-۲۸ مقادیر MSR برای نمونه های مختلف

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان استفاده از ضایعات پلی‌اتیلن کراس لینک یا به اختصار XLPE، به عنوان جایگزین مصالح سنگی ریزدانه با درصد‌های حجمی مختلف، در مخلوط روسازی آسفالتی ارزیابی شده است. برای این منظور از آزمایش‌های تعیین مدول برجهندگی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ارزیابی حساسیت رطوبتی به روش مقاومت مارشال استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از XLPE به عنوان مصالح سنگی ریزدانه، در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، سبب بهبود برخی از خواص مکانیکی روسازی آسفالتی می‌شود. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده در این خصوص می‌توان به موارد زیر به عنوان دستاوردهای این پژوهش اشاره کرد:

۱. با افزایش درصد XLPE، مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. اما در همه درصدها مقاومت مارشال از حداقل آیین نامه بیشتر است. همچنین روانی نمونه‌ها نیز با افزایش XLPE افزایش می‌یابد.
۲. با افزایش درصد XLPE، و همچنین با توجه به کم بودن وزن مخصوص XLPE نسبت به سنگدانه طبیعی، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
۳. با افزایش درصد XLPE، فضای خالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
۴. همانطور که مشاهده شد در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه‌ها، مقدار مدول برجهندگی در حال افزایش و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه‌ها، این مقدار کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در دمای پایین به دلیل افزایش سختی قیر و جذب تنش توسط سنگدانه‌ها بخصوص XLPE جایگزین

سنگدانه، مدول برجهندگی افزایشی و در دمای بالاتر به دلیل حساسیت پذیری قیر و کاهش سختی و افزایش روانی آن، مدول برجهندگی با افزایش XLPE کاهشی بوده است. و حساسیت پذیری قیر نقش برجسته تری نسبت به XLPE در نتایج حاصله دارد.

۵. با توجه به نرخ تغییرات مدول برجهندگی (M_r) با دما، مشاهده می شود که با افزایش مقدار XLPE در نمونه ها حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی افزایش می یابد.

۶. در دمای ۵ درجه سانتی گراد با افزایش مقدار XLPE در نمونه ها، مقدار کرنش کاهش یافته و تعداد سیکل منجر به شکست افزایش می یابد. که این می تواند در اثر سخت شدن نمونه و همچنین چسبندگی و پیوستگی مناسب قیر و سنگدانه ها بخصوص XLPE در این دما باشد.

۷. در دمای ۵ درجه سانتی گراد، نمونه هایی که دارای در صد کمتری از XLPE هستند زودتر شکسته شده و تعداد سیکل منجر به شکست آنها کمتر است. و افزایش مقدار XLPE در نمونه ها باعث تاخیر در رشد ترکهای خستگی و دیرتر شکسته شدن نمونه ها می شود. و مخلوط آسفالتی رفتار مناسبی را از خود نشان می دهد.

۸. در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، با افزایش مقدار XLPE، کرنش برای همه نمونه تقریباً ثابت بوده است. اما تعداد سیکل منجر به شکست، کاهش یافته است. و این موضوع نشان می دهد که قیر، نقش برجسته تری نسبت به XLPE داشته است و علت این مسئله می تواند به دلیل حساسیت پذیری حرارتی قیر و افزایش روانی آن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و همچنین نبود پیوستگی مناسب بین سنگدانه بخصوص XLPE و قیر در این دما باشد.

۹. با توجه به آزمایش مقاومت مارشال به منظور حساسیت پذیری رطوبتی مخلوط، مشاهده شد که در تمام نمونه های شاهد و حاوی XLPE مقدار MSR بیشتر از مقدار مجاز می باشد. و نمونه های حاوی XLPE رفتار خوبی را در مقابل حساسیت رطوبتی از خود نشان داده اند.

۱۰. از این مطالعه می توان نتیجه گرفت که استفاده از ضایعات XLPE به عنوان سنگدانه، در مناطق سردسیر و دما های پایین می تواند اثرات مثبتی در رفتار دینامیکی مخلوط آسفالتی ایجاد کند.

۱۱. علاوه بر عملی بودن استفاده از این ضایعات در روسازی آسفالتی و بهبود برخی ویژگی های آن، استفاده از ضایعات XLPE سبب بازیافت آنها شده است. با توجه به اینکه این ضایعات تجزیه ناپذیر هستند و روانی پایینی دارند (قابلیت بازیافت بسیار کم) این کار از جنبه ی زیست محیطی بسیار مطلوب ارزیابی می شود.

