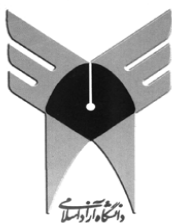


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد علوم و تحقیقات

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران – راه و ترابری (M.Sc)

عنوان:

**بررسی عملی تاثیر افزونه های پلیمری شاخص بر خواص قیرهای کشور
با توجه به شرایط آب و هوایی ایران**

اساتید راهنما

دکتر فریدون مقدس نژاد

دکتر محمود بیات

استاد مشاور

مهندس علی احسان نظربیگی

نگارنده

بهنام گلستانی

سال تحصیلی ۹۰-۱۳۸۹

تقدیر و تشکر

در این فرصت بر خود واجب می دانم از اساتید عزیز و گرانقدرم، جناب آقای دکتر فریدون مقدس نژاد، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر و مشاور ریاست سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای کشور و جناب آقای مهندس علی احسان نظر بیگی، ریاست محترم واحد قیر و راهسازی پژوهشگاه صنعت نفت کمال تشکر و سپاسگزاری را به جا آورم. شکیبایی ایشان در مدت زمان یکسال انجام گرفتن این پژوهش، تجربه و راهنمایی ایشان در فراز و نشیب مسیر مطالعات و همراهی و دلگرمی های دوستانه ایشان در مواجهه با ناکامی ها و کاستی ها همواره مشوق و الهام بخش من در این دوره از تحصیلاتم بوده است. بی شک بدون مشورت و راهنمایی این عزیزان پیمودن این مسیر ناممکن می بود.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر محمود بیات ریاست محترم پژوهشگاه توسعه پژوهشگاه صنعت نفت کمال تشکر و امتنان را دارم.

مراتب سپاس خود را به جناب آقای دکتر سید محمد سید حسینی مدیر گروه رشته حمل و نقل و راه و ترابری، که راهنمایی های ایشان بسیار راه گشا بوده است، اعلام می دارم.

در پایان از همکاری و زحمات کارشناسان و پرسنل محترم واحد قیر و راهسازی، آقای مهندس علیرضا معینی، آقای دکتر سعید صادق پور و همچنین دوست عزیزم آقای مهندس مهدی دلاویز که در مراحل مختلف و انجام آزمایشات این پژوهش به اینجانب کمک کردند، تشکر خاص دارم.

باشد که این یادآوری ها، نمایانگر سپاس بی پایان من نسبت به کمکهای بی دریغ آنان به شمار آید.



تقدیم به خانواده ام

و تمامی آنانی که

دوستشان دارم

فهرست مطالب

۱	چکیده.....
۲	مقدمه.....
۳	۱-۱- طرح موضوع.....
۴	۲-۱- بیان مسئله.....
۵	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....
۵	۴-۱- فرضیه های پژوهش.....
۵	۵-۱- اهداف پژوهش.....
۶	۶-۱- کاربرد پژوهش.....
۶	۷-۱- روش انجام پژوهش.....
۶	۸-۱- ساختار پایان نامه.....
۸	فصل دوم : تاریخچه، مبانی نظری، شناخت قیر و پلیمرها.....
۹	۱-۲- تاریخچه قیر.....
۱۰	۲-۲- منابع قیر.....
۱۰	۲-۲-۱- قیرهای طبیعی.....
۱۰	۲-۲-۲- قیرهای نفتی.....
۱۰	۳-۲- طبقه بندی و نامگذاری قیرها.....
۱۱	۱-۳-۲- قیرهای نفوذی.....
۱۱	۲-۳-۲- قیرهای دمیده یا رده R.....
۱۲	۳-۳-۲- قیرهای رده ویسکوزیته.....
۱۲	۴-۲- انواع قیرهای نفتی.....
۱۲	۱-۴-۲- ته مانده برج تقطیر در خلأ (V.B).....
۱۳	۲-۴-۲- روغن سنگین (H.V.S).....
۱۳	۳-۴-۲- قیرهای خالص.....
۱۴	۴-۴-۲- قیرهای دمیده ۲۵-۸۵ & R ۱۵-۹۰.....
۱۵	۵-۴-۲- قیرهای محلول.....
۱۵	۵-۲- ساختمان شیمیایی قیر.....
۱۷	۱-۵-۲- اجزا قیر.....
۱۹	۶-۲- خواص مکانیکی و فیزیکی قیر.....
۱۹	۱-۶-۲- رفتار قیر.....

۲۱	..... حساسیت حرارتی قیر..... ۲-۶-۲
۲۲	..... سخت شدن قیر..... ۳-۶-۲
۲۴	..... پیر شدگی قیر..... ۴-۶-۲
۲۶	..... تحقیقات شارپ (SHRP) و طبقه بندی بر اساس عملکرد..... ۷-۲
۲۷	..... نقش رئولوژی در تست های شارپ..... ۱-۷-۲
۴۵	..... افزونه های شاخص در راهسازی..... ۸-۲
۴۶	..... لاستیک ها..... ۱-۸-۲
۴۹	..... ترموپلاستیک ها..... ۲-۸-۲
۴۹	..... ترموست ها..... ۳-۸-۲
۴۹	..... کوپلیمرها..... ۴-۸-۲
۴۹	..... پلیمرها..... ۹-۲
۵۲	..... خصوصیات و ساختمان پلیمر SBS..... ۱-۹-۲
۵۴	..... دلایل برگزیده شده شدن SBS..... ۲-۹-۲
۵۵	..... خرابی های روسازی های آسفالتی ناشی از ضعف قیر..... ۱۰-۲
۵۵	..... شیار افتادگی..... ۱-۱۰-۲
۵۷	..... ترک های ناشی از خستگی..... ۲-۱۰-۲
۵۹	..... ترک های حرارتی (ترک های ناشی از دمای پایین)..... ۳-۱۰-۲
۶۳	..... فصل سوم: مروری بر ادبیات موضوع.....
۶۷	..... ۱-۳ تاریخچه.....
۶۸	..... ۲-۳ پژوهش های صورت گرفته در خارج کشور.....
۶۸	..... ۱-۲-۳ تحقیق سنگوز و ایسیکیاکار.....
۷۳	..... ۲-۲-۳ تحقیق آیری.....
۸۴	..... ۳-۲-۳ تحقیق چن و همکاران.....
۸۸	..... ۴-۲-۳ تحقیق گاردنر.....
۸۹	..... ۵-۲-۳ تحقیقات گیله و مولنار.....
۹۱	..... ۳-۳ پژوهش های انجام شده در ایران.....
۹۳	..... ۴-۳ جمع بندی پژوهشهای انجام شده.....
۹۸	..... فصل چهارم: نانوکامپوزیت های پلیمری.....
۹۸	..... ۱-۴ ویژگیهای نانوکامپوزیت های پلیمری.....
۱۰۰	..... ۲-۴ انواع نانوکامپوزیت ها.....
۱۰۰	..... ۱-۲-۴ ساختار و خواص سیلیکاتهای لایه ای.....
۱۰۷	..... ۳-۴ استفاده از نانو کامپوزیت های پلیمری در قیر.....
۱۱۰	..... فصل پنجم: روش انجام آزمایش ها.....

۱۱۰	..... تست های رایج قیر.....
۱۱۰	..... ۱-۱-۵ تست تعیین درجه نفوذ قیر (ASTM : D۵)
۱۱۲	..... ۲-۱-۵ تست تعیین نقطه نرمی قیر (ASTM : D۳۶)
۱۱۴	..... ۳-۱-۵ تست کشش پذیری Ductility (ASTM : D۱۱۳)
۱۱۵	..... ۴-۱-۵ نقاط اشتعال و احتراق Flash and fire point (ASTM : D۹۲)
۱۱۶	..... ۵-۱-۵ تست تعیین ویسکوزیته (ASTM : D۲۱۷۰)
۱۱۷	..... ۶-۱-۵ آزمایش نقطه شکست (IP : ۸۰)
۱۱۸	..... ۷-۱-۵ وزن مخصوص قیرهای جامد و نیمه جامد (ASTM : D۲۳۸۹-۷۸)
۱۱۹	..... ۸-۱-۵ تعیین PI (Penetration Index) و PVN
۱۱۹	..... ۲-۲-۵ آزمایش های شارپ (SHRP) بر روی قیرها
۱۲۰	..... ۱-۲-۵ آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (ASTM : D۲۸۷۲)
۱۲۲	..... ۲-۲-۵ رئومتر برش دینامیکی (Dynamic Shear Rheometer)
۱۲۵	..... ۳-۲-۵ رئومتر تیرچه خمشی (Bending Beam Rheometer)
۱۲۷	..... ۴-۲-۵ آزمایش کشش مستقیم (Direct Tensile Strain)
۱۲۸	..... ۵-۲-۵ ویسکومتر چرخشی (Rotary Viscometer)
۱۳۰	..... ۶-۲-۵ آزمایش محفظه تسریع پیری (Pressure Aging Vessel)
۱۳۱	..... ۳-۳-۵ آزمایشات آمیزه های قیر - پلیمر
۱۳۲	..... ۱-۳-۵ آزمایش پایداری در ذخیره سازی (Storage Stability)
۱۳۲	..... ۲-۳-۵ بازیابی الاستیک (Elastic Recovery)
۱۳۳	..... ۳-۳-۵ مشاهده در زیر میکروسکوپ
۱۳۶	..... فصل ششم: شرح فعالیت های آزمایشگاهی و نتایج
۱۳۶	..... ۱-۶-۱ مواد مورد استفاده
۱۳۶	..... ۱-۶-۱-۱ قیر پایه
۱۳۷	..... ۲-۶-۱ پلیمر SBS
۱۳۸	..... ۳-۶-۱ نانوذرات مورد استفاده
۱۳۹	..... ۲-۶-۲ آماده سازی آلیاژ قیر و پلیمر
۱۴۰	..... ۳-۶-۳ بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری
۱۴۰	..... ۱-۶-۳-۱ نتایج آزمایش درجه نفوذ (Penetration)
۱۴۳	..... ۲-۶-۳-۲ نتایج آزمایش نقطه نرمی (Softening Point)
۱۴۶	..... ۳-۶-۳-۳ نتایج محاسبات اندیس نفوذ (Penetration Index)
۱۴۹	..... ۴-۶-۳-۴ نتایج آزمایش بازیابی الاستیک (Elastic Recovery)
۱۵۲	..... ۵-۶-۳-۵ نتایج آزمایش کشش پذیری (Ductility)
۱۵۵	..... ۶-۶-۳-۶ نتایج آزمایش نقطه شکست فراس

۱۵۷.....	۶-۳-۷- بررسی اثر پیرشدگی بر روی قیرهای اصلاح شده
۱۶۰.....	۶-۴- بررسی رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری
۱۶۰.....	۶-۴-۱- نتایج آزمایش ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی
۱۶۳.....	۶-۴-۲- نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR)
۱۶۸.....	۶-۴-۳- مورفولوژی
۱۵۹.....	نتیجه گیری
۱۶۱.....	پیشنهادات
۱۶۲.....	مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مشخصات قیرهای خالص ۱۴
- جدول ۲-۲: ساختار شیمیایی انواع مختلف نفت خام ۱۶
- جدول ۳-۲: عناصر تشکیل دهنده قیر ۱۶
- جدول ۱-۳: مشخصات قیر پایه مورد استفاده ۶۹
- جدول ۲-۳: خصوصیات قیرهای پلیمری در آزمایشهای کلاسیک ۵۶
- جدول ۳-۳: نتایج پارامتر شیارشدگی قیر در پژوهش Airey ۷۷
- جدول ۴-۳: نتایج پارامتر خستگی قیرها در پژوهش Airey ۷۷
- جدول ۵-۳: پارامترهای تغییر شکل ماندگار مخلوط های آسفالتی در پژوهش Airey ۶۶
- جدول ۶-۳: نتایج به دست آمده برای تعداد دوره های بارگذاری نظیر خرابی خستگی در پژوهش Airey ۶۷
- جدول ۷-۳: پارامترهای خستگی نمونه های آسفالتی در پژوهش Airey ۶۷
- جدول ۸-۳: مشخصات شیمیایی قیرهای A و B در پژوهش Airey ۶۸
- جدول ۹-۳: مشخصات فیزیکی قیرهای پایه A و B در پژوهش Airey ۶۹
- جدول ۱۰-۳: نتایج آزمایش Airey بر روی قیرهای پلیمری ۶۹
- جدول ۱۱-۳: نتایج آزمایش ویسکوزیته جرخشی ۷۰
- جدول ۱۲-۳: مشخصات کلاسیک قیرها ۷۲
- جدول ۱۳-۳: مطالعات انجام شده در خارج و داخل کشور به همراه نام مولف و سال چاپ ۸۳
- جدول ۱-۶: مشخصات پلیمر SBS رده ۵۰۱ Calprene ۱۲۴
- جدول ۲-۶: مشخصات پلیمر SBS رده ۴۱۶ Solprene ۱۲۴
- جدول ۳-۶: نانوکلی مورد استفاده در تحقیق ۱۲۵
- جدول ۴-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۲۷
- جدول ۵-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۲۸
- جدول ۶-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۲۹
- جدول ۷-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۲۹
- جدول ۸-۶: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۳۱
- جدول ۹-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۳۱
- جدول ۱۰-۶: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۳۲
- جدول ۱۱-۶: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۳۲
- جدول ۱۲-۶: اندیس نفوذ (PI) برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۳۴
- جدول ۱۳-۶: اندیس نفوذ (PI) برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۳۴
- جدول ۱۴-۶: اندیس نفوذ (PI) برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene ۱۳۵
- جدول ۱۵-۶: اندیس نفوذ (PI) برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene ۱۳۵

- جدول ۶-۱۶: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene..... ۱۳۷
- جدول ۶-۱۷: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene..... ۱۳۷
- جدول ۶-۱۸: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene..... ۱۳۷
- جدول ۶-۱۹: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene..... ۱۳۸
- جدول ۶-۲۰: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene..... ۱۳۹
- جدول ۶-۲۱: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene..... ۱۴۰
- جدول ۶-۲۲: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene..... ۱۴۰
- جدول ۶-۲۳: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene..... ۱۴۰
- جدول ۶-۲۴: نتایج آزمایش نقطه شکست فراس برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene..... ۱۴۲
- جدول ۶-۲۵: نتایج آزمایش نقطه شکست فراس برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene..... ۱۴۳
- جدول ۶-۲۶: نتایج آزمایش پیرشدگی برای قیر A اصلاح شده..... ۱۴۴
- جدول ۶-۲۷: نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی بر روی قیر A اصلاح شده..... ۱۵۴
- جدول ۶-۲۸: نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی بر روی قیر B اصلاح شده..... ۱۵۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: ترموپلاستیک الاستومرهای خطی و شاخه ای ۳۸
- شکل ۲-۲: ساختار سه بعدی شبکه SBS ۳۹
- شکل ۳-۲: تورم شاخه های پلی بوتادین SBS با جذب مولفه ای روغنی قیر ۴۱
- شکل ۴-۲: خرابی شیارافتادگی در مسیر راه ۴۳
- شکل ۵-۲: ترک خستگی در مسیر راه ۴۶
- شکل ۶-۲: ترک حرارتی در مسیر راه ۴۸
- شکل ۱-۳: مشخصات قیر ایده‌آل و مشخصات قیرهای رایج در دماهای مختلف عملکردی ۵۱
- شکل ۲-۳: انواع اصلاح کننده‌های مورد استفاده در مصارف گوناگون ۵۳
- شکل ۳-۳: مورفولوژی PMB در درصدهای مختلف پلیمر ۵۷
- شکل ۴-۳: پایداری مارشال ۵۸
- شکل ۵-۳: مقاومت کششی غیرمستقیم ۵۸
- شکل ۶-۳: ارتباط بین ITS و پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت ۵۹
- شکل ۷-۳: اندیس پیرشدگی برای درصدهای مختلف پلیمر ۵۹
- شکل ۸-۳: نمودار زمان ثابت برای فرکانس بارگذاری ۰,۰۲ هرتز در تحقیقات Airey ۶۲
- شکل ۹-۳: نمودار زمان ثابت برای فرکانس بارگذاری یک هرتز در تحقیقات Airey ۶۲
- شکل ۱۰-۳: نمودار بنیادی G^* در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نحت فرکانس در پژوهش Airey ۶۳
- شکل ۱۱-۳: نمودار بنیادی δ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در پژوهش Airey ۶۳
- شکل ۱۲-۳: توابع خستگی برای مخلوط های SMA ۶۶
- شکل ۱۳-۳: ویسکوزیته چرخشی قیرهای اصلاح شده با درصدهای ۳، ۵ و ۷ با پلیمر SBS ۷۰
- شکل ۱۴-۳: گرانروی و دمای نقطه نرمی قیر ۱۰-AC مخلوط شده با پلیمر ۷۲
- شکل ۱۵-۳: چقرمگی و سفتی قیرهای مخلوط شده با پلیمر ۷۳
- شکل ۱۶-۳: میکروساختار مخلوط قیر ۲۰-AC با SBS شعاعی مشاهده شده توسط SEM ۷۳
- شکل ۱۷-۳: اختلاف دمای نقطه نرمی در درصدهای مختلف SBS-۲ در قیر پایه ۱۰-AC ۷۴
- شکل ۱۸-۳: مقادیر مدول ترکیبی برای درصدهای مختلف پلیمر ۷۵
- شکل ۱۹-۳: تغییرات درجه نفوذ و کشش پذیری قیر با افزودن پلی اتیلن سبک ۷۹
- شکل ۱-۴: ساختمان شیمیایی خاک رس های نوع اسمکتیت ۸۸
- شکل ۲-۴: ساختار کریستالی سیلیکاتهای لایه ای ۸۹
- شکل ۳-۴: Aggregate های سیلیکاتهای لایه ای ۸۹

- شکل ۴-۴: ساختار سیلیکات لایه ای مونت موریلونیت ۹۲
- شکل ۵-۴: نانو آلی پودری شکل ۹۳
- شکل ۱-۵: دستگاه اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی مطابق با استاندارد ASTM D۵ ۹۸
- شکل ۲-۵: دستگاه اندازه گیری نقطه نرمی مطابق با استاندارد ASTM D۳۶ ۹۹
- شکل ۳-۵: دستگاه Ductility ۱۰۱
- شکل ۴-۵: دستگاه Flash and fire point ۱۰۳
- شکل ۵-۵: دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته سینماتیکی مطابق با ASTM D۲۱۷۰ ۱۰۴
- شکل ۶-۵: شمایی از دستگاه تعیین نقطه شکست ۱۰۵
- شکل ۷-۵: سه نوع قیر از نظر درجه بندی ویسکوزیته ای ۱۰۷
- شکل ۸-۵: دستگاه RTFO ۱۰۸
- شکل ۹-۵: بطری های مخصوص دستگاه RTFO ۱۰۹
- شکل ۱۰-۵: اصول آزمایش برش دینامیکی ۱۱۰
- شکل ۱۱-۵: دو نوع قیر که دارای G^* یکسان ولی خواص متفاوتند ۱۱۱
- شکل ۱۲-۵: دستگاه رئومتر برش دینامیکی ۱۱۲
- شکل ۱۳-۵: رئومتر تیرچه خمشی (BBR) ۱۱۳
- شکل ۱۴-۵: شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) ۱۱۴
- شکل ۱۵-۵: اصول آزمایش کشش مستقیم (DTT) ۱۱۵
- شکل ۱۶-۵: شمای کلی آزمایش ویسکوزیته دوران] ۱۱۶
- شکل ۱۷-۵: شمای آزمایش فرسودگی قیر در ظرف فشار (PAV) ۱۱۸
- شکل ۱-۶: تأثیر افزایش دو رده از پلیمر SBS بر روی درجه نفوذ قیرهای مختلف ۱۳۰
- شکل ۲-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی نقطه نرمی قیرهای مختلف ۱۳۳
- شکل ۳-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی اندیس نفوذی ۱۳۶
- شکل ۴-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی بازیابی الاستیک ۱۳۸
- شکل ۵-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی کشش پذیری ۱۴۱
- شکل ۶-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی نقطه شکست فراس ۱۴۳
- شکل ۷-۶: تأثیر RTFO بر روی درجه نفوذ ۱۴۶
- شکل ۸-۶: تأثیر RTFO بر روی نقطه نرمی ۱۴۶
- شکل ۹-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A (دمای 135°C) ۱۴۸
- شکل ۱۰-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A (دمای 160°C) ۱۴۸
- شکل ۱۱-۶: تأثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده B (دمای 135°C) ۱۴۹

- شکل ۶-۱۲: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده B (دمای 160°C)..... ۱۴۹
- شکل ۶-۱۳: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A,B (دمای 135°C)..... ۱۵۰
- شکل ۶-۱۴: تاثیر افزایش پلیمر بر روی DSR قیر اصلاح شده A,B..... ۱۵۱
- شکل ۶-۱۵: نقشه ایران با PG های مربوط به هر شهر..... ۱۵۲
- شکل ۶-۱۶: تصاویر مورفولوژی برای قیر A اصلاح شده..... ۱۵۶

چکیده:

نقش قیر در مخلوط های آسفالتی بسیار حیاتی و تاثیر گذار می باشد. تنوع شرایط آب و هوایی در ایران از یک طرف و از طرف دیگر خواص فیزیکی- مکانیکی محدود قیر به صورت خالص سبب، گردیده که قابلیت تامین رفتارهای مناسبی مانند انعطاف پذیری، مقاومت در برابر شیارشدگی، تغییر شکل های ماندگار و خرابی های خستگی را نداشته باشد. بدین منظور مدت ها است که اصلاحات مختلفی بر روی آن صورت می پذیرد تا خواص مطلوبی برای اهداف مورد نظر به دست آید. لذا پلیمرها به عنوان مهمترین خانواده اصلاح کننده قیر، به منظور بهبود عملکرد و افزایش کارایی قیر که نتیجه نهایی آن بهبودی در رفتار مخلوط های آسفالتی می باشد، به آن اضافه می شود.