۵-۲- پیشنهادها

۱. به دلیل مناسب نبودن رفتار دینامیکی مخلوط آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد پیشنهاد می شود رفتار دینامیکی مخلوط آسفالتی حاوی ضایعات XLPE در دمایی بین ۵ تا ۲۵ درجه سانتی گراد مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع فارسی

آذر هوش (۱۳۸۹) "بررسی آزمایشگاهی خصوصیات دینامیکی مخلوط های آسفالتی حاوی سنگ آذرین و بتن ضایعاتی" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه گیلان. رشت

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۷۹)، "مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه"، نشریه شماره ۲۰۶.

محسن شمسایی (۱۳۹۵) "بررسی آزمایشگاهی استفاده از کابل های فشار قوی بازیافتی از جنس پلی اتیلن کراس لینک به عنوان سنگدانه در مخلوط روسازی بتن غلتکی" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود. شاهرود

حسامی. س.، رضایی. ع.، صدرایی. آ.، (۱۳۹۲)، "بررسی تاثیر مواد بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه بر روی خصوصیات مکانیکی آسفالت" هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.

دفتر تدوین ضوابط و معیارای فنی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۹۲)، "آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران"، نشریه شماره ۲۳۴- تجدیدنظر دوم.

مقانکی. ا. ع.، گنجی دوست. ح.، حسنی. ا.، (۱۳۸۷) "استفاده از ضایعات پلاستیک PET در مخلوط های آسفالتی"، دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران

مراجع غیر فارسی

Abo-Qudais S., Al-Shweily, H. (2008). “**Effect of aggregate properties on asphalt mixture stripping and creep behavior**”. *Conster and build mater*, 62, pp. 423-456.

Arabani, M., Mirabdolazimi S.M. (2009). “**Evaluation of creep compliance of rubberized asphalt in compare with conventional hot mix asphalt.**”, *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Taylor and Francis group, London, pp.551-558.

Arabani, M., (2011). “**Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete.**” *Constr. Build. Mater.*, 25, 1181–1185.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) D1559, (1992). “**Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus.**” USA.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) D4123, (2000). “**Standard test method for indirect tension test of bituminous mixtures.**” *Annual book of ASTM standards*, Road and paving materials.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) D3515, (2001). “**Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures.**” *Annual book of ASTM standards*, Road and paving materials.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) D1075, (2000). “**Standard test method for effect of water on compressive strength of compacted bituminous**

mixtures.” Annual book of ASTM standards, Road and paving materials.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) C127- 07, (2001), “**Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) C128-88, (2003), “**Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) C 131 – 03, (2003), “**Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

American Society for Testing and Materials, (ASTM) D 2419 – 02, (2002), “**Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate**”. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Christéen. J., (2007), “**Swedish cable waste for recovery in China or Sweden**”. Master thesis report, LiTH, Linköping.

Classen A.I.M, J.M. Edwards, p. Sommer, p. Uge (1997). “**Asphalt pavement design, the shell method.**”, proceedings of the fourth international conference on the structural design of asphalt pavement, Ann Arbor, university of Michigane.

Dalhat, M. A., and Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). “**Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia.**” Int. J. Pavement Eng., 18(4), 349-357.

Ektas, S., and Karacasu, M. (2012). **“Use of recycled concrete in hot mix asphalt and an ANN model for prediction of resilient modulus.”** Ekoloji, 21(83), 53-60.

Epps J., E. Berger, J. Anagnos (2003). **“Treatments in Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar.”**, Transportation Research Board, pp. 117-177.

FHWA (1998). **“Interim task report of preliminary recommendation for the simple performance test.”**, Report No. DTFH 61-94-R-00045.

Hassan, N.A., Khan, R., Raaberg, J., and Presti, D. Lo. (2015). **“Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques.”** Constr. Build. Mater., 99, 54–61.

Huang, Y.H. (1993). **“Pavement analysis and design.”** Prentice Hall, University of Kentucky, USA.

Khalid A., Samuel H. (2003). **“Traditional fatigue analysis of asphalt concrete mixtures.”** Transportation Research Board, Annual meeting in Washington D.C.