در تحقیقی که پیش رو دارید، تأثیر دو رده از پلیمر SBS بر روی قیرهای ۸۵/۱۰۰ و ۱۲۰/۱۵۰ بررسی شده است. خواص فیزیکی، مکانیکی و از همه مهمتر، رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری و قیرهای خالص، بررسی و مقایسه شده اند. پس از آن جهت اصلاح خواص قیر پلیمری از فناوری نانو استفاده گردیده و کلیه خواص فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی کامپوزیت های سه گانه قیر/پلیمر/نانوذرات جهت مقایسه با آلیاژ قیر/پلیمر، بررسی و تحقیق شده اند. آزمایشات رئولوژیکی مطابق با روش شارپ صورت گرفته است.

در این پایان نامه سعی گردیده با انجام آزمایشات در یک جامعه آماری وسیع یک بانک اطلاعاتی کامل در ارتباط با قیرهای اصلاح شده پلیمری مطابق با شرایط آب و هوایی ایران ارائه گردد تا با بومی سازی دانش فنی در این زمینه راه برای ادامه تحقیقات پیشرفته در زمینه قیر و آسفالت هموار گردد.

لغات کلیدی: قیر، SBS، نانوکلی، خواص رئولوژیکی، آزمایشات شارپ، سوپریو

فصل اول: کلیات

قیر ماده ای هیدروکربوری به رنگ سیاه تا قهوه ای تیره است که در صنعت راهسازی به شکل امروزی برای اولین بار در سال ۱۸۳۰ در کشور فرانسه و سپس در امریکا مورد استفاده قرار گرفته بود و استفاده از آن در ایران برای اولین بار به سال ۱۳۱۲ در خیابان فلسطین (کاخ سابق) بر میگردد.

بیش از یک و نیم قرن از زمانی که نخستین جاده ها توسط مخلوطی از قیر و خرده سنگ پوشش یافته اند، گذشته است. در این مدت پوشش های آسفالتی چه از نظر روش ها و ماشین آلات ساخت و چه از نظر کیفیت و کمیت و استانداردها و چه از نظر وظایف و کاربردها، دچار تحولات وسیعی شده اند. به طور کلی چسبندگی و نفوذ ناپذیری از خصوصیات منحصر به فرد قیرها است که به موجب آن بیش از ۱۰۰ کاربرد برای آنها مفروض است. یکی از مهمترین کاربردهای قیرها در راهسازی می باشد. قیر به عنوان ماده چسبنده و نگهدارنده سنگها در پوشش آسفالتی، علیرغم درصد وزنی کم (۴ الی ۶٪)، سهم قابل توجهی را در قوام و استحکام پوشش ها در مقابل عوامل مختلف فرساینده سطح، داراست. متأسفانه همزمان با رشد روز افزون بار ترافیک شهری و عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین، مشکلاتی همچون شیار افتادگی در دمای بالا و ترک خوردگی در دمای پایین سرویس دهی، استفاده از قیرها را تحت الشعاع قرار داده اند. بنابراین تلاش های بسیاری جهت بهبود خواص قیر در چند دهه اخیر صورت گرفته است. در سه دهه اخیر یکی از مؤثرترین افزودنیهای پلیمری قیر، یعنی بلاک کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) به بازار عرضه شده اند. در دو دهه اخیر به منظور مقایسه عملکرد قیرهای پایه و قیرهای اصلاح شده پلیمری، از آزمایش های رئولوژیکی استفاده شده است؛ چرا که ماهیت ویسکوالاستیک قیرها تنها با انجام این آزمایشات، قابل شناخت و ارزیابی است. نتایج تحقیقات نشان داده است که کوپلیمر SBS میتواند از شیار افتادگی و ترک خوردگی جلوگیری کند و محدوده دمایی سرویس دهی قیر را افزایش دهد. به علاوه، پلیمر SBS عمر مفید آسفالت را افزایش می دهد و لذا هزینه های مرمت و بازسازی را تا حد زیادی کاهش می دهد. متأسفانه در کشور ما استفاده از این پلیمر با دو پارامتر بازدهی بهتر و اقتصادی بودن، دست و پنجه نرم میکند و بدلیل نداشتن تکنولوژی ساخت پلیمر مذکور، استفاده از آن با مشکل روبرو است. از طرفی متأسفانه آزمایش های جدید شارپ (SHRP) که بر روی خواص رئولوژیکی تأکید دارند، هنوز در کشور ما جای خود را باز نکرده اند؛ در حالی که به زودی این آزمایشات، باید جایگزین آزمایشات قبلی گردند. عملکرد فوق العاده قیرهای پلیمری منوط به پایداری در انبارداری مناسب آنها می باشد. جدا شدن فازهای قیر و پلیمر به دلیل اختلاف دانسیته میان آنها، بدون شک، یکی از بزرگترین مشکلات قیرهای پلیمری می باشد. تحقیقات بسیاری برای حل این مشکل صورت گرفته است. در تحقیقات جدید، با رشد و تکامل نانوکامپوزیت ها،

مسئله استفاده از ذرات نانو جهت جلوگیری از جدایش فازها مطرح می شود. این مطلب در ابتدای راه خود قرار دارد و تحقیقات بر روی قیرهای اصلاح شده توسط نانوکامپوزیت های پلیمری همچنان ادامه دارد.

۱-۱- طرح موضوع

عملکرد روسازی های آسفالتی در ایران، مانند بسیاری دیگر از کشورهای در حال توسعه با انتظارات و خواسته های جوامع امروزی سازگار نیست. عملکرد ضعیف روسازی و عمر کوتاه آن ناشی از عوامل مختلفی به شرح زیر است:

۱- استفاده از قیر و مصالح نامناسب با توجه به شرایط آب و هوایی و کاربری روسازی

۲- طرح اختلاط نامناسب مخلوط آسفالتی با توجه به شرایط و کاربری روسازی

۳- طراحی نامناسب روسازی و لایه های تشکیل دهنده آن

۴- اجرا و نظارت ضعیف

۵- نگهداری نامناسب

برای دستیابی به روسازی با عملکرد مطلوب انجام مناسب و رشد هماهنگ کلیه عوامل بالا لازم است. پژوهش حاضر با هدف کلی بهبود عملکرد روسازی آسفالتی و تاکید بر نقش قیر در این راستا صورت می گیرد.

نمود سابقه ای از انجام تحقیقات پایه ای در زمینه شناخت قیرها و خصوصیات عملکردی آنها در کشور برای دستیابی به هدف ذکر شده در بالا از یکسو، و تحقیقات انجام شده در ۱۰ سال گذشته در قالب پروژه تحقیقاتی شارپ^۱ و مشابه آن در سطح جهانی، از سوی دیگر، افقهای جدیدی را برای انجام تحقیقات پایه ای در رابطه با شناخت خصوصیات قیر به عنوان ماده چسباننده در روسازی آسفالتی گشوده است.

شناخت زیربناهای تحقیقات شارپ از اساسی ترین ملزوماتی است که انجام تحقیقات در زمینه قیر و آسفالت در سطح قابل قبول بین المللی را میسر می سازد. پیش از این به سبب در دسترس نبودن امکانات کافی برای آشنایی محققین داخلی با جنبه های عملیاتی مطالعات شارپ، به دلیل نبودن یک سازمان متولی، سطح مطالعات انجام شده در این زمینه، در حد ترجمه و آشنایی کلی با موضوع بوده است. به همین سبب تلاش های صورت گرفته در داخل کشور از مطالعات مشابه انجام شده در سایر کشورها فاصله ای قابل توجه گرفته است. فراهم نبودن این شناخت و امکانات مربوطه، مانع از انجام گرفتن تحقیقات پایه ای و

^۱ Strategic Highway Research Program

زیربنایی در زمینه قیر و آسفالت می شده و در نتیجه فاصله مزبور روندی رو به رشد داشته است. در راستای رفع خلا موجود و همچنین ایجاد پشتوانه لازم برای انجام تحقیقات به روز وهم تراز مطالعات جهانی، مطالعه و کنکاشی بنیادین در زمینه زیربناهای تحقیقات شارپ و تعمق و بررسی گزارش های منتشر شده پیرامون آن، از ضروری ترین زمینه های تحقیقاتی قیر و آسفالت است.

۱-۲- بیان مسئله

مسئله اصلی در این تحقیق شناسایی خصوصیات عملکردی و رفتار رئولوژی قیرهای تولیدی در کشور که در راهسازی به کار می روند در چهار حالت قیر پایه^۱، اصلاح شده با پلیمر، نانو کامپوزیتی و کامپوزیت گوگرد و پاسخ به این سوال که با توجه به شرایط آب و هوایی ایران و مسائل فنی و اقتصادی چه حالتی در چه مواردی مناسب می باشد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش را بدون تردید می توان در محدودیت های خواص قیرهای معمولی در دماهای بالا که امکان جاری شدن قیر، قیر زدگی، موج گردیدن سطح آسفالت در زیر بار ترافیک و .. وجود دارند را بررسی و نیز در دماهای پایین که امکان دارد قیر شکنند شده و ترکهای نیز در روسازی به وجود آید را جستجو کرد. از این رو با توجه به حساسیت قیرها نسبت به تغییرات درجه حرارت و برای جلوگیری از خرابی های ناشی از آن، می توان با استفاده از مواد افزودنی (در این پژوهش از SBS استفاده گردیده) و انجام آزمایشات کلاسیک و جدید به اصلاح خواص آنها پرداخت. این عمل باعث می گردد که در زمینه اصلاح رفتار قیر که در نهایت منجر به اصلاح عملکرد مخلوط های آسفالتی می شود گام هایی برداشته شود.

۱-۴- فرضیه های پژوهش

احتمال آن می رود که برای شرایط مختلف و متنوع آب و هوایی، قیرهای تولیدی در داخل

^۱ Original Binder

کشورجوابگوی نیاز کشور نباشند. فرضیه تحقیق حاضر این است که با مخلوط کردن قیرهای دارای ساختار مختلف و یا اضافه کردن افزودنی‌هایی (sbs و نانوکلی) می‌توان مشخصات و عملکرد قیرها را بهبود بخشید که منجر به کاهش خرابیهای موجود در مخلوط آسفالتی، افزایش عمر روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شوند و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشند.

۱-۵- اهداف پژوهش

اهداف کلی این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- آشنایی با اجزا، ساختمان و رئولوژی قیر
- ۲- آشنایی با افزونه‌های مورد استفاده در قیرها و مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه
- ۳- اصلاح مشخصات قیر با افزودن پلیمر به آن، با انجام آزمایش‌های کلاسیک و آزمایش‌های شارپ.
- ۴- تهیه قیرهای پلیمری با توجه به درجه عملکردی برای شرایط مختلف آب و هوایی
- ۵- ایجاد یک بانک اطلاعاتی از مشخصات قیرهای تولید داخل کشور و قیرهای اصلاح شده پلیمری

۱-۶- کاربرد پژوهش

انتخاب قیرهای اصلاح شده متناسب با شرایط اقلیمی، راه حل مناسبی برای رفع خرابی‌ها آسفالت، افزایش طول عمر راهها، استهلاک کمتر وسایل نقلیه و ضرورت تعمیر و نگهداری کمتر راهها بوده و صرفه جویی اقتصادی و حفظ سرمایه‌های ملی در کوتاه مدت و دراز مدت را در پی خواهد داشت. قیر تولید شده را می‌توان در صنایع راهسازی، ساختمان سازی و صنایع دیگر استفاده کرد با توجه به نتایج حاصل از طرح مجموعه متعددی از دستگاه‌ها قابلیت استفاده از داده‌ها را خواهند داشت. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان وزارت راه و ترابری، وزارت نفت، شهرداری‌ها و... را نام برد.

۱-۷- روش انجام پژوهش

در این تحقیق بدلیل وسعت آزمایشات مورد نظر، آزمایشگاه قیر و راهسازی پژوهشگاه صنعت نفت، به

عنوان تنها مرجع مجوز و استاندارد ایران در این زمینه، انتخاب گردید. به توجه ماهیت پلیمرهای مورد استفاده، قیرهای پایه ۱۰۰-۸۵ و ۱۵۰-۱۲۰ انتخاب گردیده و با استفاده از روش melting پلیمر با قیر مخلوط می گردد. جهت مقایسه عملکرد پلیمرها ابتدا کلیه آزمایشات سنتی و شارپ بر روی قیرهای پایه انجام میگیرد. در گام بعد کلیه آزمایشات بر روی قیرهای پلیمری اصلاح شده صورت می گیرد و نتایج با قیر پایه مقایسه میگردد. در نهایت جهت اصلاح برخی پارامترهای قیر پلیمری تولید شده از افزونه هایی چون نانوکلی و گوگرد استفاده می شود.

۸-۱- ساختار پایان نامه

در این فصل در ابتدا کلیاتی در رابطه با اصلاح خواص قیرها توضیح داده شده و سپس در ادامه تعریف مسئله، اهمیت و ضرورت مسئله، فرضیه ها، اهداف، کاربردها و روش انجام تحقیق مورد بحث قرار می گیرد. در فصل دوم به تاریخچه، مبانی نظری موضوع، شناخت قیر و پلیمرها پرداخته شده و در فصل سوم با عنوان ادبیات موضوع به بررسی پیشینه و فعالیتها و تلاشهایی که در این زمینه در داخل و خارج از کشور انجام گرفته، پرداخته شده است. در فصل چهارم متدولوژی و نحوه انجام آزمایشاتی که قرار است انجام شود شرح داده می شود و نیز در فصل پنجم به تحلیل و بحث پیرامون نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات اختصاص دارد و در فصل ششم به نتیجه گیری و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارایه خواهد شد. در پایان پژوهش نیز منابع و مراجعی که استفاده شده اند، ارایه می گردد.

فصل دوم:

تاریخچه، مبانی نظری،

شناخت قیر و پلیمرها

مقدمه

این فصل به تدوین تاریخچه، شناخت قیر و پلیمرها اختصاص دارد. در مبحث تاریخچه پژوهشگر به صورت اجمالی به بیان سابقه تاریخی در زمینه موضوع پژوهش پرداخته است. در مبحث شناخت قیر و پلیمرها، به ساختمان، اجزا، رئولوژی، مشخصات مطلوب، خواص مکانیکی و فیزیکی، رفتار قیر ایده آل و روش های اصلاح و خواص قیر پرداخته شده و در ادامه بحث به مواد افزودنی قیر و پلیمرها اشاره شده است. با توجه به اینکه از نظر کمی قیر سهم ناچیزی در مخلوطهای آسفالتی دارد شاید چنین تصور شود که نقش قیر در رفتار، دوام و ثبات لایه های آسفالتی روسازی، چندان با اهمیت و قابل ملاحظه نمی باشد، لیکن حقیقت این است که قیر و خواص فیزیکی و شیمیایی آن تأثیر عمده ای در عملکرد مطلوب، دوام و پایداری مخلوطهای آسفالتی دارد. مطالعه عملکرد و رفتار پایداری مخلوطهای آسفالتی بدون توجه به رفتار و خواص قیر امکان پذیر نیست. برای عملکرد مناسب و پایداری روسازی آسفالتی، قیر مصرفی بایستی ضمن دارا بودن دوام از رفتار و عملکرد مناسبی نیز برخوردار باشد.

۲-۱- تاریخچه قیر

سومریها، آشوریها و بسیاری از تمدنهای پیشین، از قیر بطور وسیعی استفاده می کردند. آغاز صنعت مدرن قیر را می توان به سال (۱۷۱۲ م.) که سنگهای قیر طبیعی در فرانسه کشف شدند، نسبت داد. در آن هنگام، مواد قیری را بطور ساده ای به صورت کلوخه روی سطح جاده های محلی پخش می کردند و می گذاشتند که ترافیک به تدریج آنها را ساییده و متراکم نماید. این «تکنیک» کاملاً موفقیت آمیز بود و در مدت کوتاهی پیشرفت هایی در کار، به صورت پودر کردن و گرم کردن مواد قبل از استفاده، حاصل شد. سپس آسفالت ها را با کوبیدن و مسطح کردن توسط آهن داغ (اتو) متراکم و محکم می نمودند. این ماده که عموماً به نام «سنگ آسفالت متراکم Compressed rock Asph.» شناخته می شد، با موفقیت بسیاری در خیابان های اروپا به کار گرفته شد. چنین جاده هایی آسفالتی ای، بسیار بادوام، بهداشتی و جالب توجه بودند. تنها اشکال آنها این بود که این مواد، با آغاز ترافیک سنگین قرن بیستم، سست (بی ثبات) و لغزان (Slippery) بودند [۱].

۲-۲- منابع قیر

قیرهای مورد استفاده در صنعت راهسازی را عمدتاً "به دو گروه تقسیم می کنند:

۱- قیر طبیعی (معدنی)

۲- قیر حاصل از تقطیر نفت خام (نفتی)

۲-۲-۱- قیرهای طبیعی

همانطور که می دانیم، نفت خام در اعماق زمین دفن است. وقتی که مواد فرار نفت خام به مرور زمان و بر اثر عوامل جوی مانند دما و فشار بالا، تبخیر می شوند، ماده سیاه رنگی بر جای می ماند که آن را قیر طبیعی نامند. قیرهای بدست آمده از این روش معمولاً "خالص نیستند و مخلوطی از قیر و مصالح معدنی می باشند.

۲-۲-۲- قیرهای نفتی

تا پایان قرن نوزدهم، قیرهای معدنی در راهسازی و خیابان سازی از انواع قیرهای معدنی، قیرسنگها و ماستیک قیری و پودر قیر سنگ بود که در شمار قیرهای معدنی یا طبیعی محسوب می شوند. در اوایل قرن بیستم، قیر نفتی حاصل از پالایش نفت خام به بازار آمد و جایگزین قیرهای معدنی و طبیعی در روسازی های آسفالتی و سایر مصارف صنعتی گردید. قیرهای نفتی از پالایش نفت خام در برجهای تقطیر بدست می آید و نهایتاً آنچه که در ته برج تقطیر و در حرارت بیش از 380°C باقی می ماند قیر خالص نفتی است. قیر با درجه سفتی متفاوت برای مصارف مختلف راهسازی را می توان با تنظیم درجه حرارت و فشار داخل برجهای تقطیر بدست آورد [۳ و ۵].

۲-۳- طبقه بندی و نامگذاری قیرها

قیرهایی را که در صنعت راهسازی کاربرد دارند، بر اساس خواص (تست های) فوق الذکر و به روش های مختلف طبقه بندی و نامگذاری می نمایند:

۲-۳-۱- قیرهای نفوذی

قیرهایی را که مستقیماً از برج تقطیر در خلاء پالایشگاه به دست آمده یا مختصری مورد فرآیند هوادهمی قرار گرفته‌اند بنام قیرهای (رده Pen) نامیده و نامگذاری آنها بر اساس بازه‌ای است که Pen قیر مابین آنها قرار می‌گیرد. (به عنوان مثال قیر ۶۰/۷۰ قیری است که Pen آن بین ۶۰ تا ۷۰ قرار دارد). انواع قیرهای خالص با درجات نفوذ مختلف عبارتند از:

۱۰/۲۰، ۲۰/۳۰، ۳۰/۴۰، ۴۰/۵۰، ۵۰/۶۰، ۶۰/۷۰، ۸۵/۱۰۰، ۱۹۰/۲۱۰، ۲۸۰/۳۲۰، ۴۰۰/۵۰۰

۲-۳-۲- قیرهای دمیده یا رده R

قیرهای دمیده از دمیدن هوای داغ به قیر خالص در مرحله آخر عمل تصفیه بدست می‌آیند. نحوه عمل بدین صورت است که قیر خالص را که در حالت مایع و با درجه حرارت زیاد است، وارد محفظه مخصوص کرده و از قسمت پایین این محفظه به کمک لوله‌های سوراخ دار، هوا به آن دمیده می‌شود. این عملیات معمولاً در دمای بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود و قیر، خصوصیات مورد نظر را پیدا می‌کند. اتمهای هیدروژن موجود در مولکولهای هیدروکربنهای قیر در اثر دمیدن هوا، با اکسیژن هوا ترکیب شده و تبدیل به آب و هیدروکربن‌های سنگین‌تر می‌شوند (پلیمریزاسیون). قیر دمیده حاصل دارای درجه نفوذ کمتر و نقطه نرمی بیشتر از قیر خالص اولیه است. قیر دمیده حساسیت کمتری نسبت به تغییرات درجه حرارت داشته و لذا حالت سفتی خود را بهتر از قیر اولیه در حرارت‌های بالاتر حفظ می‌کند.

قیرهای دمیده کمتر در راهسازی مصرف شده و از آنها برای ساختن ورقهای پشت بام، باطری اتومبیل، قیر پاشی زیر اتومبیل، رنگهای ضد آب و اندودکاری استفاده می‌شوند. در راهسازی از قیرهای دمیده برای پرکردن ترکهای روسازی بتنی و همچنین برای پرکردن حفرات و فضاهای خالی زیر دالهای بتنی استفاده می‌شوند. اضافه کردن کاتالیزورهای مخصوص به قیرهای دمیده در موقع ساخت آنها سبب می‌شود که قیر، حالت خمیری پیدا کرده و این حالت را در درجه حرارت‌های پایین که قیرهای خالص در آن درجه حرارت‌ها حالت شکننده دارد، حفظ کند. از این نوع قیر دمیده که تا حدودی شبیه به لاستیک است برای پوشش کف کانالها استفاده می‌شود.