Kang H.Y., Schoenung J.M. (2003). **“Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology option.”** Conservation and recycling, 45(4), pp.368-400.

Liden F., Van der Heids (1987). **“Some aspects of the compaction of asphalt mixes and its influence on mix properties.”** Proceedings, The association of asphalt paving technologists, 56, pp. 408-424.

Li W,(2002),**"Composition analysis of construction and demolition waste and enhancing waste reduction and recycling in construction industry in Hong Kong"**,

Department of Building and Real Estate, The Hong Kong Polytechnic University ,Hong Kong, China.

Modarres, A., and Hamed, H. (2014الف). “**Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes.**” *Mater. Des.*, 61, 8-15.

Modarres, A., and Hamed, H. (2014ب). “**Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET).**” *Constr. Build. Mater.*, 68, 259–267.

Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., and Hamed, G. H. (2014). “**Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study.**” *Road Mater. Pavement*, 15(3), 746–756.

Paranavithana, S., and Mohajerani, A. (2006). “**Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete.**” *Resour. Conserv. Recycl.*, 48(1), 1–12.

Pardhan, M.M. (1995). “**Permanent deformation characteristics of asphalt aggregate mixture using varied material and modeling procedure with marshal method.**” Ph.D dissertation in civil engineering, Montana university.

Pirabarooban S., Zaman. M, Tarefder R.A. (2003). “**Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling.**” Annual conference of the transportation association of Canada, St. Jones, Newfoundland and Labrador, pp.1-16.

Radevic, A., Durekovic, A., Zakic, D., and Mladenovic, G. (2017). “**Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete.**” *Constr. Build. Mater.*, 136, 386–393.

Rahman, W. M. N. W. A., and Wahab, A. F. A. (2013). “**Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt.**” *Procedia Eng.*, 53, 124 – 128.

Richardson C. (2008). “**Asphalt Construction for pavement and highways.**” Newyork, USA.

Struik, L.C. E., and Schöen, L. A. A. (2000). “**Recycling and re-use of polymeric materials; the limited potential of biodegradables.**” *Macromol. Symp.*, 152(1), 1-7.

Sousa J.B., Craus J., Monismith C.L. (1991). “**Summary report on permanent deformation in asphalt concrete.**” University of California, Berkley, SHRP, National Research Council, Washington D.C.

Tokuda, Sh., Horikawa, S., Negishi, k., Uesugi, K., and Hirukawa, H., (2003). “**Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene.**” *Furukawa Rev.*, 23, 88-93.

Topal A., Sengoz B. (2008). “**Deformation of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot mix asphalt.**” *Constr. Build. Mater.*, 32, pp. 447–461.

Wu, S., Yang, W., and Xue. (2005). “**Preparation and properties of glass-asphalt concrete**” Seventh international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields. 27-29 June. 2005. Trondheim, Norway.

Zhang, Y., Verwaal, W., van de Ven, M. F. C., Molenaar, A. A. A., Wu, S. P. (2015). “**Using high-resolution industrial CT scan to detect the distribution of rejuvenation**

products in porous asphalt concrete.” Constr. Build. Mater., 100, 1–10.

Zhang, C., Wang, H., You, Z., and Yang, X. (2016). **“Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyrotory Compaction and X-Ray CT Scanning”** Constr. Build. Mater., 129, 243–255.

پیوست ها

جدول پ-۱ نتایج آزمایش ITSM جهت تعیین مدول برجهندگی نمونه های آسفالتی

شماره آزمایش	میزان قیر بهینه (%)	تنش اعمالی (Kpa)	دمای آزمایش (°C)	مدول برجهندگی (Mpa)	XLPE (%)
۱	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۲۷۲۴	۰
۲	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۳۳۵۴	۰
۳	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۳۳۵۷	۰
۴	۴	۱۰۰	۵	۴۶۳۱/۵	۲۵
۵	۴	۱۰۰	۵	---	۲۵
۶	۴	۱۰۰	۵	۴۹۰۶	۲۵
۷	۴	۱۰۰	۵	۷۰۸۰	۵۰
۸	۴	۱۰۰	۵	۷۳۹۱	۵۰
۹	۴	۱۰۰	۵	۷۷۴۴/۵	۵۰
۱۰	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۱۰۹۶۰/۵	۷۵
۱۱	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۸۷۹۴/۵	۷۵
۱۲	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۷۸۲۴	۷۵
۱۳	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۱۶۰۷/۵	۰
۱۴	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۱۳۱۲/۵	۰
۱۵	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۱۸۰۲/۵	۰
۱۶	۴	۱۰۰	۲۵	۱۲۶۰	۲۵
۱۷	۴	۱۰۰	۲۵	۱۸۱۰/۵	۲۵
۱۸	۴	۱۰۰	۲۵	۱۱۶۳/۵	۲۵
۱۹	۴	۱۰۰	۲۵	۱۲۸۷/۵	۵۰
۲۰	۴	۱۰۰	۲۵	۱۲۴۳/۵	۵۰
۲۱	۴	۱۰۰	۲۵	۸۴۰	۵۰
۲۲	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۶۰۹/۵	۷۵
۲۳	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۵۱۷/۵	۷۵
۲۴	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۶۹۳	۷۵