قیرهای تولیدی پالایشگاه‌ها را که در دمای محیط به صورت مایع یا نیمه جامد هستند، تحت فرآیند هوادهمی، به قیرهای رده Pen برای مصارف راهسازی و یا قیرهای جامد رده R برای مصارف عایق پوشش بام و غیره، تبدیل می‌نمایند.

۲-۳-۳- قیرهای رده ویسکوزیته

متخصصین فن اعلام کرده‌اند که ویسکوزیته بیش از دو مشخصه متداول دیگر یعنی SP^۱ و pen، می‌تواند معرف و گویای خواص قیر باشد، از این رو طبقه‌بندی جدیدی بر اساس ویسکوزیته ارائه نموده‌اند و از کد AC-۲,۵ تا AC-۴۰ برای دسته‌بندی خواص قیری استفاده نموده‌اند [۶].

۲-۴- انواع قیرهای نفتی

قیرهای نفتی خالص از پسماند پالایش نفت خام بدست می‌آیند. در حین تقطیر نفت خام، روغن‌های سبک‌تر در درجه حرارت‌های پایین‌تر تبخیر شده و با بالا رفتن دما، روغن‌های سنگین‌تر جدا می‌شوند. آنچه که در ته این برجها باقی می‌ماند قیر خالص است که با تنظیم درجه حرارت و فشار داخل برج تقطیر می‌توان قیرهای با درجه سفتی متفاوت بدست آورد.

در اغلب تصفیه‌خانه‌ها در مرحله اول عمل تقطیر نفت خام، معمولاً "۵ نوع ماده بدست می‌آید که عبارتند از: بنزین، نفت سفید، سوخت دیزل، روغن موتور و قیر. با ادامه عمل تقطیر، هر یک از این مواد ممکن است خود به چند ماده دیگر تقسیم شوند. در حال حاضر، تعداد هفت پالایشگاه در سطح کشور فعالیت دارند [۴و۱].

۲-۴-۱- ته مانده برج تقطیر در خلأ (V.B)

«VB»، آخرین محصولی است که از قسمت پایین برج تقطیر در خلأ گرفته می‌شود. این قیر که هنگام خروج از برج، در درجه حرارت داخل برج، رفتار کاملاً نیوتنی دارد، بر اثر سرد شدن به یک مایع خمیری ویسکوز تبدیل می‌گردد. خواص قیر VB, (SP, pen, ...) تا حدی به پایه نفت خام و بیشتر به شرایط فرآیند تقطیر بستگی دارد. به عنوان مثال، اکثر پالایشگاه‌ها دارای محصولی با $pen > 300 \text{ dmm}$ و ویسکوزیته‌ای حدود $\eta = 60 \text{ cs}$ (در 135°C)، می‌باشند ولی برج تقطیر پالایشگاه شیراز محصولی از نوع ۶۰/۷۰ تولید می‌کند.

^۱ Softening Point

۲-۴-۲- روغن سنگین (H.V.S)

روغن‌های سنگین با علامت اختصاری HVS یا VS، محصول برج تقطیر در خلأ می‌باشند که یک مرحله پیش از قیر VB، از برج، گرفته می‌شوند. بخشی از این روغن‌ها در بالا بردن درجه نفوذپذیری (pen) قیرها و شل کردن قیر و نیز در تهیه قیرهای دمیده با کیفیت و انعطاف پذیری بیشتر، به کار می‌روند. البته مصارف غیر قیری نیز برای این روغن‌ها وجود دارد [۱].

۲-۴-۳- قیرهای خالص

این قیرها از هواده‌ی ته مانده برج تقطیر در خلأ بدست می‌آیند. برخی از قیرهای خالص از اختلاط و برگشت قیرهای نرم‌تر به درون قیرهای سفت‌تر و یا برای تهیه قیرهای با درجه نفوذ بالا معمولاً از انحلال یک حلال با نقطه جوش بالا به درون قیرهای با درجه نفوذ کمتر استفاده می‌شود. مشخصات قیرهای خالص در جدول ۲-۱ ملاحظه می‌گردد.

در بین قیرهای خالص، قیرهای ۸۵/۱۰۰ و ۶۰/۷۰ در راهسازی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. این قیرها که از رده pen نامگذاری شده‌اند، به ترتیب دارای درجه نفوذپذیری ما بین $pen < 70$ و $60 < pen < 100$ می‌باشند. اصولاً دسته‌بندی رده pen مربوط به راهسازی بوده و قیرهای رده pen فوق نیز بیشتر در مصارف راهسازی کاربرد دارند. قیرهای رده pen را هم می‌توان با کنترل شرایط برج تقطیر به عنوان محصول VB، مستقیماً از برج تقطیر در خلأ گرفت (مثل قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه شیراز) و هم می‌توان با هواده‌ی قیر VB و یا پس آمیزی قیرهای سفت‌تر و شل‌تر، به دست آورد [۱].

جدول ۱-۲: مشخصات قیرهای خالص [۲]

درجه نفوذ										روش آزمایش		نوع آزمایش
۲۰۰-۳۰۰		۱۲۰-۱۵۰		۵۸-۱۰۰		۶۰-۷۰		۴۰-۵۰		آشتو	ای اس تی ام	
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل			
۲۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۰۰	۸۵	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	T۴۹	D۵	درجه نفوذ ($\frac{1}{10}$ میلیمتر)
	۱۷۶		۲۱۸		۲۳۲		۲۳۲		۲۳۲	T۴۸	D۹۲	درجه اشغال (سانتیگراد)
	۱۰۰		۱۰۰		۱۰۰		۱۰۰		۱۰۰	T۵۱	D۱۱۳	خاصیت انگمی در ۲۵ سانتیگراد در سانتیمتر
		۹۹	۹۹		۹۹		۹۹		۹۹	T۴۴	D۲۰۴۲	درجه خلوص باتری کلرورائیلن - درصد
۴۰	۳۵	۴۶	۴۰	۵۲	۴۵	۵۶	۴۹	۶۰	۵۲	T۵۳	D۲۳۹۸	نقطه نرمی قیر (سانتیگراد)
										T۱۷۹	D۱۷۵۴	آزمایش لعاب نازک قیر در ۱۶۳ درجه سانتیگراد - ۵ ساعت
۱/۵		۱/۳		۱		۰/۸		۰/۸		T۱۷۹	D۱۷۵۴	افت وزنی پس از آزمایش لعاب نازک
	۴۰		۴۶		۵۰		۵۴		۵۸	T۴۹	D۵	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
	۱۰۰		۱۰۰		۷۵		۵۰			T۵۱	D۱۱۳	خاصیت انگمی بعد از آزمایش لعاب نازک

شرایط کلی: قیرهای خالص باید از تقطیر مستقیم مواد نفتی تهیه شده و همگن باشد و در حرارت ۱۷۴ سانتیگراد کف نکند نمونه گیری قیر باید بر اساس روشهای D ۲۰۲۴ ای اس تی ام و یا T ۴۶ آشتو انجام گیرد.

۲-۴-۲- قیرهای دمیده ۲۵-۸۵ & R ۱۵-۹۰

قیرهای مایع یا نیمه جامدی همچون V.B، ۲۰۰/۳۰۰، ۱۸۰/۲۰۰، ۸۵/۱۰۰، ۶۰/۷۰ و غیره را بر اثر دمیدن هوا، در شرایط فشار و درجه حرارت معین، تحت اثر یکسری واکنش‌های تراکمی - دهیدروژناسیون قرار داده و قیرهای جامدی با pen کمتر و SP بالاتر ایجاد می‌نمایند. چنین قیرهایی را به جهت افزایش خاصیت انعطاف‌پذیری، از رده R نامگذاری می‌نمایند. هم اکنون قیر ۲۵-۸۵ محصول پالایشگاه‌های

اصفهان و تبریز و قیر ۱۵-۹۰ R محصول پالایشگاه شیراز در کشور تولید می‌گردند. البته پالایشگاه‌های کشور قادرند با توجه به نیازهای راهسازی و سایر مصارف، قیرها دمیده‌ای از رده pen یا رده R، با خواص مورد درخواست صنایع، تولید نمایند (به عنوان مثال قیر ۱۰-۱۱۰ R پالایشگاه شیراز) [۳].

۲-۴-۵- قیرهای محلول

قیرهای محلول، یا قیرهای پس برگشته از حل کردن قیرهای خالص در حلالها یا روغنهای نفتی بدست می‌آید. نوع قیر و کیفیت قیرهای محلول به کیفیت قیرهای خالص اصلی، نوع حلال و مقدار حلال بستگی دارد. هر اندازه مقدار حلال های نفتی در قیر محلول زیادتر باشد، روانی آن بیشتر است. معمولاً درصد حلال مصرفی در قیرهای محلول ایران از ۱۰ تا ۱۵ درصد تغییر می‌کند. بعبارت دیگر، درصد وزنی قیرهای خالص در قیر محلول، حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد است.

عدم دسترسی به وسایل گرم کننده قیر، تجزیه شدن قیر در حرارت های بالا، سرد شدن قیر در هنگام کار، عدم امکان نفوذ آن در مواد معدنی متخلخل، لزوم ایمنی کارگران، آتش سوزی و صرف وقت باعث می‌شود که در بعضی موارد از قیرهای محلول استفاده شود. قیرهای محلول در راهسازی برای اندودسازی سطحی، نفوذی، آسفالت سطحی، آسفالت سرد کارخانه ای و یا مخلوط در محل مصرف می‌شود. قیرهای محلول بر حسب سرعت گیرش و نوع حلال به سه گروه زیر تقسیم می‌شوند:

- قیرهای زودگیر

- قیرهای کندگیر

- قیرهای دیرگیر

۲-۵- ساختمان شیمیایی قیر

قیر از نظر ساختمان شیمیایی بسیار پیچیده و متشکل از انواع هیدروکربورهای مختلف است که به صورت کلوئیدی در یکدیگر معلق هستند. ساختمان شیمیایی قیر به طور کامل شناخته شده نیست و ترکیبات شیمیایی قیر و ساختار آن شدیداً به نفت خام اولیه ای که از آن مشتق شده و فرآیندهای که جهت تولید آن به کار رفته بستگی دارد ساختار و ترکیبات شیمیایی نفت خام نیز بسیار متنوع است در این رابطه با توجه به نوع هیدروکربور غالب در نفت خام، می‌توان آن را به سه دسته پارافینی، آسفالتین ها و نفتن ها تقسیم نمود.

جدول ۲-۲: ساختار شیمیایی انواع مختلف نفت خام [۲]

هیدروکربن ها	نفت خام پارافین	نفت خام نفتن	نفت خام آسفالتنی
پارافین ها	۴۰	۱۲	۵
نفتن ها	۴۸	۷۵	۱۵
آروماتیک ها	۱۰	۱۰	۲۰
آسفالتین ها	۲	۳	۶۰

همان گونه که ذکر گردید، ساختمان شیمیایی قیرها بر اساس محل و منبع نفت خام اولیه با یکدیگر تفاوت دارد. نحوه عملیات و فرآیند تولید در پالایشگاه (مانند هوادهی) نیز در ساختار شیمیایی قیر تغییر ایجاد می نماید.

به طور کلی عناصر تشکیل دهنده قیر عبارتند از: کربن، هیدروژن، گوگرد، اکسیژن و نیتروژن و برخی عناصر فلزی که به مقداری بسیار کم در آن یافت می شود. درصد هر یک از عناصر در جدول (۲-۳) آورده شده است [۲].

جدول ۲-۳: عناصر تشکیل دهنده قیر [۲]

عناصر	درصد
کربن	۸۸-۸۲
هیدروژن	۱۱-۸
سولفور	۶-۰
اکسیژن	۱/۵-۰
نیتروژن	۱-۰

۲-۵-۱- اجزا قیر

قیر متشکل از ترکیبات مختلف هیدروکربوری است که با توجه به نحوه جداسازی، ترکیبات آن را می توان به گروههای مختلف شیمیایی تقسیم بندی کرد. اجزاء قیر را می توان به دو گروه شیمیایی مشخص به نام آسفالتین ها^۱ و مالتن ها^۲ (پترولن ها) تقسیم نمود. مالتن ها نیز به گروههای ترکیبات آرومیتیک های نفتی^۳، آروماتیکهای قطبی (رزین ها)^۴ و اشباع ها (پارافین ها) طبقه بندی می گردند. این چهار گروه به طور مشخص همیشه ثابت نیستند و قدری تداخل بین آنها وجود دارد [۲].

برای بررسی اجزاء شیمیایی قیر ابتدا باید آنرا از یکدیگر تفکیک نمود. روشهای مختلفی جهت تفکیک و جداسازی و شناسایی کمی و کیفی ترکیبات شیمیایی قیر وجود دارد. بدین منظور جداسازی با استفاده از ستون کروماتوگرافی متداولترین روش می باشد. از آنجا که اجزاء قیر دارای درجه های حلالیت های مختلفی هستند، لذا با استفاده از حلالهای مناسب با قدرتهای مختلف و استفاده از ستون کروماتوگرافی می توان این جداسازی را انجام داد. هر کدام از گروهها دارای خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوتی بوده و در ارتباط با خواص فیزیکی و شیمیایی قیر تأثیر مستقل و جداگانه ای دارند که در مجموع خواص قیر، ناشی از کل تأثیرات این ترکیبات، با توجه به نسبت های کمی آنها می باشد [۲].

۲-۵-۱-۱- آسفالتن ها

آسفالتن ها ماده جامد شکننده به رنگ سیاه تا قهوه ای است که علاوه بر عناصر کربن و هیدروژن، دارای مقادیری نیتروژن، گوگرد و اکسیژن می باشند و معمولاً ترکیباتی بسیار قطبی اند که شامل مواد آروماتیک پیچیده با وزن مولکولی بسیار زیاد هستند. آسفالتن، ۵ تا ۲۵ درصد قیر را تشکیل می دهد و از نظر ساختمان، ترکیبی متشکل از حلقه های به هم فشرده آروماتیک با زنجیرهای جانبی آلیفاتیک، می باشند و تعداد حلقه های آروماتیک آن از ۶ تا ۲۰ و حتی بیشتر از این نیز می باشد.

میزان آسفالتن قیر اثر بسیار زیادی در مشخصات رئولوژی آن دارد. هرچه میزان آسفالتن قیر بیشتر باشد قیر سفت تر و درجه نفوذ کمتری خواهد داشت. علاوه بر این، نقطه نرمی و کندوانی بیشتری را نتیجه

^۱ - Asphaltenes

^۲ - Maltenes (Petrolenes)

^۳ - Naphthene Aromatics

^۴ - Polar Aromatics (Resins)

خواهد داد [۲].

۲-۵-۱-۲- آروماتیک های قطبی (رزین ها)

این ترکیبات عمدتاً از کربن و هیدروژن تشکیل شده اند که دارای مقادیر کمی اکسیژن و گوگرد و نیتروژن نیز می باشند. ترکیبات مذکور به رنگ قهوه ای تیره، جامد و یا نیمه جامد می باشد. آنها مواد ضد انعقاد برای آسفالتن محسوب می شوند و نسبت رزین به آسفالتن ممکن است تا حدی باشد که به قیر حالت سل^۱ و یا ژل^۲ بدهد. رزین های موجود در قیر دارای وزن مولکولی ۵۰۰ تا ۵۰۰۰۰ می باشد. خاصیت چسبندگی قیر از خواص ویژه رزین ها می باشد [۴و۲].

۲-۵-۱-۳- آروماتیک های نفتی

آروماتیک های نفتی ترکیبات حلقوی، با کمترین وزن مولکولی اند که شامل زنجیرهای جانبی آروماتیکی یا نفتیکی هستند و محیط ضد انعقاد بسیار مناسبی برای آسفالتین ها به شمار می روند. این گروه که ۴۰ تا ۶۰ درصد قیر را تشکیل می دهد، مایعی ویسکوز به رنگ قهوه ای تیره است که میانگین وزن مولکولی آنها بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ در نوسان است. آروماتیک ها، حاوی زنجیرهای کربنی قطبی هستند [۲].

۲-۵-۱-۴- اشباع ها (پارافین ها)

ترکیبات اشباع از هیدروکربن های آلیفاتیک زنجیری مستقیم و شاخه دار همراه با الکیل نفتن ها و مقداری الکیل آروماتیک، تشکیل شده است. این ترکیبات اغلب به شکل روغن های ویسکوز غیر قطبی و بی رنگ هستند. میانگین وزن مولکولی آنها عیناً شبیه آروماتیک ها است. اجزاء ترکیبات اشباع شامل مواد

۱- حالت سل (sol)- در این حالت ذرات به صورت یکنواخت و همگن در محلول پراکنده می شوند. قیرهای حاصل از پالایش نفت خام معمولاً از این نوع اند.

۲- حالت ژل (Gel)- در این حالت ذرات کلوئیدی قیر، یک شبکه منظم اسفنج مانند ایجاد می کند که در تمام محیط سیستم انتشار می یابد. در این حالت سیستم به صورت نیمه جامد است و این شرایطی است که مواد تشکیل دهنده مالتن از نظر ترکیبات شیمیایی، بیشترین خواص هیدروکربن های نفتیکی یا پارافینیکی را داشته باشد.

مومی ۱ و غیر مومی اشباع است. ترکیبات اشباع ۵ تا ۲۰ درصد قیرها را تشکیل می دهند [۲ و ۴].

۲-۶- خواص مکانیکی و فیزیکی قیر

خواص فیزیکی و مکانیکی قیر نه تنها در حین ساخت، پخش و تراکم مخلوطهای آسفالتی دارای اهمیت می باشد، بلکه این خواص در هنگام خدمت دهی نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است و توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی قیر در کنار خواص شیمیایی آن می تواند یکی از عوامل دستیابی به روسازی آسفالتی باداوم باشد [۲].

۲-۶-۱- رفتار قیر

قیر از نظر رفتاری، ماده ای است ویسکوالاستیک که در حرارت محیط و تحت بار مشخص، نه رفتار یک ماده الاستیک را دارد و نه رفتار یک ماده ویکسوز را، بلکه رفتار قیر شامل ترکیبی از این دو حالت، یعنی ویسکوالاستیک، است. رفتار قیر خالص به سبب ماهیت ویسکوالاستیک آن به درجه حرارت و زمان بارگذاری بستگی دارد. به عبارت دیگر زمان بارگذاری و دما، تاثیر توأم در رفتار قیر دارند.

در شرایط گرم یا تحت بارگذاری طولانی (مانند حرکت کامیون ها بر روی آسفالت با سرعت کم یا در توقف) قیر مانند یک ماده ویکسوز عمل می کند. تحت این شرایط مصالح سنگی مخلوط آسفالتی، بار را تحمل می کنند. در دمای پایین یا در حالت بارگذاری سریع (مانند حرکت سریع ترافیک) قیر خالص مانند یک جامد الاستیک رفتار می کند) در رفتار الاستیک، در اثر بارگذاری، تغییر شکل حاصل شده، پس از باربرداری تغییرات ایجاد شده به حالت اول باز می گردد. البته، در صورتی که بیش از توان یا مقاومت فشار وارد گردد، این امکان وجود دارد که ماده الاستیک بشکند (همچنین قیر خالص در دمای پایین نیز رفتار یک ماده الاستیک را دارد ولی، هنگامی که بیش از حد بارگذاری شود شکننده شده، ترک برمی دارد. لذا، در سرما، در روسازی های آسفالتی، ممکن است ترک خوردگی های ناشی از دمای پایین پدید آید.

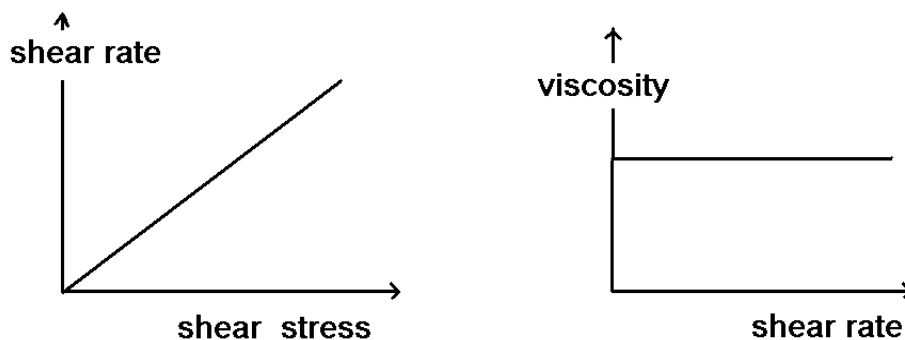
در شرایط محیطی بین حالات سرمای زیاد و گرمای زیاد، یعنی در دمای متوسط، قیر رفتار مایعات ویسکوز و هم رفتار جامدهای الاستیک را توأمأ داراست. قیر در این حالت بسته به دما و زمان بارگذاری هم رفتار

^۱ wax- (بخشی از پارافین ها هستند که قابلیت متبلور شدن را دارا می باشد) - روش تعیین میزان موم قیر در استاندارد DIN ۵۲۰۱۵ آمده است.

ویسکوز و هم رفتار الاستیک دارد.

۲-۱-۶-۱- رفتار نیوتنی قیر

قیرهای راهسازی، اغلب رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهند، خصوصاً در درجه حرارت‌های بالای 25°C . نمودار ۱-۲ نشان دهنده تناسب تنش با سرعت کرنش می‌باشد، که از ویژگی‌های مواد نیوتنی است. شرط دیگری که برای یک ماده نیوتنی لازم است، آن است که هیچ رفتار الاستیکی از خود نشان ندهد. قیرها به جهت دارا بودن رفتار الاستیکی، نمی‌توانند در زمره مواد نیوتنی قرار گیرند، گرچه رفتار جریان نیوتنی ($c=1/100$) از خود به نمایش گذارند [۱۳].

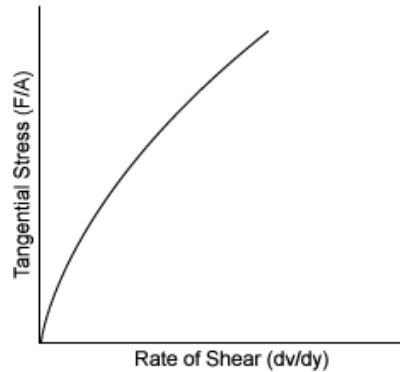


نمودار ۱-۲: رفتار نیوتنی [۱۳]

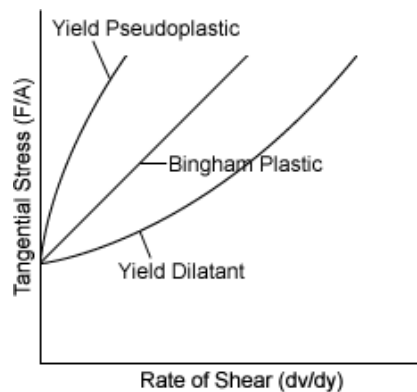
۲-۱-۶-۲- رفتار شبه پلاستیک و بینگهام پلاستیک

نوعی از رفتار که با رقیق شدن تنش (Shear thinning : کاهش ویسکوزیته با افزایش تنش) همراه است به نام «شبه پلاستیک» می‌شناسند. قیرهایی که در دماهای پایین و تنش‌های برشی کم (سرعت‌های برشی کم) تست شده‌اند، عموماً رفتار شبه پلاستیک یا بینگهام پلاستیک را از خود نشان می‌دهند. نمودار ۲-۲ نشان می‌دهد که سرعت برش در تنش‌های بالاتر، خیلی سریعتر افزایش می‌یابد، که منجر به کاهش ویسکوزیته خواهد شد. هنگامی که $c < 1/10$ باشد، قیر حساس به تنش بوده و به صورت یک ماده شبه پلاستیک رفتار می‌کند. قیرهای بسیار دمیده شده، نظیر قیرهای پوشش بام، مثال کلاسیکی از رفتار شبه پلاستیک می‌باشند، بجز در دماهای پایین که ماده ممکن است یک نقطه تسلیم مشخصی از خود نشان دهد، چنانکه در نمودار ۲-۳، برای رفتار بینگهام پلاستیک دیده می‌شود. همه قیرها، در دماهای بقدر کافی پایین،

اصولاً رفتار یک جامد الاستیک شکننده، با پتانسیل جریان یا خزش بسیار کم، از خود به نمایش می‌گذارند. بطور معمول ما قیرها را در درجه حرارت‌های زیر درجه حرارت گذر شیشه‌ای (T_g)، به عنوان جامدات شیشه‌ای در نظر می‌گیریم [۳۵].



نمودار ۲-۲: رفتار شبه پلاستیک [۳۵]



نمودار ۳-۲: رفتار بینگهام پلاستیک [۳۵]

۲-۶-۲- حساسیت حرارتی قیر

حساسیت حرارتی که شاید بتوان آن را به عنوان چگونگی تغییرات حاصله در روانی یا سفتی قیر (گرانروی یا درجه نفوذ) در دماهای مختلف تعریف نمود، یکی از پارامترهای موثر در رفتار قیر است، که برای قیرهای مختلفی که در یک گروه طبقه بندی می‌گردند (طبقه بندی براساس درجه نفوذ یا طبقه بندی براساس گرانروی) ممکن است متفاوت باشد. برای مثال، در طبقه بندی براساس درجه نفوذ، چند قیر که در دمای ۲۵ درجه دارای درجه نفوذ یکسانی هستند، ممکن است در درجه حرارت دیگر درجه نفوذشان یکسان

نباشد. همچنین در طبقه بندی براساس گرانروی نیز ممکن است چند قیر مختلف در ۶۰ درجه سانتیگراد دارای گرانروی یکسانی باشند، ولی گرانروی و یا سفتی آنها در دمای بالاتر و یا پایین تر بایکدیگر متفاوت باشد. لذا، رفتار آنها در هنگام پخش، تراکم و خدمت دهی، متفاوت خواهد بود. این امر می تواند بر دوام و پایداری مخلوط های آسفالتی تاثیر بگذارد. هر چه تغییرات روانی یا سفتی با تغییر دما بیشتر باشد، حساسیت حرارتی قیر بیشتر و برعکس هرچه این تغییرات کمتر باشد، حساسیت حرارتی قیر نیز کمتر خواهد بود. قیرهای با حساسیت حرارتی کمتر عملکرد مناسب تری در مخلوط های آسفالتی دارند [۴].

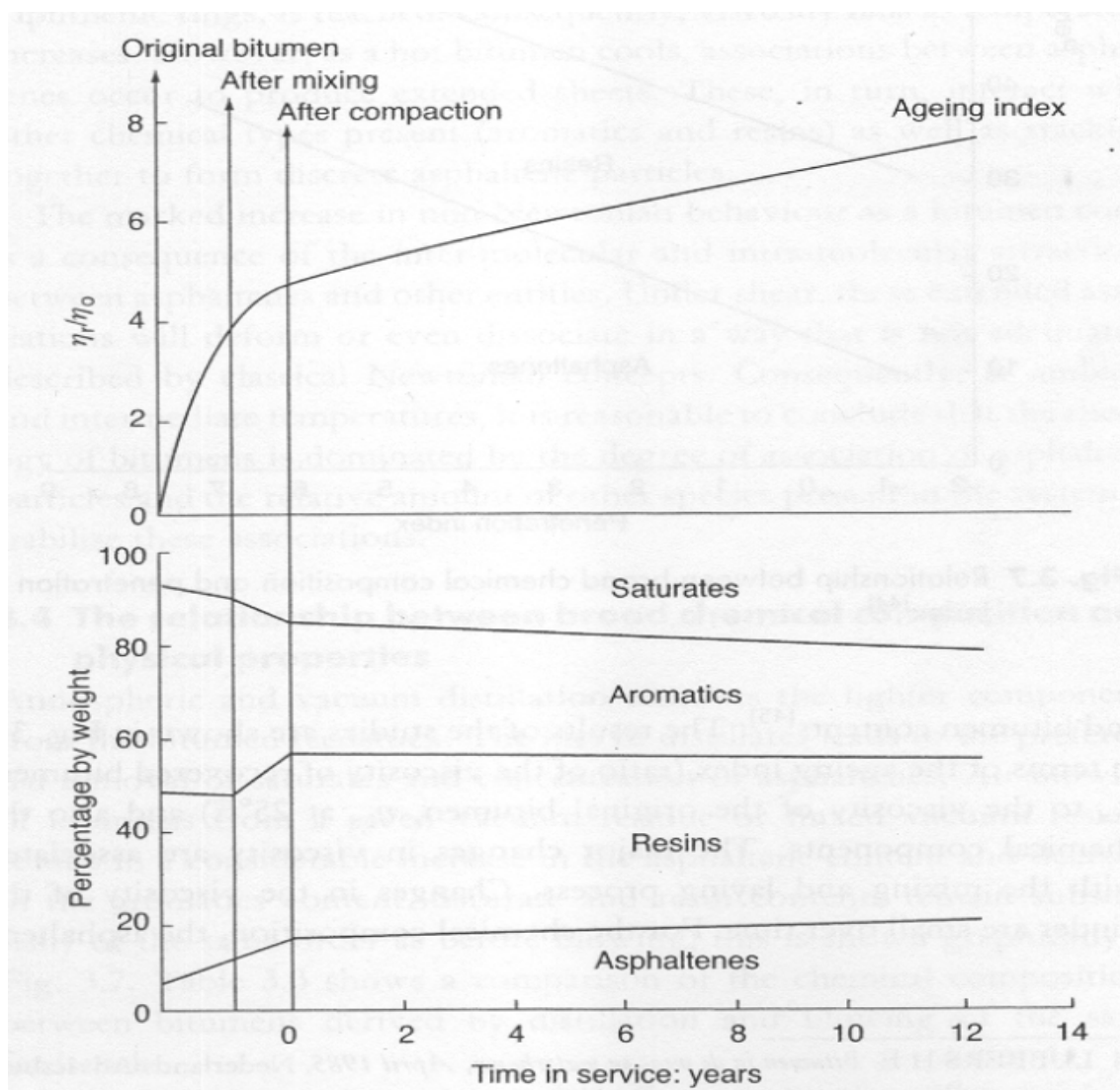
۲-۶-۳- سخت شدن قیر

سخت شدن قیر از پدیده هایی است که ممکن است تحت شرایط و عوامل مختلف در کوتاه مدت و یا بلندمدت پدید آید. علت این امر، تغییرات سریع یا تدریجی در شکل و ترکیبات شیمیایی قیر در اثر عوامل مختلف است. فرآیندهای متفاوتی می توانند در تغییرات شیمیایی قیر دخالت داشته باشند، که از آن میان می توان به تصعید مواد فرار و سبک قیر، اکسیداسیون، پلیمریزاسیون، کربونیزاسیون، جذب روغن های قیر توسط سنگدانه ها، واکنش شیمیایی بین قیر و اجزاء معدنی سنگدانه ها و غیره اشاره نمود.

کلیه فرآیندهای فوق تابع شرایط محیطی، دما و ضخامت پوشش قیر در روی سنگدانه ها در آسفالت می باشد. سخت شدن قیر در آسفالت در دو مرحله رخ می دهد، یکی کوتاه مدت و سریع، دیگری درازمدت و تدریجی است. مرحله اول سخت شدن در کوتاه مدت با سرعت و شدت زیاد در فاصله زمانی کوتاه بین گرم کردن قیر و اختلاط قیر و مصالح سنگی در درجه حرارت زیاد رخ می دهد. مرحله دوم سخت شدن قیر در طول زمان سرویس، به تدریج و آرام صورت می گیرد. نتایج فیزیکی سخت شدن قیر باعث کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی، کاهش خاصیت شکل پذیری، افزایش گرانروی، کاهش خاصیت چسبندگی و افزایش قابلیت شکنندگی قیر می گردد. عامل اصلی سخت شدن قیر، تغییراتی است که در اجزا شیمیایی قیر در مراحل گرم کردن قیر، اختلاط آن با مصالح سنگی و در زمان خدمت دهی بر اثر عوامل ذکر شده حاصل می گردد. در نمودار ۲-۴ میزان تغییرات هر یک از اجزای شیمیایی، در مراحل مختلف از عمر روسازی نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ملاحظه می گردد مقدار آسفالتن ها به تدریج افزایش می یابد درحالی که مقدار رزین و ترکیب های آروماتیکی کاهش مییابد که، در نتیجه در این مراحل شاخص پیرشدگی^۱ (نسبت گرانروی قیر موجود به قیر اصلی) افزایش می یابد. شاخص پیرشدگی در این نمودار ها، نسبت گرانروی قیر

^۱ Ageing index

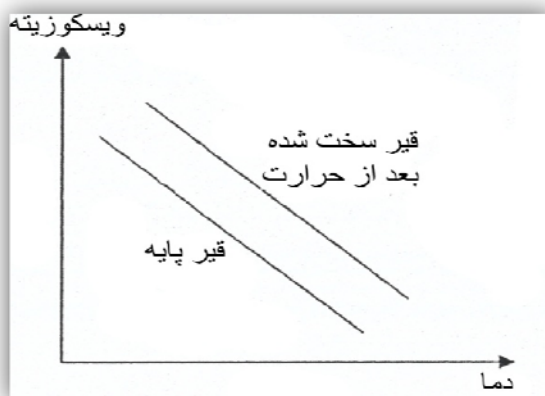
استحصال شده از نمونه ها به قیر اصلی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد است. بررسی نشان می دهد که بیشترین تغییر در گرانی در زمان اختلاط و پخش مخلوط صورت می گیرد و بعد از آن در طول زمان سرویس تغییرات گرانی قیر ناچیز است. از دیدگاه اجزای شیمیایی همانطور که در نمودار ۲-۴ دیده می شود، آسفالتن در زمان اختلاط و تراکم افزایش یافته و در طول زمان خدمت دهی نیز این روند کماکان ادامه دارد. رزین و آروماتیک ها در طول زمان کاهش پیدامی کنند. نمونه های آزمایش شده از ۳ میلیمتر بالای نمونه های برداشت شده از روسازی بدست آمده است [۴].



نمودار ۲-۴: تغییرات اجزای قیر در زمان اختلاط، پخش و تراکم، و زمان سرویس [۴]

۲-۶-۴- پیر شدگی قیر

تغییرات تدریجی در خواص فیزیکی و شیمیایی قیرهای نفتی به عنوان یک اصل پذیرفته شده است. محققین در این زمینه عقیده دارند که مهمترین عامل این تغییرات پدیده سخت شدن^۱ تدریجی است که موجب ظهور انواع آسیب دیدگی‌ها در رویه آسفالت می‌شود. فرآیندهای متفاوت و متنوعی در تغییرات تدریجی یا سخت شدن قیر دخالت دارد که از میان آنها می‌توان به اکسیداسیون، واکنش‌های فتوشیمیایی، تصعید مواد فرار و سبک قیر، پلیمریزاسیون، کربنیزاسیون، جذب روغن‌های موجود در قیر توسط سنگ دانه‌ها، واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات قیر و اجزاء معدنی مصالح سنگی و دگرگونی‌های میکروبیولوژیک اشاره کرد. کلیه فرآیندهای فوق، تابع زمان، دمای محیط، حرارت، ضخامت و غشاء پیرامون سنگ دانه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال سرعت اکسیداسیون که مهمترین عامل در سخت شدن مواد می‌باشد، با هر ۱۰ درجه سلسیوس افزایش در بالای ۱۰۰ درجه سلسیوس دو برابر می‌شود. سخت شدن فیزیکی یکی دیگر از موارد پیر شدگی یا سخت شدن مرسوم در قیر می‌باشد. سخت شدن فیزیکی وقتی رخ می‌دهد که قیر در دمای محیط بوده و معمولاً به آرایش یافتگی مجدد مولکول‌های قیری و بلورینگی آهسته واکس‌ها نسبت داده می‌شود. البته سخت شدن فیزیکی برگشت پذیر بوده و با حرارت دهی، ویسکوزیته اولیه قیر مجدداً به دست می‌آید. نمودار ۲-۵ وابستگی ویسکوزیته به دما را برای دو نمونه قیر نشان می‌دهد. این دو نمودار همچنین نشان می‌دهد که همه قیرها به یک اندازه سخت نشده و یا خواص فیزیکی و شیمیایی آنها با آهنگ مشابه تغییر نمی‌کند [۴].



نمودار ۲-۵: نمودار وابستگی ویسکوزیته به دما برای دو نمونه قیر [۴]

^۱ Age Hardening

مطالعات زیاد و دراز مدتی روی قیرهای مصرفی در راه ها انجام شده، تا مشخص شود که آیا ترکیبات شیمیایی قیر با گذشت زمان تغییر می کند یا خیر. نتایج این تحقیقات و بررسی ها بر حسب شاخص پیرشدگی بیان می شود.

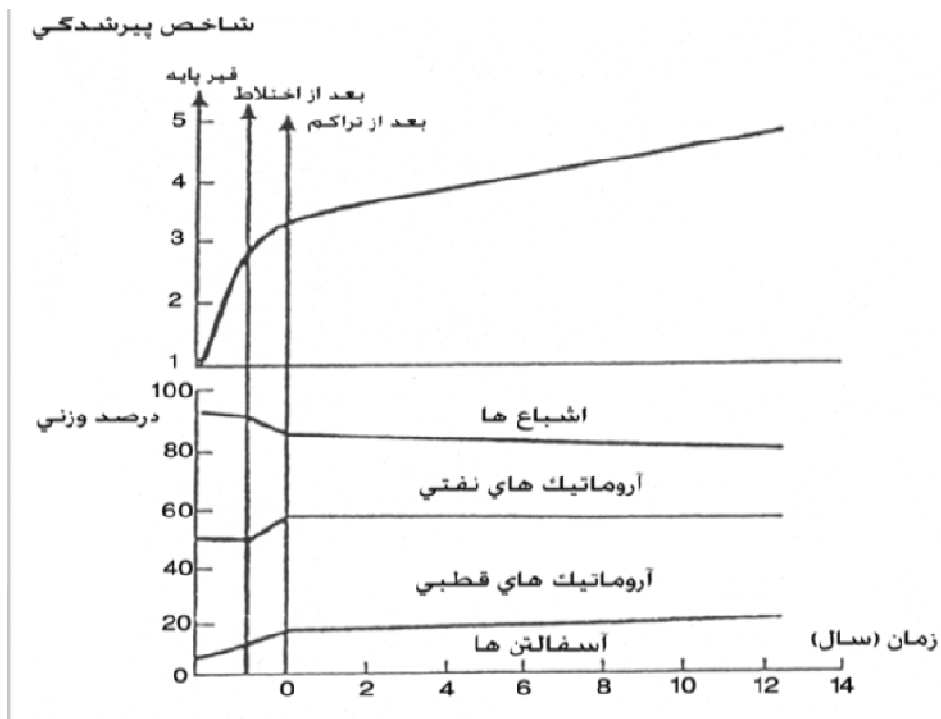
$$\text{Ageing Index} = \eta_r / \eta_0 \quad \text{رابطه ۱-۲} :$$

شاخص پیرشدگی بر حسب نسبت ویسکوزیته قیر بازیافت شده (η_r) به ویسکوزیته قیر اصلی (η_0) در دمای ۲۵ درجه سلیسیوس محاسبه می گردد.

در هنگام فرآیند اختلاط همه ذرات و پرکننده ها با یک فیلم قیری به ضخامت ۵ تا ۱۵ میکرون آغشته می شوند. اگر این سطح ذرات را بتوان به صورت یک صفحه پهن کرد، در صورت استفاده از یک تن قیر، یک فیلم قیری به مساحت ۱۰۰۰ متر مربع تولید می شود که معادل یک و نیم برابر یک زمین فوتبال می باشد. بنابراین وقتی قیر با ذرات مصالح داغ مخلوط شده و به صورت یک فیلم روی جاده پخش می گردد، شرایط بسیار مناسبی برای اکسیداسیون و اتلاف مواد فرار فراهم می آورد. این نوع سخت شدن بسیار مهم بوده و باید حتماً در هنگام انتخاب قیر در نظر گرفته شود و با یک حساب سرانگشتی می توان دریافت که در هنگام اختلاط قیر تقریباً در حدود یک درجه سخت تر می شود. مثلاً از درجه نفوذ ۱۰۰ به درجه نفوذ ۷۰ می رسد.

بنابراین همان طور که گفته شد سخت شدن به مقدار زیادی بستگی به عواملی چون دما، مدت زمان اختلاط، مقدار قیر، ضخامت قیر و غیره دارد. کاهش سخت شدگی در هنگام اختلاط بستگی به دقت کنترل همه عوامل ذکر شده دارد.

به طور کلی می توان گفت که حداکثر پدیده سخت شدن وقتی رخ می دهد که قیر با مصالح سنگی در واحد مخلوط کننده کارخانه و در دمای بالا مخلوط می شود ولی تحت شرایط نامطلوب سخت شدن می تواند در جاده ادامه پیدا کند. در نمودار (۲-۶) تغییرات شاخص پیرشدگی قیر، بعد از اختلاط و تراکم و همچنین تغییرات اجزا قیر با گذشت زمان نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می شود. مقدار آسفالتن قیر در مخلوط آسفالتی به تدریج با گذشت زمان افزایش می یابد، در حالی که مقدار رزین و ترکیبات آروماتیکی با گذشت زمان کاهش می یابد. اگر چه تغییرات کمی برای ترکیبات اشباع انتظار می رود، اما کمی افزایش در این جزء به دلیل ریزش روغن از وسایل نقلیه بر روی آسفالت می باشد [۴].



نمودار ۲-۶: نمودار تغییرات شاخص پیرشدگی قیر، بعد از اختلاط و تراکم، تغییرات اجزا قیر با گذشت زمان [۴]

عامل اصلی در سخت شدن قیر در جاده، میزان حفره رویه آسفالتی است. شاخص پیرشدگی در رویه های آسفالتی با درصد حفره بالا بسیار بیشتر از درصد حفره پایین آن است. اگر درصد حفره ۵ درصد کمتر باشد سخت شدگی در هنگام کارکرد یا سرویس بسیار کم می شود و بر عکس اگر درصد حفره بیش از ۹ درصد شود، درجه پیرشدگی بسیار بالا و درجه نفوذ از ۷۰ به کمتر از ۲۵ می رسد.

۷-۲- تحقیقات شارپ (SHRP) و طبقه بندی بر اساس عملکرد

در گذشته از منحنی هایی مانند منحنی وندرپیل و یا اندیس نفوذ و عدد ویسکوزیته-درجه نفوذ، جهت بررسی سختی قیر و همچنین از نقطه نرمی به عنوان حد بالای دمای سرویس و نقطه شکست فراس به عنوان حد پایین دمای سرویس استفاده می شد. در حال حاضر نیز در بسیاری از نقاط کشورمان از تست های قدیمی استفاده می شود که دو علت برای این موضوع وجود دارد. اولاً نا آشنایی با تست های جدید شارپ و عدم آشنایی با اهمیت این تست ها و ثانیاً نبودن تجهیزات و دستگاههای لازم برای انجام این تست ها به گونه ای که در بسیاری از کشورهای دنیا به دنبال تجهیزات جایگزین و ارزان می باشند.