جدول پ-۲ نتایج آزمایش ITFT جهت تعیین عمر خستگی نمونه های آسفالتی

شماره آزمایش	میزان قیر بهینه (%)	تنش اعمالی (Kpa)	دمای آزمایش (°C)	تعداد سیکل	XLPE (%)
۱	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۱۷۵۰	۰
۲	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۱۶۵۰	۰
۳	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۱۷۰۰	۰
۴	۴	۱۰۰	۵	۲۵۰۰	۲۵
۵	۴	۱۰۰	۵	۲۵۵۰	۲۵
۶	۴	۱۰۰	۵	۲۴۵۰	۲۵
۷	۴	۱۰۰	۵	۲۷۵۰	۵۰
۸	۴	۱۰۰	۵	۲۸۱۰	۵۰
۹	۴	۱۰۰	۵	۲۸۴۰	۵۰
۱۰	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۳۲۶۰	۷۵
۱۱	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۳۳۲۰	۷۵
۱۲	۴/۲۵	۱۰۰	۵	۳۳۲۰	۷۵
۱۳	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۶۴۵	۰
۱۴	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۶۳۰	۰
۱۵	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۶۶۹	۰
۱۶	۴	۱۰۰	۲۵	۴۶۰	۲۵
۱۷	۴	۱۰۰	۲۵	۴۴۵	۲۵
۱۸	۴	۱۰۰	۲۵	۴۷۲	۲۵
۱۹	۴	۱۰۰	۲۵	۲۵۰	۵۰
۲۰	۴	۱۰۰	۲۵	۲۶۶	۵۰
۲۱	۴	۱۰۰	۲۵	۲۷۳	۵۰
۲۲	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۱۰۰	۷۵
۲۳	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۸۲	۷۵
۲۴	۴/۲۵	۱۰۰	۲۵	۸۲	۷۵

Abstract

Cross-Linked Polyethylene (XLPE) is an excellent insulating material for high-voltage cables and is widely used as electrical cable coating due to its electrical resistance and thermal and insulation properties. Technical challenges and the low fluidity of XLPE have made the burial of XLPE wastes the most applied technique for their disposal. Burning XLPE is associated with environmental pollution and their burial requires unused lands. Crushed XLPE wastes were incorporated in Hot Mix Asphalt (HMA) to replace fine aggregates of 1/18 to 2/36 mm size, retained on the sieve no. 8, in volume fractions of 25, 50, and 75%, and the mechanical properties of the mix were evaluated. To this end, the Marshall method was used to prepare specimens; and resilient modulus and fatigue tests by the Indirect Tensile Stiffness Modulus Test (at temperatures 5, and 25°C) were used to evaluate the dynamic behavior of the asphalt mix and the Marshall stability test was used to determine moisture susceptibility. Results suggest that the use of crushed XLPE wastes as aggregates enhances the fatigue life and the resilient modulus of the asphalt mix at 5°C, and increasing the XLPE content results in further enhancement of the resilient modulus and fatigue life at this temperature. However, at the higher temperature of 25°C, the resilient modulus and fatigue life are reduced as XLPE content is increased. Moreover, the MSR values showed the samples containing XLPE to have good moisture resistance.

Keywords: Cross-linked polyethylene, Hot mix asphalt, Mechanical properties, Recycling



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.Thesis in Road and Transport Engineering

**Experimental Investigation of Recycled Cross-linked polyethylene in
Asphalt Mixture**

By:

Iman Mohammadian Nameghi

Supervisor:

Dr. Iman Aghayan

September 2017