از سال ۱۹۸۷ تحقیقات جدیدی در ایالات متحده بر روی قیرها انجام شد که این تحقیقات تحت عنوان برنامه تحقیقات استراتژیک بزرگراهی (شارپ) فعالیت خود را آغاز کرد. پس از صرف هزینه های بسیار هنگفت به طبقه بندی جدیدی از قیر دست پیدا کردند. این طبقه بندی جدید که بر اساس عملکرد بود به عنوان جایگزینی مناسب برای روشهای قدیمی معرفی گردید. دانشمندان شارپ به این نتیجه رسیدند که انتخاب قیر با طبقه بندی درجه نفوذ یا ویسکوزیته نمی تواند پاسخگوی شرایط جوی سخت و یا ترافیک شدید جاده ای باشد. در طبقه بندی جدید، متوسط ۷ روز گرمترین روزهای سال و متوسط ۷ روز از سردترین روزهای سال را محاسبه کرده و قیر مناسب را انتخاب می کنند. قیرهای با طبقه بندی عملکردی را با PG نمایش می دهند. به عنوان مثال قیری با PG۶۴-۲۲ یعنی قیری که در ناحیه ای با متوسط ۷ روز گرمترین 64°C و متوسط ۷ روز سردترین 22°C می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که ملاحظه می شود این طبقه بندی به صورت کاملتر و دقیقتری رفتار قیر را مورد ارزیابی قرار می دهد و نتایج حاصله از آن بسیار قابل اعتمادتر می باشد.

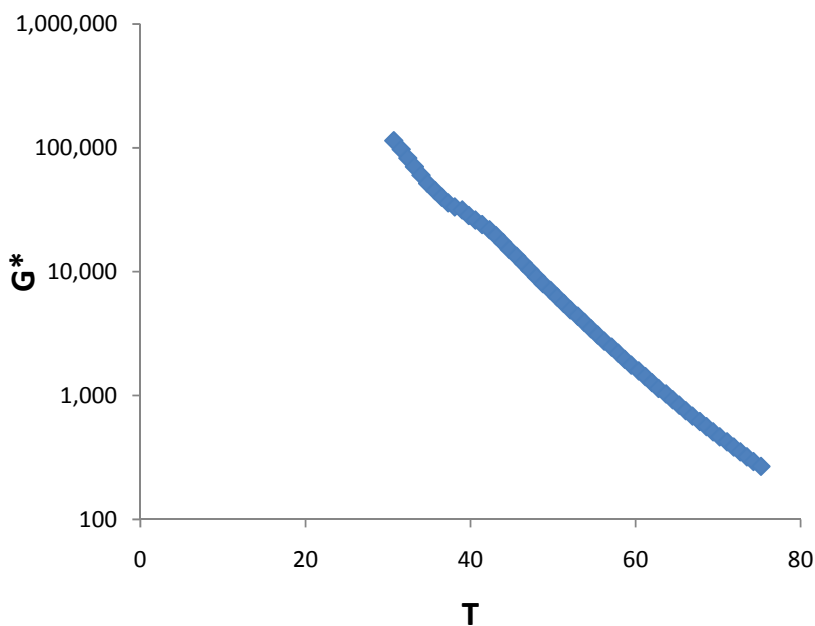
۲-۷-۱- نقش رئولوژی در تست های شارپ

در تست های شارپ که منجر به انتخاب قیر با روش سوپریو (Superpave) می شود بیش از هرچیز بر روی خواص رئولوژی تأکید شده بود. تست های شارپ شامل ویسکوزیته در دمای 135°C ، رئومتر برشی چرخشی، رئومتر تیرچه خمشی و دستگاه کشش مستقیم همگی به نوعی با رئولوژی در ارتباط هستند. البته که شارپ برای بعضی از تست های قدیمی مثل اندازه گیری نقطه اشتعال نیز تأکید داشت اما تأکید عمده آن بر روی تست های مذکور بود.

جهت ارزیابی رفتار قیر در دمای بالا از رئومتر برشی دینامیکی استفاده می شود. این رئومتر در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت می تواند کار کند. این تست در فرکانس ثابت 10rad/s که معیار مناسبی از ترافیک نسبتاً شدید جاده ای است انجام می گیرد. چنانچه قیر را برای منطقه ای با ترافیک بسیار سنگین و یا منطقه ای گرمسیر با عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین یا بار زیاد انتخاب می کنیم باید فرکانس تست را کاهش دهیم و یا بالعکس چنانچه برای منطقه ای با ترافیک کاملاً روان و سرعت بالای خودروها، قیر انتخاب می کنیم طبیعی است که می توانیم فرکانس را افزایش دهیم اما به طور کلی استاندارد، فرکانس 10rad/s را پیشنهاد می دهد.

همانطور که می دانیم رفتار قیر در دمای میانی و بالا مجموعی از رفتار ویسکوز و الاستیک است. تعیین رفتار ویسکوالاستیک قیر لازم است تا پارامترهایی تعیین شوند که اثرات دما و زمان بارگذاری را توأم

در نظر بگیریم. این پارامترها همان مدول مختلط (G^*) و اختلاف فاز (δ) هستند. G^* شامل مجموع دو رفتار ویسکوز و الاستیک می باشد. G^* مقیاسی از پایداری قیر در برابر تغییر شکل است (مدول سختی) و δ نشانه ای از مقادیر نسبی تغییر شکل قابل برگشت و غیر قابل برگشت می باشد. مدول مختلط مجموعی از مدول اتلاف و مدول ذخیره شده می باشد که اولی معیاری از رفتار ویسکوز و دومی معیاری از رفتار الاستیک می باشد. هر دوی این مدول ها با افزایش دما کاهش میابد زیرا ویسکوزیته با افزایش دما کاهش یافته و از طرفی خاصیت الاستیکی قیر نیز به سمت تخریب می رود. لذا با افزایش دما مدول مختلط برای قیرها به شدت کاهش میابد و تغییرات بوجود آمده در قیر در این دماها دائمی می باشد. در نمودار ۲-۷ تغییرات مدول مختلط بر حسب دما برای یک نمونه قیر خالص آورده شده است [۳۴ و ۳۰، ۳۲].



نمودار ۲-۷: نمودار G^* بر حسب دما برای قیر خالص [۱۶]

مدل ماکسول قادر به تعیین مقدار G' (مدول ذخیره سازی) و G'' (مدول اتلاف) و متعاقباً G^* و δ می باشد. مدل N فرآیند relaxation را مورد توجه قرار می دهد. معمولاً N برابر ۲۴ انتخاب می شود. λ_i زمان استراحت و G_i نیروی relaxation می باشد. روابط ماکسول به صورت زیر است:

$$G' = G_e + \sum_{i=1}^N G_i \frac{(w\lambda_i)^2}{1+(w\lambda_i)^2}$$

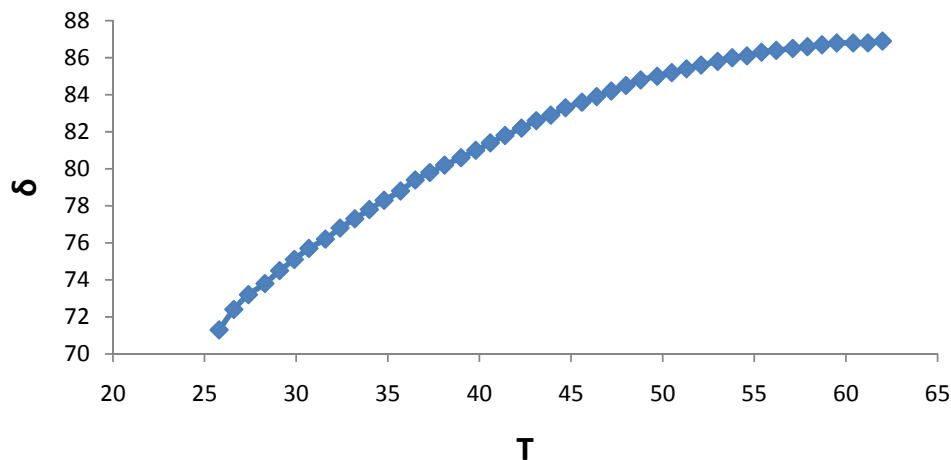
روابط ماکسول

$$G'' = \sum_{i=1}^N G_i \frac{w\lambda_i}{1+(w\lambda_i)^2}$$

و سپس δ و G^* به کمک روابط زیر بدست می آید:

$$\tan \delta = G'' / G' \quad , \quad G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

در دماهای بالا، قیر رفتار کاملاً ویسکوز را دارد و در دماهای پائین رفتار الاستیک را دارد. دو قیر ممکن است دارای G^* ثابتی باشند اما یکی بیشتر ویسکوز و دیگری بیشتر الاستیک باشد بدین سبب لازم است تا δ هم در کنار G^* تعیین گردد. G^* بیانگر نسبت تنش برشی کل بر کرنش برشی کل وارده بر قیر است و δ اختلاف فاز بین تنش برشی و کرنش حاصله می باشد. نمودار ۲-۸ نمونه ای از تغییرات δ را بر حسب دما نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود اختلاف فاز با افزایش دما به دلیل غالب شدن رفتار ویسکوز، افزایش می یابد. سیالات کاملاً نیوتنی دارای اختلاف فاز ۹۰ درجه می باشند. برای قیر خالص نشان داده شده در نمودار ۲-۸ همانطور که ملاحظه می شود در ۶۲°C اختلاف فاز برابر با ۸۶/۹ درجه بوده است که نشان می دهد رفتار ویسکوز کاملاً در حال غلبه بر رفتار الاستیک می باشد و این موضوع در دماهای بالای سرویس اصلاً مطلوب نمی باشد [۱۶، ۳۰، ۳۲ و ۳۴].



نمودار ۲-۸- نمودار δ بر حسب دما برای قیر خالص [۱۶]

قیر مطلوب قیری است که در تمامی محدوده دمایی سرویس، عملکرد یکسانی را داشته باشد یعنی با افزایش دما استحکام خود را حفظ کند و به عبارتی نمودار G^* و همچنین δ برای قیر ایده آل برحسب دما به صورت مسطح و یکنواخت باشد.

جهت در نظر گرفتن همزمان G^* و δ ، شارپ بیان کرد دمایی که نسبت $\frac{G^*}{\sin\delta}$ برابر ۱ Kpa گردد به عنوان حد بالای گرید عملکردی در نظر گرفته می شود. البته جهت تصحیح این دما پیشنهاد کرد که تست بر روی قیرهای پیر شده در RTFO نیز انجام شود و دمایی که نسبت مذکور برابر ۲/۲ Kpa شود را با دمای بدست آمده از بایندر اولیه (Original) مقایسه، و هرکدام که کوچکتر بود به عنوان حد بالای گرید عملکردی (high temperature performance grade) گزارش شود [۳۲ و ۱۰].

از آنجایی که در دماهای پایین رفتار قیر به صورت الاستیک شکننده می باشد لذا انجام تست رئومتر برش دینامیکی نمی تواند موثر واقع شود زیرا که قیر در این دماها کاملاً سفت شده و اجازه نوسان را به دستگاه نمی دهد و در ضمن کرنش بوجود آمده بر اثر اعمال تنش ثابت اینقدر کوچک است که می توان از آن صرف نظر نمود. به همین دلیل شارپ تست رئومتر تیرچه خمشی و در صورت لزوم تست کشش مستقیم را پیشنهاد کرد. بار بسیار کوچکی بر تیرچه قیر اعمال می شود و سختی خزشی برحسب زمان ثبت می گردد. پایین ترین دمایی که سختی خزشی $(s(t))$ کوچکتر از ۳۰۰ Mpa باشد به عنوان حد پایین گرید عملکردی (low temperature performance grade) انتخاب می شود. البته این تست در دماهای بسیار پایین (به عنوان مثال -۱۶°C) صورت می پذیرد و حتماً قبل از این تست نمونه باید در PAV پیر شده

باشد. نمونه هایی که از الاستیسیته کمتری برخوردار باشند در دماهای بالاتری به سختی مورد نظر می رسند که نشان می دهد این قیرها شکننده تر هستند.

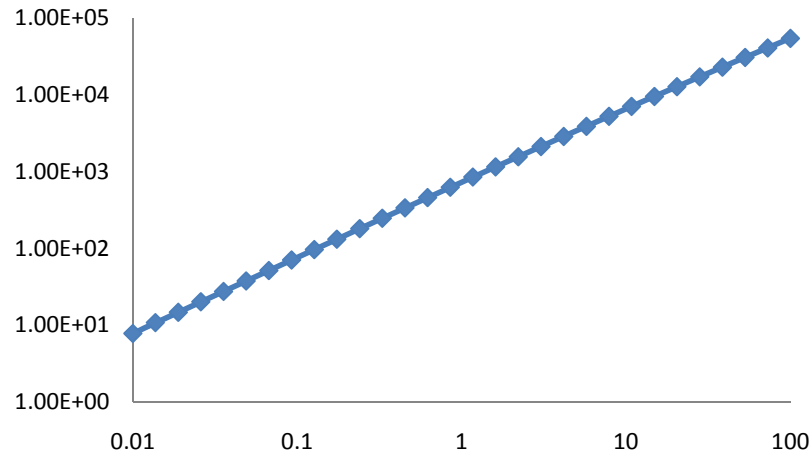
بین سختی خزشی بایندر و مقدار کشیدگی آن قبل از شکستگی ارتباط قوی وجود دارد. قیرهای کشسان، کشیدگی قابل توجهی را قبل از شکستگی تحمل می نمایند (ductile) و قیرهای شکننده بدون کشیدگی زیاد، می شکنند (brittle). ممکن است بایندر از سختی بالایی برخوردار باشد اما کشسان نیز باشد لذا اگر مقدار سختی خزشی بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ MPa باشد و مقدار m (سرعت تغییر در سختی خزشی در مقابل زمان) نیز بالاتر از ۰/۳ باشد، باید آزمایش کشش مستقیم صورت گیرد. خروجی این دستگاه کرنش و تنش شکست می باشد. این کرنش به صورت کرنش کائوچی بیان می گردد. کرنش شکست باید حداقل برابر ۱٪ باشد.

در تعیین خصوصیات روانی بایندر قیری، آزمایش ویسکوزیته مورد استفاده قرار می گیرد تا اطمینان حاصل شود که می تواند در کارخانه پمپ و جابجا گردد. آزمایش در دمای 135°C و بر روی بایندر اصلی صورت می پذیرد. در واقع بررسی می شود که آیا ویسکوزیته قیر به اندازه کافی پایین است که امکان پمپاژ و مخلوط شدن با مصالح دیگر را داشته باشد. طبق گزارشات شارپ، ویسکوزیته دردمای ذکر شده باید کوچکتر از ۳ pa.s باشد [۳۳].

در سالهای اخیر بعد از شناختن کامل تست های شارپ، محققان به ارائه روشهای تجربی و نوینی جهت بررسی رئولوژی قیرها پرداختند. به عنوان مثال تست جاروب فرکانس بود که در این تست مدول مختلط، مدول اتلاف و مدول الاستیک برحسب فرکانس رسم می شوند. فرکانسهای مختلف معیاری از بار ترافیکی جاده ای می باشد. در نمودار ۲-۹ نمونه ای از این نمودارها به نمایش در آمده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش بار ترافیک (کاهش فرکانس)، مدول مختلط یا مقاومت جسم کاهش میابد. لذا دانشمندان متوجه شدند که پارامترهای رئولوژیکی مثل G^* یا G' و G'' با دما و فرکانس و همچنین گشتاور یا کرنش ارتباط دارد، لذا دسته وسیعی از خواص رئولوژیکی با در نظر گرفتن اثر همزمان این پارامترها بر روی قیرهای خالص و اصلاح شده صورت گرفت. در کنار این موارد، ویسکوزیته قیرهای خالص و اصلاح شده در دماهای مختلف مثل 160°C و یا 100°C نیز محاسبه شد تا ویسکوزیته در دماهای بالا جهت اختلاط با مصالح و استحکام قیر محاسبه گردد [۳۱].

هم اکنون بررسی های رئولوژیکی بسیار زیادی بر روی قیرها، خصوصاً قیرهای اصلاح شده پلیمری صورت میگیرد و هدف همگی شبیه سازی شرایطی است که بتواند با شرایط واقعی عملیاتی قیر در آسفالت و به صورت تنها، برابری نماید. تست های شارپ نیز همه ساله رو به تکامل می باشند و پروتکل های جدیدی جهت تکامل موارد قبلی به آن اضافه و یا از آن کم می شود. امید است که در کشور عزیزمان نیز

استانداردهای جدید مورد توجه و بررسی های بیشتری قرار گیرد تا قیرهای مصرفی با درصد اطمینان بیشتری جهت استفاده در راهسازی و یا مصارف دیگر انتخاب گردند.



نمودار ۹-۲: نمودار G^* بر حسب فرکانس برای قیر خالص [۱۶]

۸-۲- افزونه های شاخص در راهسازی

هر ماده ترموپلاستیکی، قیرهای استحاله مستقیم یا ابتدایی، در دماهای پایین ترد و شکننده بوده و به لحاظ نقطه نرمی خود، محدود به سقف نسبتاً پایینی از دمای سرویس می‌باشند. تبدیل تراکمی قیر، بر اثر هوادهی، در درجه حرارت‌هایی حدود 250°C ، منجر به تولید محصولی با خواص لاستیکی بیشتر و تمایل به خزش (creep) کمتر در تحت بار، خواهد شد که از نقاط نرمی بالا و عملکرد دما پایین بهتری برخوردارند، حتی قیرهای دمیده هم، قادر به کسب الاستیسیته صحیح و مناسبی به صورت یک کرنش قابل بازیابی محسوس، پس از تغییر شکل‌های بزرگ نیستند. این خاصیت به این دلیل مورد توجه و نیاز قرار گرفته است که تلفیقی از خواص انعطاف پذیری و مقاومت خستگی با خاصیت مقاومت روندگی (Flow R.) از تقاضای بسیار بالایی برخوردار است. انجام تحقیقات فراوان و کسب تجارب عملی بسیار، خصوصاً در خلال ۳۰ سال گذشته، موجب پیشرفت‌های مهم و گسترده کنونی در استفاده از آمیزه‌های قیر-پلیمر شده است. در حالی که تا پیش از این، از پلی اتیلن، پلی پروپیلن، لاستیک طبیعی و سایر لاستیک‌های سنتزی دیگر، استفاده می‌شد، ولی در حال حاضر لاستیک‌های ترموپلاستیک (TPE) با دامنه کاربرد وسیعتری به کار می‌روند. انواع افزودنی‌های قیر را می‌توان به چهار گروه عمده زیر تقسیم نمود:

الف) لاستیک‌ها

ب) ترموپلاستیک‌ها

ج) ترموست‌ها

د) ترموپلاستیک الاستومرها

۲-۸-۱- لاستیک‌ها

به عقیده بسیاری از متخصصین، تأثیر لاستیک‌ها بر قیر، یک تأثیر فیزیکی است و نه یک تأثیر شیمیایی. مکانیزم اختلاط لاستیک‌ها در قیر، معمولاً شامل توزیع مکانیکی قطعات ریز شده لاستیک در قیر و متعاقباً تورم و ماسیدگی این ذرات (بر اثر جذب مالتن قیر) می‌باشد. البته ابعاد ذرات پخش شده لاستیک، لازم نیست که در حد کلوییدی باشد. اگر لاستیک در مقابل تورم مقاومت زیادی از خود نشان بدهد، برای اختلاط با قیر مناسب نبوده و بی‌اثر می‌باشد، با این حال افزودن مقادیر کافی از آن ممکن است باعث ایجاد خواص لاستیکی در قیر شود ولی این امر به جهت خاصیت پرکنندگی خواهد بود و نه خاصیت تورم آن.

همچنین اگر لاستیکی در قیر قابل حل باشد، برای اختلاط با قیر مناسب نخواهد بود و افزودن مقادیر کافی از آن، به جز افزایش ویسکوزیته قیر، تأثیر چندانی بر جای نخواهد گذاشت. یکی از مشکلات لاستیک‌ها، تخریب یا دی‌پلیمریزه شدن آنها بر اثر حرارت‌های بالا و طولانی مدت است که گاه به لحاظ جرم مولکولی پایین‌تر اجزاء سبک (حاصل از تخریب پلیمر) ویسکوزیته قیر، کمتر نیز می‌شود. غالباً لاستیک‌هایی به قیر افزوده می‌شوند که به صورت متورم در قیر توزیع گردند.

معمولاً لاستیک‌هایی که درصدهای کم آنها، تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر خواص قیر باقی می‌گذارند، در درصدهای بالاتر با قیر سازگار نیستند، مثل لاستیک طبیعی و یا SBR که حداکثر ۵ تا ۱۰٪ در قیر مخلوط می‌شوند.

تا کنون از انواع لاستیک‌های طبیعی و سنتزی برای بهبود خواص قیر استفاده شده است و میزان بهبود ناشی از هر یک بر حسب خواص قابل اندازه‌گیری مخلوط قیر - لاستیک، تعیین و معین شده است. خواصی که معمولاً در کاربرد لاستیک‌ها مورد آزمایش و کاربرد قرار می‌گیرند، عبارتند از: ویسکوزیته، ویسکوالاستیسیته، الاستیسیته، درجه نفوذ (Penetration)، حساسیت به دما، نقطه نرمی، چقرمگی (toughness)، قوام یا استحکام، انعطاف‌پذیری دما پایین، کشش‌پذیری (Ductility) و دمای شکنندگی (Brittle temp).

۲-۸-۱-۱- انواع لاستیک‌های مورد استفاده

الف) لاستیک‌های مستعمل و بازیافتی

در صنعت، این گروه از لاستیک‌ها تحت عناوین Reclaimed R. used R.Scrap, Scrap Rubber و غیره معروف بوده و عمده‌ترین منبع تأمین آنها، لاستیک‌های مستعمل و فرسوده اتومبیل‌هاست. اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته نشان داده‌اند که میان این لاستیک‌ها با سمند قیری، هیچ بر هم کنشی وجود ندارد، چه لاستیک ولکانیزه (Crap R.) باشد و چه دو لکانیزه (Reclaimed R.) مزایای استفاده از لاستیک‌های بازیافتی در اختلاط با قیر:

- علی‌رغم تحمیل هزینه‌های پروسس بیشتر، منافعی همچون افزایش قابل توجه طول عمر راهها، پتانسیل اقتصادی شدن را برای این لاستیک‌ها ایجاد می‌کند، بخصوص اینکه از یک امتیاز بهبود زیست محیطی نیز برخوردارند.

- وجود پایدار کننده‌ها، مواد ضد اکساینده‌ها و سایر ترکیبات، در مخلوط ولکانیزه، باعث افزایش چسبندگی، چقرمگی، دوام و طول عمر در محصول قیری می‌گردند.

- باعث کاهش حساسیت به دما، افزایش ویسکوزیته در دماهای بالاتر و انعطاف‌پذیری در دماهای پایین می‌گردند.

- این لاستیک‌ها را به دو طریق می‌توان به کار برد، هم به صورت اختلاط با قیر و هم به عنوان پرکن (filler) همراه سنگدانه‌ها.

- کشش پذیری (Ductility) بتن‌های آسفالتی حاصله در تست‌های انعطاف پذیری و در فاصله دمایی ۲۰- تا ۲۰°C+ به طور متوسط تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد.

معایب این لاستیک‌ها:

کاربرد این لاستیک‌ها در راهسازی، در درصد‌های بالاتر از ۱٪ کل مخلوط آسفالتی، حجم فضا‌های خالی (voids) را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و از استحکام مارشال آنها می‌کاهد.

- به لحاظ خطر ژله‌ای شدن مخلوط، همیشه باید ویسکوزیته قیر و مخلوط کنترل شوند.

- به جهت چسبندگی زیاد لاستیک‌های دولکانیزه، معمولاً آنها را با سنگ آهک پودر شده اتصال

شیمیایی می دهند [۱۳، ۱۴ و ۸۰].

ب) لاتکس ضایعاتی

لاتکس‌ها در واقع به لاستیک‌هایی گفته می‌شوند که توسط ترکیبات خاصی، به صورت امولسیون در آب پراکنده شده‌اند. کاربرد عمده لاتکس‌ها در صنایع لاستیک سازی است. مسئله دفع ضایعاتی لاتکس، یا یافتن مورد مصرفی برای آنها، همواره مد نظر مسئولین این صنایع بوده است. افزودن این ضایعات لاتکسی به قیر، ضمن اینکه نظر مسئولین فوق را تأمین می‌نماید، تأثیرات مثبتی را نیز بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی باقی می‌گذارند. این افزودنی‌ها ضمن آنکه بسیاری از امتیازات لاستیک‌های بازیافتی را دارا می‌باشند، مخلوط‌های یکنواخت‌تری نیز فراهم می‌کنند.

ج) پلی بوتادین

این نوع لاستیک به صورت مایع به قیر افزوده می‌گردد، افزودن حدود ۲۰ درصد از این لاستیک به قیر، باعث جلوگیری از ترک خوردن قیر حتی تا 30°C - می‌گردد. حلالیت جزئی آن در قیر منجر به یک مخلوط کلوئیدی با اندازه ذرات حدوداً ۱۰mm می‌گردد، که کشش پذیری و چقرمگی قیر را بهبود بخشیده و در مخلوط‌های آسفالتی، مشکل ترک خوردگی را حذف می‌کند.

د) SBR

SBR یا (Styrene-Butadiene Rubber) یک کوپلیمر آماری است که مونومرهای استایرین و بوتادین برحسب درصد اولیه‌شان، به صورت نامنظم در یک رشته پلیمری پیوند یافته‌اند. این لاستیک به جهت وجود مونومرهای ترموپلاستیکی استایرین در لابلای مونومرهای لاستیکی بوتادین، از استحکام خوبی برخوردار است و به همین جهت در صنایع لاستیک سازی کاربرد عمده‌ای دارد. اما متأسفانه این لاستیک تنها به مقدار محدودی در قیر متورم می‌شود و چندان با قیر سازگار نیست. لذا بهبود قابل ملاحظه‌ای را هم نمی‌تواند ایجاد نماید [۳، ۶ و ۵۷].

۲-۸-۲- ترموپلاستیک‌ها

اکثر پلیمرهای ترموپلاستیک، تنها در درصدهای کم و آن هم با محدودی از قیرها، سازگارند، همچنین ترموپلاستیک‌ها قادر به بهبود مقاومت در مقابل عوامل فرساینده نیستند و فقط در صورت انجام واکنش‌های ترموست، به مقاومت قابل توجهی دست می‌یابند. انواع ترموپلاستیک‌های بکار رفته عبارتند از: الف) رزین‌های وینیل ب) رزین‌های آکریلیک و متاکریلیک ج) پلی استایرن د) پلی بوتن و پلی بوتادین ه) رزین کومارون ی) پلی پروپیلن (PP) و پلی اتیلن (PE)

۲-۸-۳- ترموست‌ها

ترموست‌ها به پلیمرهایی گفته می‌شوند که در محیط قیری یا محیط قطرانی و در حضور کاتالیزور مناسب، یک واکنش شیمیایی ترموستینگ با قیر یا قطران انجام و آمیزه‌ای با خواص اصلاح شده پایدار را فراهم می‌کنند.

۲-۸-۴- کوپلیمرها

کوپلیمریزاسیون عبارت از فرآیندی است که طی آن دو یا چند نوع مونومر مختلف بطور همزمان یا به صورت مرحله‌ای، پلیمریزه شده و حاصل آن پلیمری است که از دو یا چند ساختار متفاوت و احیاناً ناسازگار، در طول یک زنجیر واحد، برخوردار است که به نام «کوپلیمر» خوانده می‌شود. لازم به ذکر است که یک کوپلیمر، آلیاژی از دو نوع پلیمر نیست، بلکه پلیمری با دو نوع ساختار است.

۲-۹- پلیمرها

با وجود مقدار زیادی تولیدات پلیمری تنها تعداد محدودی از آنها برای اصلاح خواص قیرها مناسب هستند. پلیمری که برای اصلاح خواص و رفتار قیر استفاده می‌شود باید:

- با قیر سازگار باشد.
- در دمای اختلاط آسفالت تخریب نگردد.
- حساسیت حرارتی قیر را بهبود بخشد.

- به کمک تجهیزات مرسوم اختلاط و پخش مصالح بتوان مراحل آن را اجرا کرد.
- در دمای عادی قابلیت رسیدن به ویسکوزیته لازم برای پوشش دادن را داشته باشند.
- در هنگام انبار کردن و نگهداری و پس از خدمت دهی و وقتی که با قیر مخلوط می شود خواص اولیه خود را حفظ کند.

پلیمرهای متعددی در اصلاح خواص قیر بکار رفته اند و همانند اصلاح کننده های دیگر، پلیمرها نیز دارای مزایا و معایب خاص خود بوده و باید رفتار قیر را به رفتار ایده آل نزدیک کند. پلیمرهای مختلف می تواند در قیر، محلول و یا نامحلول باشند. پارامتر حلالیت، سازگاری فاز قیر - پلیمر را تعیین می کند. با افزایش وزن مولکولی پلیمر، کارایی مخلوط قیر - پلیمر افزایش می یابد، ولی سازگاری فاز قیر - پلیمر کاهش یافته و احتمال جدایی دو فاز افزایش می یابد. علاوه بر این به دلیل پیچیدگی سیستم چند فازی، افزایش پلیمر، ساختار درونی این سیستم پیچیده (سیستم کلونیدی) را بر همزده و باعث رسوب آسفالتن می شود. گذشته از این مسائل و برخی مسایل اقتصادی، برای آنکه یک قیر اصلاح شده با پلیمر بتواند وارد بازار مصرف شود باید شرایط زیر را نیز برآورده سازد:

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

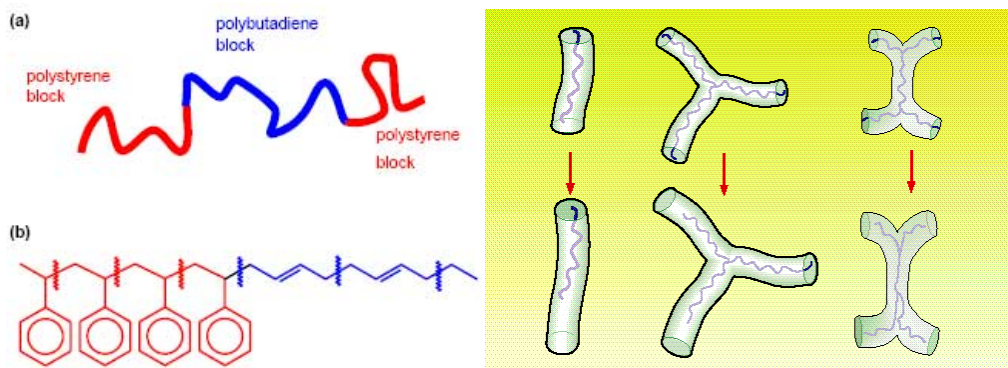
✓ پلیمر در این مدت از لحاظ حرارتی پایدار باشد.

✓ زمان اختلاط طولانی یا دمای اختلاط خیلی بالا لازم نباشد.

تا کنون هیچ پلیمری نتوانسته است تمامی شرایط بالا را برآورده سازد. در طی سال های متمادی کاربرد پلیمر در قیر، فرآیندهای مختلفی بسته به نوع پلیمر برای افزایش پلیمر به قیر ابداع شده است. برای مثال پلیمرهای که از لحاظ حرارتی ناپایدارند سریعاً بعد از اختلاط مصرف می شوند و یا قیر - پلیمرهایی که تمایل شدیدی به جدایی فاز دارند، قبل از اختلاط با مصالح یکسره بهم زده می شوند. در صنعت قیر و راه سازی همیشه ترجیح داده می شود قیر از قبل اصلاح شود و در شکلی که خیلی با قیر معمولی تفاوت نداشته باشد به کارخانه آسفالت سازی تحویل داده شود. این یک مزیت تکنیکی است که در تهیه و ابداع مخلوط های قیر - پلیمر باید در نظر گرفته شود [۲۱،۷ و ۳۰].

پلیمر ها بنا به ساختارشان به خطی و شاخه ای طبقه بندی می شوند. در صورتی که مولکولهای مونومرشان در یک راستای ممتد به یکدیگر متصل شده باشند پلیمرها را خطی گویند. در شرایط واکنش یا با انواع معینی از مونومرها، پلیمر های کاملاً متفاوتی را می توان ایجاد کرد.

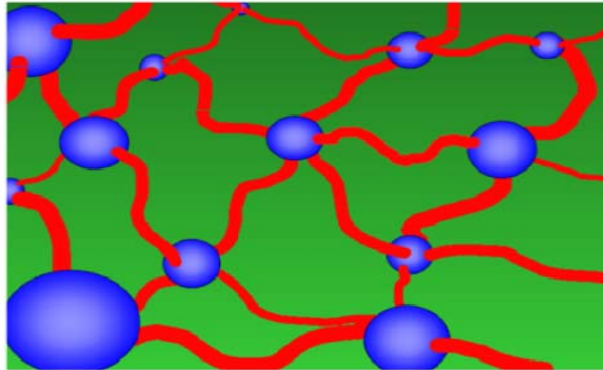
پلیمرهای شاخه ای را اغلب هم به طریق مرحله ای و هم زنجیری می توان سنتز کرد. با وجود این به دلایلی پلیمرهای حاصل از این دو روش کاملاً متفاوت اند. پلیمرهایی را که در آنها شاخه های جانبی مولکولهای مونومر در نقاط مرکزی انشعاب، در طول زنجیر اصلی پلیمر بیرون زده باشند، شاخه ای گوئیم. تفاوت بین شکل مولکولهای پلیمر خطی و شاخه ای را می توان از نمایش ساختاری آنها در شکل ۱-۲ مشاهده نمود. استحکام TPE، بوسیله بلوکهای انتهایی پلی استایرنی (PS) حاصل می شود. اینها هنگامی از استحکام کافی برخوردار خواهند شد که بلوکهای انتهایی پلی استایرنی به اندازه کافی بلند باشند، بنابراین یک حداقلی برای جرم مولکولی بلوکهای انتهایی مورد نیاز است که طبیعتاً به یک جرم مولکولی کل منتهی خواهد شد که در پایین تر از آن نتایج خوبی حاصل نمی گردد. این جرم مولکولی کل، تعیین کننده ویسکوزیته پلیمر و بنابراین ویژگی های فرآیندی آن خواهد بود. اگرچه پلیمرهای شاخه ای از ویسکوزیته پایین تری نسبت به نوع خطی با جرم مولکولی مشابه، برخوردارند، لیکن باید روشن نمود که با در نظر داشتن شرط حداقل لازم برای بلوک انتهایی، کوپلیمرهای شاخه ای و با استحکام، با پایین ترین ویسکوزیته ممکن، از وزن مولکولی بسیار بالاتری برخوردار خواهند بود، و بنابراین فرآیند آنها به سهولت پلیمرهای خطی نیست [۲۱، ۲۲ و ۲۳].



شکل ۱-۲: ترموپلاستیک الاستومرهای خطی و شاخه ای [۲۳]

۲-۹-۱- خصوصیات و ساختمان پلیمر SBS

کوپلیمر استایرن - بوتادین - استایرن یک کوپلیمر سه بلوکه است که در آن بلوک های استایرن به وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده اند. نمونه ای از ساختار SBS را می توان در شکل (۲-۲۲) مشاهده کرد. این کوپلیمرها می توانند خطی یا شعاعی باشند و در قیر یک شبکه الاستیک سه بعدی از فاز پلی استایرن را تشکیل می دهند که به وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل می شوند. در پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن که در قیرهای راهسازی بکار می رود، معمولا استایرن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزن کل این پلیمر را تشکیل می دهد. درصد بیشتر استایرن می تواند باعث ناسازگاری با قیر و اشکالاتی در پخش کردن و ناپایداری انبارداری در دماهای بالا شود [۴].



شکل ۲-۲: ساختار سه بعدی شبکه SBS [۴]

دمای انتقال شیشه (T_g) یکی از اصلی ترین مشخصه های فیزیکی - مکانیکی در پلیمرها می باشد. در این دما حالت فیزیکی پلیمر تغییر می کند و پلیمرها از حالت شیشه ای به حالت نرم تغییر حالت می دهند. ترموپلاستیک الاستومر SBS کوپلیمری است که دارای دو مقدار T_g (درجه حرارت شیشه) می باشد که به روش های مختلف مشخص می گردد. همه این ها نشان دهنده این است که یک نوع کوپلیمر از دو واحد شیمیایی تشکیل شده، اما این دو واحد شیمیایی و پلیمر تشکیل شده با هم خیلی اختلاف دارد. الاستومر BR (بوتادین رابر) دارای T_g در حدود ۹۰- است. پلی استایرن که حالت سخت و شیشه ای دارد دارای T_g در حدود ۱۰۰+ می باشد. در درجه حرارت پایین، پلی استایرن به صورت سخت بوده و قسمت های انتهایی زنجیره را تشکیل می دهد و زنجیره های الاستومری بوتادین را که نرم هستند به یکدیگر نگه می دارد.

استایرن و بوتادین با اجزاء آروماتیک و غیره آروماتیک قیر صنعتی سازگار هستند و این موضوع به برخورد مولکولی قوی بین استایرن - بوتادین - استایرن و قیر صنعتی بر می گردد.

پلیمر مذکور دارای غلظتی حدود ۵-۶ درصد است و وقتی که متورم می شود یک حجم مهمی از قیر صنعتی و آسفالت را اشغال می کند و ممکن است بصورت یک شبکه دائمی در میان قیر آسفالتی قرار گرفته باشد. به دلیل اینکه درجه حرارت شیشه ای پلی استایرن، ۱۰۰+ است، تا زمانی که دمای محیط به این درجه نرسد پلی استایرن سخت است و با افزودن به قیر صنعتی، این بخش های پلی استایرن در تابستان از زیاد نرم شدن آسفالت جلوگیری می کند. با توجه به اینکه درجه حرارت شیشه ای پلی بوتادین (۹۰-) خیلی پایین است، در تابستان نیز این بخش های پلی استایرن هستند که از دو طرف پلی بوتادین را که نرم هستند، گرفته و نگه می دارد و از سیالیت پلیمر و در نتیجه قیر صنعتی جلوگیری می کنند. همچنین پلیمرها در مقابل نفوذ یک سری از عوامل طبیعی و شیمیایی مقاوم هستند و به همین دلیل با افزودن استایرن - بوتادین - استایرن به قیر صنعتی عمر مفید آسفالت را می توان در مقابل باران، برف و ... افزایش داد [۲۷، ۲۸ و ۳۰].

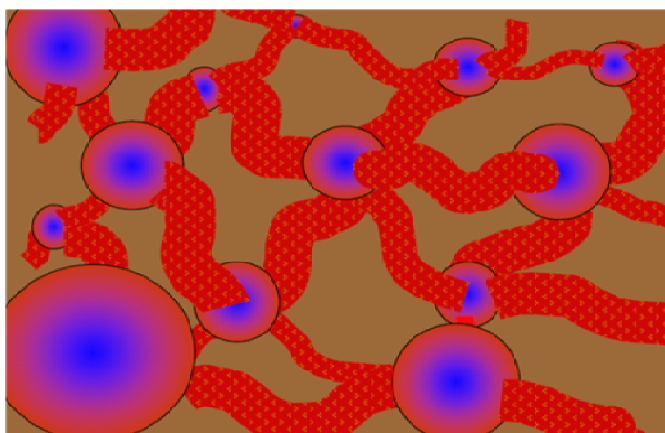
یکی از ویژگی های منحصر به فرد SBS، تورم فراوان آن در معرض مالتن موجود در قیر و تشکیل شبکه ای گسترده در ساختار قیر می باشد، این خاصیت را می توان در شکل (۲-۲۳) مشاهده کرد. این ویژگی علاوه بر این که باعث افزایش مقدار سازگاری این پلیمر با قیر می گردد، توانایی این پلیمر را برای تغییر دادن خواص قیر بیشتر کرده است و باعث می شود قیر اصلاح شده حاصل دارای خواص متفاوت تری با قیر معمولی باشد. اگرچه کوپلیمرهای استایرن - بوتادین بطور گسترده در اصلاح قیر بکار رفته اند، ولی دارای معایب زیر می باشند:

الف - قیمت بالا

ب - افزایش حباب های هوا

ج - تخریب حرارتی

حذف پیوند های دوگانه فاز بوتادین مشکل اکسایش حرارتی این کوپلیمرها را بهبود می بخشد. ولی آنها هنوز خیلی گران هستند. همچنین افزایش حباب های هوا، باعث تخریب زود رس و عمر کوتاهتر پوشش آسفالتی می گردد.



شکل ۲-۳: تورم شاخه های پلی بوتادین SBS با جذب مولفه ای روغنی قیر [۴]

۲-۹-۲- دلایل برگزیده شده شدن SBS

اصولاً تولید و ساخت کوپلیمرهای SBS، در آغاز با هدف اصلاح و بهبود خواص قیر نبوده است. بلکه این پلیمرها، حوزه و زمینه کاربرد بسیار وسیعتری را در برنامه خود داشته و دارند. به دنبال توسعه صنعت کوپلیمریزاسیون و عرضه بلاک کوپلیمرهای SBS، متخصصین امور قیر، که انواع افزودنی‌های معدنی و پلیمری را روی قیر تجربه کرده بودند، خواص ویژه و منحصر به فردی را در پلیمرهای SBS یافتند که آن را به عنوان یک اصلاح کننده بی‌رقیب مطرح ساخت و به زودی رده‌های سازگار با قیر این پلیمر نیز تولید و بکار گرفته شدند. برخی از ویژگی‌های SBS، عبارتند از:

- SBS یک بلاک کوپلیمر است که از دو بلوک با هویت و خواص مستقل و مجزا تشکیل یافته‌اند: بلوک پلی استایرنی به دلیل داشتن گروه‌های حلقوی بنزنی قادر است که با بخش‌های حلقوی قیر بر هم کنش‌هایی را ایجاد کند و در ضمن بلوک پلی بوتادینی (PB) به جهت ساختار خطی خود و نیز باند غیر اشباع، می‌تواند با اجزاء هیدروکربورهای پلی الفینی قیر بر هم کنش نماید.

- SBS پلیمری است که از حدود $T_{gpB} = -85^{\circ}C$ تا $T_{gps} = +100^{\circ}C$ دارای یک مدول تخت و ثابت می‌باشد:

- به جهت T_g پایین پلی بوتادین، این پلیمرها خاصیت لاستیکی خود را تا دماهای بسیار پایینی حفظ می‌نمایند.

- این پلیمرها با درصدهای کمی (۳ الی ۵٪) قادر به تورم در قیر و ایجاد فاز پیوسته می‌باشند.

- مهمترین ویژگی این پلیمرها، اجتماع دو خاصیت ترموپلاستیکی و الاستیکی به طور همزمان در

آنهاست که امکان گرم و سرد کردن‌های مکرر آنها را بدون نیاز به ترموست کردن فراهم آورده است که این امر علاوه بر حل مشکلات فرآیندی در افزودن لاستیک‌ها به قیر، امکان تولید محصولات یکنواخت‌تری را نیز به وجود آورده است.

۲-۱۰-۱- خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی ناشی از ضعف قیر

برای اصلاح مناسب قیر، ابتدا باید برداشت صحیحی از خرابی‌های روسازی که مربوط به ضعف در خواص قیر هستند، به دست آورد. خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی که ناشی از ضعف قیر هستند به طور کامل مشخص هستند. شیار افتادگی، ترک‌های ناشی از خستگی و ترک خوردگی انقباضی ناشی از دمای پایین حالت‌های از خرابی روسازی هستند که محققان مهمترین عامل دخیل در این خرابی‌ها را ویژگی‌های قیر می‌دانند. تاثیر پدیده پیرشدگی بر مقاومت در برابر خرابی‌های ذکر شده در بالا بسیار مهم است. پیرشدگی قیر باعث می‌شود که در همه بازه‌های دمای مقدار G^* افزایش و مقدار δ کاهش یابد. هرچند پیرشدگی قیر می‌تواند خواص قیر را در طول مدت بهره‌برداری تغییر دهد و مقاومت روسازی را در برابر برخی از خرابی‌ها کاهش دهد ولی خود به عنوان یک حالت خرابی برای روسازی‌های آسفالتی مطرح نیست.

علیرغم اینکه خرابی رطوبتی (آبستگی سنگدانه‌ها) یکی از خرابی‌های مهم و اصلی در روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌رود، عامل رخداد آن ضعف در اندک‌کنش میان قیر و سنگدانه‌ها به شمار می‌آید و نمی‌توان این خرابی را تنها به خواص قیر مربوط دانست [۵۲].

۲-۱۰-۱- شیار افتادگی

تاثیر مشخصات قیر در خرابی شیارشدگی مورد بررسی‌های فراوانی قرار گرفته است. از آنجا که دلیل رخداد خرابی شیارشدگی (گود افتادگی) تجمع تغییر شکل‌های دائمی بارهای تکرار شونده ناشی از ترافیک است، می‌توان طی یک فرض ساده سازی آن را تنها مربوط به تغییر شکل‌های لایه رویه دانست. شیار افتادگی را می‌توان یک پدیده ناشی از بارگذاری تکرار شونده و با تنش ثابت تلقی کرد. در هر دوره بارگذاری، یک مقدار ثابتی از کار انجام گرفته باعث تغییر شکل می‌گردد. مقداری از این کار انجام گرفته توسط بازگشت الاستیک لایه رویه پس زده می‌شود در حالی که بخش دیگر توسط انجام دادن تغییر شکل دائمی و ایجاد حرارت به هدر می‌رود.

برای کاهش دادن خرابی شیار افتادگی باید تا حد امکان مقدار کار هدر رفته را کاهش داد. برای یک ماده ویسکوالاستیک مقدار کار هدر رفته در قیر (W_c) بر مبنای تنش (σ) و کرنش (ϵ) به صورت زیر بیان می شود .

$$W_c = \pi \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \text{Sin} \delta \quad (\text{رابطه ۲-۲})$$

که در آن δ زاویه تاخیر فاز است.

از طرفی چون گفته شد که می توان در این پدیده سطح تنش ها را ثابت در نظر گرفت، رابطه (۲-۸) را به صورت زیر باز نویسی می کنیم.

$$W_c = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon \cdot \text{Sin} \delta \quad (\text{رابطه ۲-۳})$$

که در آن σ_0 مقدار تنش ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین می توان کرنش را به صورت تابعی از تنش به صورت زیر نوشت:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{G^*} \quad (\text{رابطه ۲-۴})$$

با جایگذاری رابطه (۲-۴) در رابطه (۲-۳) می توان نوشت:

$$W_c = \pi \cdot \sigma_0^2 \cdot \left(\frac{1}{G^* / \text{Sin} \delta} \right) \quad (\text{رابطه ۲-۵})$$

رابطه فوق مشخص می کند که کار هدر رفته در هر دوره بارگذاری، در تناسب معکوس با پارامتر G^* $\text{Sin} \delta$ قرار دارد. از این رو این پارامتر از طرف موسسه SHRP به عنوان شاخصی برای مقاومت در برابر پدیده شیار افتادگی انتخاب شده است. این پارامتر هم دارای مشخصه مقاومت کلی در برابر تغییر شکل (G^*) است و هم دارای مشخصه ایست که مقدار پلاستیک بودن ماده را بیان می کند که عبارت است از $\text{Sin} \delta$ و در واقع بیانگر نسبت مدول پلاستیک (G'') به مدول پیچش (G^*) است. از آنجا که پارامتر پلاستیک (G'') بیانگر مقدار کار هدر رفته در سیکل بارگذاری است پس می توان $\text{Sin} \delta$ را هم به عنوان نسبت تغییر شکل های ماندگار به کل تغییر شکل در هر دوره بارگذاری دانست.

از آنجا که هر دو پارامتر G^* و $\text{Sin}\delta$ از ویژگی های ذاتی قیر به شمار می آیند، بنابراین مقدار آنها تابعی از دما و فرکانس بارگذاری می باشد، پس برای بررسی خرابی های روسازی باید قیر را در شرایط دمایی و ترافیکی محل مورد استفاده مورد آزمایش قرار داد [۵۲].



شکل ۲-۴: خرابی شیارافتادگی در مسیر راه [۵۲]

۲-۱۰-۲- ترک های ناشی از خستگی

در دما های متوسط، مهمترین خرابی روسازی، خرابی ناشی از خستگی است. این پدیده را می توان هم به صورت یک پدیده تحت تنش ثابت (برای لایه های ضخیم) و هم یک پدیده تحت کرنش های ثابت (برای لایه های نازک) در نظر گرفت. از آنجا که پدیده خستگی هنگامی دارای تاثیر گذاری بیشتری است که روسازی آسفالتی نازک به حساب می آید، بنابراین در بررسی ها می توان پدیده خستگی را به عنوان یک پدیده با سطح کرنش ثابت مورد مطالعه قرارداد.

با مطالب ذکر شده می توان مقدار کار هدر رفته در دوره های بارگذاری را به صورت رابطه زیر نشان

داد:

$$W_c = \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_0 \cdot \text{Sin} \delta \quad (\text{رابطه ۶-۲})$$

که در این رابطه، ε_0 بزرگی کرنش ثابت موجود می باشد و با رابطه زیر با تنش در ارتباط است:

$$\sigma = \varepsilon_0 \times G^* \quad (\text{رابطه ۷-۲})$$

با جایگزین کردن رابطه ی (۷-۲) در رابطه (۶-۲) خواهیم داشت:

$$W_c = \pi \cdot \varepsilon_0^2 \cdot (G^* \times \text{Sin} \delta) \quad (\text{رابطه ۸-۲})$$

کار هدر رفته در هر دوره بارگذاری می توان به صورت یکی از چند حالت زیر باشد: ترک خوردگی، گسترش ترک، گرمای آزاد شده و یا جریان پلاستیک. هر چند در اینجا به نظر می رسد که تلف شدن کار انجام گرفته به صورت گرمای آزاد شده و جریان پلاستیک بهتر هستند ولی در واقع این حالت ها باعث به وقوع پیوستن دیگر خرابی ها مانند شیار افتادگی می شوند. برای کاستن از میزان ترک خوردگی و یا گسترش آن بهترین رویکرد کاهش دادن مقدار پارامتر $G^* \cdot \text{Sin} \delta$ است. بنابراین می توان گفت که هر چه لایه آسفالتی نرم تر و الاستیک تر باشد، مقاومت آن در برابر پدیده خستگی بیشتر خواهد بود [۵۲].



شکل ۲-۵: ترک خستگی در مسیر راه [۵۲]

۲-۱۰-۳- ترک های حرارتی (ترک های ناشی از دمای پایین)

ترک خوردگی حرارتی نتیجه تنش هایی است که در لایه روسازی به دلیل انقباض ناشی از سرد شدن محیط ایجاد می گردد. علیرغم اینکه به نظر می آید ترک خوردگی حرارتی در مناطق با آب و هوای معتدل و به دلیل کاهش سریع دما بیشتر به وقوع می افتد ولی این خرابی رایج ترین حالت خرابی در مناطق با آب و هوای سرد به حساب می آید.

تنش های به وجود آمده در این حالت به دلیل کاهش حجم لایه آسفالتی و اصطکاک آن با لایه های پایین تر است که هم به دلیل دمای نسبتا بالاتر و هم به دلیل ضریب انقباض حرارتی پایین تر، کاهش حجم بسیار کمتری در مقایسه با لایه آسفالتی از خود نشان می دهند. چنانچه این تنش ها در لایه آسفالتی نتوانند به کمک جریان یافتن ماده ی تشکیل دهنده (که عمدتا قیر است) آزاد شوند، باعث وقوع ترک خوردگی در لایه آسفالتی خواهد شد. به طور سنتی، ترک خوردگی حرارتی، تنها با پارامتر سختی قیر در ارتباط است. هر چند سختی قیر نقش بسیار مهمی در مقدار تنش های بوجود آمده دارد ولی بیانگر توانایی قیر در جریان یافتن و آزاد کردن این تنش ها نیست.

با اندازه گیری سختی قیر $S(t)$ ، و تعیین نرخ لگاریتمی خزش قیر $m(t)$ ، توسط آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) در دماهای بسیار پایین عملکرد روسازی، می توان به استعداد روسازی برای ایجاد تنش حرارتی پی برد و نیز توانایی آن را در آزاد کردن تنش ها مشخص نمود.

مقدار بیشتر $S(t)$ (سختی قیر)، باعث ایجاد تنش های حرارتی و مقدار بیشتر $m(t)$ (نرخ لگاریتمی خزش) بیانگر توانایی بیشتر روسازی در آزاد کردن تنش های حرارتی ایجاد شده است. بنابراین مقدار کمتر سختی و مقدار بالاتر نرخ خزش ویژگی هایی مطلوب برای یک قیر برای مقابله با ترک خوردگی حرارتی هستند.

یک عامل دیگر که در شکل گیری ترک های حرارتی تاثیر دارد، پدیده نسبتاً تازه کشف شده ی سخت شدگی فیزیکی است. سخت شدگی فیزیکی به پدیده ای گفته می شود که طی آن در دماهای پایین، سختی قیر افزایش و نرخ خزش قیر کاهش می یابد. این پدیده به عنوان یکی از عوارض مرتبط با زمان انقباض قیر به حساب می آید. این پدیده به شدت به ساختار شیمیایی و آرایش مولکولی قیر وابسته است. از آنجا که برای بسیاری از مواد، خواص قبل از گسیختگی لزوماً معیار مناسبی برای بررسی خصوصیات گسیختگی نیستند، در رابطه با پدیده خزش آزمایشی به نام آزمایش کشش مستقیم هم مورد استفاد قرار گرفته است که یک آزمایش برای بررسی مقدار واقعی مقاومت در لحظه گسیختگی است. البته قیر های معمولی تقریباً دارای مشخصات لحظه گسیختگی بسیار مرتبط با مقدار سختی در دمای پایین هستند ولی برای بسیاری از قیر ها اصلاح شده چنین ارتباطی را به سختی می توان برقرار کرد. از آنجا که هدف نهایی اصلاح قیر، بهبود کارکرد مخلوط آسفالتی است یکی از مسائل مهم، ارزیابی ارتباط میان اصلاح قیر و مقدار اصلاح بوجود آمده در مخلوط می باشد. البته نباید فراموش کرد که مقدار این ارتباط (میان بهبود خواص قیر و بهبود خواص مخلوط های آسفالتی) بستگی فراوانی به سنگدانه های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی دارد. این ارتباط هم به نوع سنگدانه ها (گرد گوشه بودن یا تیز گوشه بودن دانه ها) و هم به دانه بندی سنگدانه ها بستگی دارد [۵۲].



شکل ۲-۶: ترک حرارتی در مسیر راه [۵۲]

فصل سوم:
مروری بر ادبیات
موضوع

مقدمه

اصلاح‌کننده‌های قیر بیش از ۶۰ سال است که در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما در دو دهه گذشته یک علاقه مضاعفی به استفاده از اصلاح‌کننده‌ها بوجود آمده است. این رویکرد مجدد به عوامل متعددی به شرح زیر بر می‌گردد [۹]:

افزایش حجم ترافیک بار محوری و میزان بار و فشار لاستیک‌ها مخصوصاً در سال‌های اخیر منجر به وقوع شیارافتادگی زودرس در مسیر چرخ‌ها در روسازی‌های آسفالتی شده است [۵۲]. سیستم طبقه بندی و انتخاب قیر بر اساس روش سوپریپو نیز یکی از دلایل افزایش استفاده از قیرهای اصلاح شده است. زیرا که بر اساس این روش قیرها هم باید محدودیت‌های سختی مورد نیاز را در دماهای بالا رعایت کنند و هم دمای خدمت پایین روسازی را به نحوی ارضاء کنند. اکثر قیرهای خالص قادر به تأمین این دو نیاز به صورت توأمان در مناطق با شرایط سخت آب و هوایی نیستند. به طور کلی محدوده دمای سرویس قیرها بسیار محدود می‌باشد و لذا شیارافتادگی در دمای بالا و شکست حرارتی در دمای پایین سرویس، استفاده از قیرها را تحت الشعاع قرار داده است. فشارهای اقتصادی و زیست‌محیطی در خصوص استفاده مجدد از مواد زائد و آلاینده‌های محیط زیست و پس‌ماندها و فرآورده‌های جنبی کارخانجات صنعتی (لاستیک‌ها، شیشه، گوگرد، خاکستر و ...) در صنعت راهسازی نیز یکی از دلایلی است که افزایش استفاده از قیرهای اصلاح شده را موجب گردیده است.

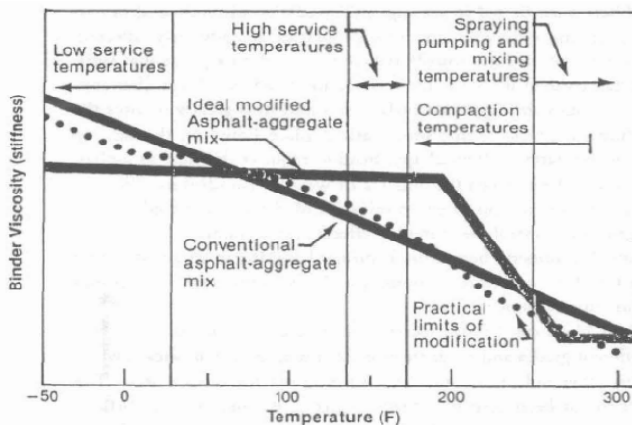
همچنین تمایل شرکت‌های دولتی به پرداخت هزینه اولیه بیشتر در ساخت راه‌ها و دریافت عمر خدمت‌رسانی طولانی‌تر که منجر به کاهش احتمال وقوع خرابی‌های زودرس روسازی می‌شود، می‌تواند یکی از دلایل استفاده از قیرهای اصلاح شده با کیفیتی بالاتر نسبت به قیرهای خالص باشد. البته این مطلب در کشورهای اروپایی صادق بوده و به همین جهت نیز در این کشورها قیرهای اصلاح شده مورد استفاده بیشتری قرار می‌گیرند. زیرا در اروپا شرکت‌ها موظفند که سطح کیفیت خاصی را تا دوره زمانی خاصی تأمین کنند، در حالی که در آمریکا معمولاً کم کردن هزینه اولیه مورد نظر است.

فرآیند اصلاح قیر چندین هدف را می‌تواند دنبال کند. یکی از این اهداف بهبود کارایی قیر از طریق افزایش دامنه عملکرد قیر در دماهای بالا و پایین است. همچنین اصلاح قیر می‌تواند در جهت بهبود یکی از انواع شرایط خدمت‌دهی روسازی موردنظر صورت گیرد. برای مثال روسازی‌هایی که تحت بارگذاری از نوع سنگین و کند قرار دارند و یا روسازی‌هایی که در معرض حجم بار ترافیک بسیار بالایی قرار داشته باشند، هر کدام می‌توانند نوع خاصی از اصلاح قیر را به منظور افزایش کیفیت و کارایی روسازی به خود

پذیرا شوند [۵۲]. در حالت کلی یک یا چند مورد از نتایج زیر را می‌توان از اصلاح قیر انتظار داشت:

- ۱- تهیه مخلوطی سفت‌تر در دماهای بالای روسازی به منظور کاهش شیارشدگی
- ۲- تهیه مخلوطی نرم‌تر در دماهای پایین روسازی برای کاهش ترک‌های حرارتی غیرمرتبط با بار.
- ۳- تهیه مخلوطی نرم‌تر (یا گرانی‌تر) در دماهای بالای ساخت به منظور پمپ شدن بهتر و اختلاط و تراکم راحت‌تر.
- ۴- بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خستگی.
- ۵- بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه به منظور کاهش حساسیت رطوبتی و عربان‌شدگی مخلوط.
- ۶- افزایش ضخامت لایه قیر روی سنگدانه به منظور بهبود دوام مخلوط.
- ۷- کاهش روزدگی قیر.
- ۸- افزایش مقاومت در برابر هوازدگی و پیرشدگی.
- ۹- کاهش هزینه‌های دوره عمر روسازی آسفالتی.
- ۱۰- بهبود عملکرد کلی روسازی آسفالتی.

شکل ۱-۳ مشخصات قیر ایده‌آل را در کنار مشخصات قیرهای رایج به تصویر کشیده است که این مشخصات با موارد گفته شده فوق نیز منطبق است. رسیدن به یک منحنی مسطحه از اهداف اصلاح قیر به شمار می‌آید.



شکل ۱-۳: مشخصات قیر ایده‌آل و مشخصات قیرهای رایج در دماهای مختلف عملکردی [۵۲]

همانطور که ملاحظه می شود ویسکوزیته قیرها با افزایش دما، کاهش میابد لذا قیر خالص در دماهای بالای سرویس دارای ویسکوزیته پایین بوده و پدیده ای مثل شیارافتادگی را در قیر موجب می شود. از طرف دیگر ویسکوزیته قیرهای خالص در دمای پایین سرویس، زیاد است که موجب کراکینگ حرارتی و رفتار شکننده در این قیرها می شود. اما قیر ایده آل در دماهای پایین سرویس دارای ویسکوزیته پایین تری بوده که نشان از نرمی و انعطاف بیشتر در دماهای پایین می باشد و از طرف دیگر در دماهای بالای سرویس نیز دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به قیر پایه می باشد، لذا از استحکام بالاتری بهره مند بوده و شیارافتادگی در آن کمتر مشاهده می شود. قیر ایده آل باید ویسکوزیته پایینی را در دماهای اختلاط و میکس شدن با مصالح داشته باشد تا عملیات اختلاط، پمپ کردن و کوبیدن با مشکل روبرو نشود [۹].

امروزه برآورد دقیقی از میزان مصرف قیرهای اصلاح شده، حتی در ایالات متحده نیز وجود ندارد. ولی تخمین زده می شود که این رقم به ۱۵٪ کل قیرهای مورد استفاده در این کشور برسد و انتظار می رود که این مقدار در آینده نیز شدیداً افزایش یابد. هزینه تولید هر تن قیر اصلاح شده در این کشور، بسته به نوع اصلاح انجام شده، حدود ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ بیشتر از قیرهای اصلاح نشده است که این امر موجب افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی قیمت آسفالت در این کشور شده است. در شرایطی که قیرهای اصلاح شده به حد کافی بهبود عملکرد قیر را در پی داشته باشند، این افزایش قیمت می تواند مقرون به صرفه باشد [۵۲].

طیف وسیعی از مواد گوناگون به عنوان اصلاح کننده های قیر مورد استفاده قرار می گیرند. جدول ۶-۱ یک طبقه بندی از انواع اصلاح کننده ها را به تصویر کشیده است. الاستومرهای استایرن-بوتادین رابر و نیز کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) از انواع بسیار رایج در این مورد هستند. پلاستومرهایی چون پلی اتیلن و اتیلن وینیل استات و همچنین موادی چون آهک هیدراته، گوگرد، گیلسونیت، و پودر لاستیک نیز در گروه اصلاح کننده ها قرار دارند. همچنین فرآیندهایی که روی قیر خالص انجام می گردد مانند دمیدن هوا (اکسید کردن) و تقطیر با بخار آب نیز نمونه های خوبی از اصلاح قیر به شمار می روند [۵۲].

تحقیقات مختلفی که در سالیان متمادی بر روی قیرهای اصلاح شده و مخلوط آسفالتی ساخته شده با این قیرها انجام شد، بهبود مشخصات مهندسی گوناگون قیر و مخلوط آسفالتی مانند عملکرد دمای پایین، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر شیارشدگی، مقاومت کششی، و سایر مشخصات قیرها و مخلوط های اصلاح شده را نشان داده اند که در بخش بعد اشاره ای به برخی تحقیقات انجام شده در این موارد خواهد شد.

Modifier Type	Class	Effect on Distress				
		PD ^a	FC ^b	LTC ^c	MD ^d	AG ^e
Fillers	Carbon black	x				x
	Mineral: Hydrated lime	x				x
	Fly ash	x				
	Portland cement	x				
	Baghouse fines	x				
Extenders	Sulphur	x	x	x		
	Wood lignin				x	
Polymers - Elastomers	Styrene butadiene di-block SB	x		x	x	
	Styrene butadiene triblock/radial block (SBS)	x	x	x		
	Styrene isoprene (SIS)	x				
	Styrene ethylbutylene (SEBS)					
	Styrene butadiene rubber latex SBR	x		x		
	Polychloroprene latex	x	x			
	Natural rubber	x				
	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	x				
Polymers - Plastomers	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
	Polypropylene	x				
Crumb rubber	Different sizes, treatments, and processes	x	x	x		
Oxidants	Manganese compounds	x				
Hydrocarbons	Aromatics			x		
	Napthenics					
	Paraffinics/wax			x		
	Vacuum gas oil			x		
	Asphaltenes: ROSE process resins	x				
	SDA asphaltenes	x				
	Asphaltenes: DEMEX asphaltenes	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
	Natural asphalts: Trinidad	x	x	x	x	
	Gilsonite	x			x	
Antistrips	Amines: Amidoamines				x	
	Polyamines				x	
	Polyamides				x	
	Hydrated lime				x	
	Organo-metallics				x	
Process-based	Air blowing					
	Steam distillation					
	Propane de-asphalted (PPA)					
Fibers	Polypropylene	x	x	x		
	Polyester	x		x		
	Fiberglass					
	Steel	x	x	x		
	Reinforcement	x	x	x		
	Natural: Cellulose	x				
	Mineral	x				
Antioxidants	Carbamates: Lead			x		x
	Zinc			x		x
	Carbon black	x				x
	Calcium salts					x
	Hydrated lime				x	x
	Phenols					x
	Amines				x	x
^a Permanent deformation		^d Moisture damage				
^b Fatigue cracking		^e Oxidative aging				
^c Low-temperature cracking						

شکل ۲-۳: انواع اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده در مصارف گوناگون [۵۲]

۳-۱- تاریخچه

فرآیند اصلاح آسفالت توسط پلیمرهای طبیعی و سنتز شده از سال ۱۹۴۳ آغاز شد. این موضوع از سال ۱۹۳۰ در اروپا مطرح گردید و لاتکس نئوپرن در سال ۱۹۵۰ در آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفت. در اواخر دهه ی ۱۹۷۰، اروپایی ها در استفاده از قیرهای اصلاح شده از آمریکایی ها پیشی گرفتند زیرا پیمانکارهای اروپایی کاهش هزینه های کلی استفاده از این قیرها را علیرغم بالاتر بودن قیمت اولیه آنها، تضمین می کردند. در حالی که قیمت اولیه نسبتاً بالای قیر اصلاح شده توسط پلیمرها، استفاده از آن را در آمریکا محدود کرده بود. در اواسط دهه ۱۹۸۰ پلیمرهای بیشتری گسترش یافتند و تکنولوژی اروپایی ها به آمریکا نیز گسترش یافت. در همان زمان در کشورهای مختلف، دیدگاه اقتصادی بلند مدت به این قضیه رواج پیدا کرد. کشورهای مختلف با مقایسه قیمت اولیه قیرهای اصلاح شده توسط پلیمرها و مدت زمان و هزینه سیکل عمر مفید آنها، به تصمیم گیری در خصوص استفاده از این قیرها پرداختند.

در سال ۱۹۹۷ در آمریکا علاقه و انگیزش برای استفاده از قیرهای اصلاح شده توسط پلیمرها بیش از پیش گردید. تیم های مختلفی نیز در سراسر جهان به بررسی مزیت های استفاده از پلیمرها در قیر پرداخته و در این راستا تست های متعددی برای بررسی عملکرد بایندر اصلاح شده، به وجود آمد.

در سال ۲۰۰۱ دپارتمان حمل و نقل Ohio، با مقایسه مقاومت در برابر شیارشدگی قیرهای اصلاح شده توسط پلیمرها و قیر پایه، متوجه شدند که بایندر اصلاح شده دارای مقاومت بالاتر در برابر شیارشدگی و فرسودگی می باشد.

در سال ۲۰۰۳ مطالعات Nevada بر روی ویسکوزیته صورت گرفت و نتیجه آن شد که علیرغم تغییر نسبتاً اندک درجه نفوذ، ویسکوزیته قیر اصلاح شده در دمای 60°C به طور چشمگیری بیش از قیر پایه می باشد. در همان سال، Newcomb بر روی فرسودگی قیرهای اصلاح شده تحقیقاتی را انجام داد و در نهایت ادعا کرد که افزایش مقداری پلیمر می تواند فرسودگی را تا حد زیادی محدود کند.

در همان سال ۲۰۰۳ مطالعات مهندسی ارتش آمریکا به این موضوع اشاره داشت که قیر اصلاح شده مطلوب باید دارای مقاومت مناسب در برابر شیارشدگی، فرسودگی، کراکینگ حرارتی و آسیب ناشی از آب باشد. تحقیقات آنها منجر به استفاده از پلیمر با اتصالات عرضی استایرن-بوتادی ان فعال- شده گردید [۵۴].

تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد و هدف ارائه راه حلی مناسب می باشد که علاوه بر اصلاح خواص قیر در حد مطلوب، از توجیه اقتصادی بالایی نیز برخوردار باشد. در سال های اخیر استفاده از ضایعات پلیمری به دلیل ارزان بودن آنها، رواج یافته است.

به طور کلی به دو طریق می توان پلیمر و قیر را با یکدیگر مخلوط نمود:

۱- فرآیند خشک

۲- فرآیند مرطوب

در فرآیند خشک، پلیمر را به مخلوط آسفالتی اضافه می کنند یعنی با پلیمر مانند یکی از اجزاء مخلوط آسفالتی برخورد می شود. اما در فرآیند مرطوب، ابتدا قیر را با پلیمر در دمای بالا مخلوط می کنند و سپس آلیاژ حاصله را به مخلوط آسفالتی می افزایند. ما بیشتر بر روش مرطوب تأکید می کنیم زیرا اختلاط قیر و پلیمر نیازمند شرایط خاصی است که مهیا کردن این شرایط در مخلوط آسفالتی شاید چندان ساده نباشد.

۲-۳- پژوهش های صورت گرفته در خارج کشور

مطالعات بسیار زیادی بر روی قیرهای اصلاح شده صورت گرفته است. در ادامه به تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی قیرهای اصلاح شده به خصوص قیرهای اصلاح شده پلیمری اشاره می شود.

۳-۲-۱- تحقیق سنگوز و ایسیکیاکار

در تحقیق انجام گرفته توسط سنگوز و ایسیکیاکار یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی قیر حاوی کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) انجام گرفت. کوپلیمر SBS در مجموعه افزودنی های قیر در گروه الاستومرها قرار دارد که خاصیت الاستیک قیر را افزایش می دهند و از جمله مناسب ترین و پر استفاده ترین پلیمرهای افزودنی قیر به شمار می رود. بلاک های انتهایی پلی استایرن بخش استحکام این ترکیب و بلاک لاستیکی پلی بوتادین در واقع تأمین کننده الاستیسیته منحصر به فرد این ماده است. خواص این کوپلیمر به سرعت در دمای بالاتر از دمای Glass Transition (حدود 100°C) پلی استایرن از بین می رود، ولی با برگشت به زیر این دما دوباره خصوصیات الاستیسیته و استحکام خود را باز می یابد. SBS معمولاً به صورت قرص یا پودر تولید می شود که می تواند آن را به میزان و درصد مناسب با استفاده از میکسرهای با برش بالا یا پایین در قیر حل نمود. در این پژوهش قیر با درجه نفوذ ۵۰/۷۰ با درصد های مختلف SBS (۵ درصد) ترکیب شد. SBS مورد استفاده، با نام Kraton D-۱۱۰۱ ساخت شرکت Shell بوده که یک پلیمر SBS خطی است که دارای ۳۱ درصد پلی استایرن می باشد. در جدول ۳-۲ نیز مشخصات قیر مورد استفاده نشان داده می شود. برای ساخت مخلوط آسفالتی نیز از مصالح سنگی آهکی استفاده شد.

جدول ۱-۳ : مشخصات قیر پایه مورد استفاده [۵۵]

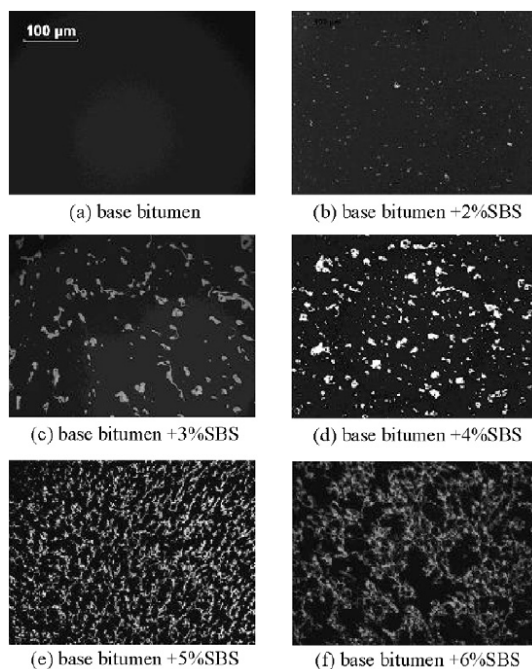
Test	Specification	Results	Specification limits
Penetration (25 °C; 0.1 mm)	ASTM D5 EN 1426	63	50-70
Softening point (°C)	ASTM D36 EN 1427	49	46-54
Viscosity at (135 °C)-Pa.s	ASTM D4402	0.51	-
Thin film oven test (TFOT) (163 °C, 5 h)	ASTM D1754 EN 12607-1		
Change of mass (%)		0.07	0.5 (max.)
Retained penetration (%)	ASTM D5 EN 1426	51	50 (min.)
Softening point after TFOT (°C)	ASTM D36 EN 1427	51	48 (min.)
Ductility (25 °C) (cm)	ASTM D113	100	-
Specific gravity	ASTM D70	1.030	-
Flash point (°C)	ASTM D92 EN 22592	+260	230 (min.)

ساخت PMB به روش صنعتی در دستگاهی با قابلیت تولید ۲۰ تن قیر پلیمری در ساعت و به صورت مخلوط با برش بالا انجام شد. درصد پلیمر بکار رفته از ۲ تا ۶ درصد (با بازه ۱ درصد) متغیر بوده است. آزمایش‌های انجام شده بر PMB شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO)، درجه نفوذ و نقطه نرمی پس از RTFO و آزمایش پایداری نگهداری PMB می‌باشد. لازم به ذکر است که تست پایداری نگهداری بر روی PMB در محفظه استوانه‌ای (۳۲ میلیمتر قطر و ۱۶۰ میلیمتر ارتفاع) در دمای ۱۶۳ درجه پس از ۴۸ ساعت انجام شد. شاخص PI نیز برای PMB محاسبه گردید. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۳-۳ آمده است. افت شدید درجه نفوذ به ازاء ۳ درصد SBS و افزایش قابل توجه نقطه نرمی به ازاء درصد پلیمر ۵ درصد از موارد شاخص در این جدول است. همچنین کاهش حساسیت حرارتی PMB (معادل با افزایش PI) با افزایش درصد پلیمر نیز در این جدول به خوبی مشاهده می‌گردد.

جدول ۲-۳ : خصوصیات قیرهای پلیمری در آزمایش‌های کلاسیک [۵۵]

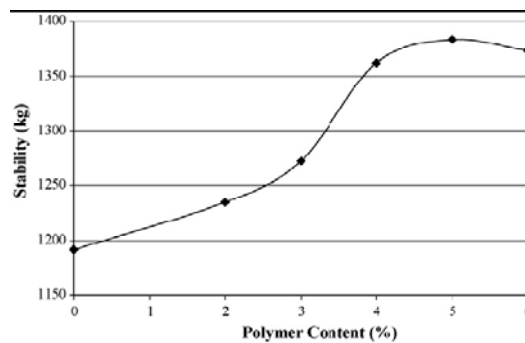
Property	SBS content (%)						Specification limits
	0	2	3	4	5	6	
Penetration (1/10 mm)	63	61	51	49	48	48	20 (min.)
Softening point (°C)	49	50	54	57	67	69	65-75
Penetration index (PI)	-0.92	-0.73	-0.16	0.35	2.18	2.46	-
Change of mass (%)	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	1 (max.)
Retained penetration after TFOT (%)	51	41	31	24	21	21	40 (max.)
Softening point difference after TFOT (°C)	2	4	4	2	3	2	7 (max.)
Storage stability (°C)	-	3	3	2	3	2	4 (max.)
Brookfield viscosity 135 °C (η) (Pa.s)	0.51	0.55	0.62	0.76	1.20	1.50	
Modification indice (η_{PMB}/η_{base})	1	1.08	1.22	1.49	2.35	2.94	

مورفولوژی (اندرکنش قیر و پلیمر در مقیاس بسیار کوچک) و درصد توزیع SBS در مخلوط‌ها با استفاده از میکروسکوپی فلورسنت (در دمای محیط و درشت‌نمایی $100\times$) و برنامه تحلیل عکس Qwin Plus برای تک‌تک PMB‌های ساخته شده انجام گرفت. در تحلیل عکس‌ها، همه رنگها به صورت سیاه و سفید و به فرمت دوگانه (۰ و ۱) تبدیل می‌شود تا بتوان مساحت سطح پوشیده با پلیمر را از قیر تمیز داد. در شکل ۳-۲ مورفولوژی PMB‌ها برای درصدهای مختلف پلیمر نشان داده شده است. تغییر در مورفولوژی با تغییر درصد پلیمر به خوبی در این شکل نمایان است. در درصدهای پایین پلیمر (زیر ۵ درصد) نمونه‌ها نمایش آشکاری از ذرات پراکنده گلوبولهای متورم شده پلیمری را در یک فاز قیری پیوسته نشان می‌دهند؛ در حالیکه در درصدهای بالای پلیمر (بالای ۵ درصد) یک فاز پیوسته پلیمری مشاهده می‌گردد. در این وضعیت رفتار PMB شدیداً تحت تأثیر خصوصیات پلیمر قرار دارد که نتیجتاً گرانیوی و نقطه نرمی بالای مخلوط در این ترکیب مانع از اختلاط مناسب PMB با مصالح سنگدانه‌ای می‌شود. اما در ازاء ۵ درصد پلیمر دو فاز پیوسته درهم فرورفته (interlock) قیر و پلیمری مشاهده می‌گردد که همین عامل بهبود خواص PMB را در جمیع شرایط سبب شده است [۵۵].

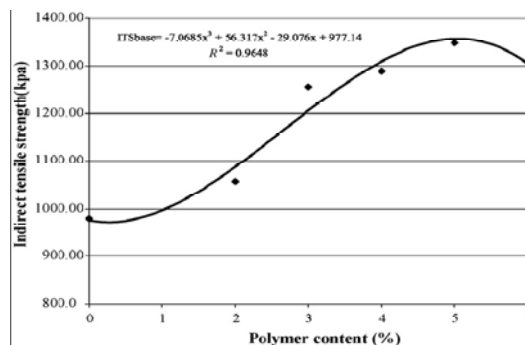


شکل ۳-۳: مورفولوژی PMB در درصدهای مختلف پلیمر [۵۶]

خصوصیات مکانیکی (مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)، ...) مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده و قیر اصلی نیز در این پژوهش با هم مقایسه گردید. برای هر درصد پلیمر ۳ نمونه HMA ساخته شد. درصد قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی بدون پلیمر و دارای پلیمر به ترتیب ۴/۷۳٪ و ۴/۸۲٪ تعیین شد (آزمایش مارشال). نتایج آزمایش‌های مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل‌های ۳-۳ و ۳-۴ نشان داده شده است. بیشترین پایداری در پلیمر ۵ درصد و بیشترین مقاومت نیز در همین درصد بدست آمده است.



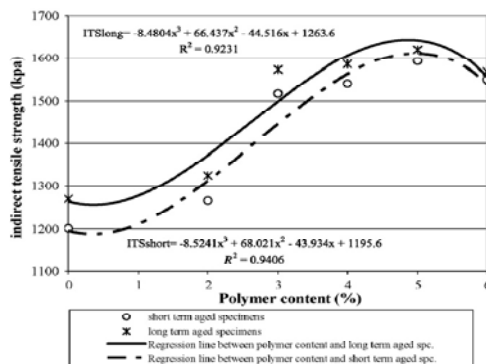
شکل ۳-۴: پایداری مارشال [۵۶]



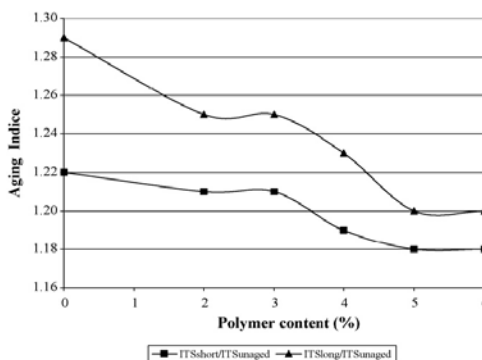
شکل ۳-۵: مقاومت کششی غیرمستقیم [۵۶]

تأثیر پلیمر بر خصوصیات پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت قیر نیز بر اساس تست ITS مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام پیرشدگی کوتاه مدت، مخلوط آسفالتی را پیش از تراکم به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه آون نگهداری می‌کنند. پیرشدگی بلند مدت نیز پس از تراکم مخلوط، در دمای ۸۵ درجه آون به

مدت ۵ روز شبیه سازی می شود. نتیجه این آزمایش در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. با مقایسه شکل های ۳-۴ و ۳-۵ مشاهده می گردد که مقدار ITS در اثر پیرشدگی افزایش یافته است. این افزایش ناشی از سفت شدن قیر بوده که مخلوط شکننده تری را سبب می شود. همچنین می توان مشاهده نمود که نرخ پیرشدگی با افزایش درصد پلیمر کاهش می یابد. این مطلب را در شکل ۳-۶ که اندیس پیرشدگی (نسبت ITS مخلوط پیر شده به ITS مخلوط اولیه) را با افزایش درصد پلیمر به تصویر کشیده است نمایش می دهد.



شکل ۳-۶: ارتباط بین ITS و پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت [۵۶]



شکل ۳-۷: اندیس پیرشدگی برای درصدهای مختلف پلیمر [۵۶]

نتایج این پژوهش مبین این مطلب بود که اصلاح قیر در درجه اول خصوصیات بنیادین قیر (درجه نفوذ، نقطه نرمی و ...) را بهبود می دهد. این بهبود شامل افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ می شود که هر دو این پارامترها به افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائم مخلوط کمک می کنند. البته افزایش گرانی هم از تبعات افزودن پلیمر است که اگرچه مطلوب نیست، اما به دلیل کم بودن مقدار این افزایش،

زیاد حائز اهمیت نخواهد بود. کاهش حساسیت حرارتی قیر نیز از جمله دیگر مزایای افزودن پلیمر در این پژوهش بوده است. خصوصیات مکانیکی مخلوط شامل مقاومت مارشال و ITS نیز با افزودن پلیمر افزایش (بهبود) یافت. علاوه بر آن نتیجه گرفته شد که افزودن پلیمر پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. استفاده از مورفولوژی برای تعیین درصد بهینه پلیمر نتایج مشابه نتایج تست‌های مکانیکی انجام گرفته بر مخلوط آسفالتی را نشان می‌داد. استفاده از تحلیل عکس‌های مورفولوژی به عنوان راهی برای کنترل کیفیت PMB‌های بازیافتی پیشنهاد می‌گردد [۵۷ و ۵۶،۵۵].

۳-۲-۲- تحقیق آیری

در تحقیقی که توسط Airey (۲۰۰۴) انجام گرفت به بررسی اصلاح قیر توسط دو پلیمر EVA و SBS پرداخته شد. Airey در این تحقیق تلاش کرد تا با انجام آزمایش‌های رئولوژیکی و همچنین تهیه مخلوط‌های آسفالتی با قیرهای اصلاح شده مقدار بهبود حاصل از افزودن پلیمرها را بررسی کند [۵۸].

در این تحقیق از سه قیر ونزوئلا، خاورمیانه و روسیه با درجه نفوذ یکسان (بین ۶۰ تا ۸۱ دهم میلیمتر) و همچنین نقطه نرمی یکسان (۴۶ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد) و با اندکی اختلاف در ترکیب قیر انتخابی موسوم به SARA به عنوان قیرهای پایه استفاده شد.

شش نمونه قیر اصلاح شده حاصل از اختلاط ۳ و ۵ درصد EVA (۲۰/۲۰) EVA نیمه کریستال، حاوی ۲۰ درصد وینیل استات و $MFI=20$) با قیرهای ونزوئلا، خاورمیانه و روسیه و شش قیر اصلاح شده هم از اختلاط ۳، ۵ و ۷ درصد SBS (۵۰۲) FINAPRENE حاوی ۳۱ درصد استایرن) با دو قیر ونزوئلا و روسیه تهیه نمود. علاوه بر این نمونه‌ها، دو نمونه اختصاصی به عنوان نمونه‌های کنترل با اختلاط SBS با قیرهای ونزوئلا و خاورمیانه تهیه شدند که نام آنها را Prop S گذاشته‌اند. در این تحقیق نام گذاری نمونه‌ها بر مبنای سه نشانه، که به ترتیب نشان دهنده قیر پایه، درصد پلیمر و نوع پلیمر هستند، صورت گرفته است. به عنوان مثال، V۵S نشان دهنده نمونه‌ای است که از ترکیب ۵ درصد SBS با قیر ونزوئلا تهیه شده است.

نمونه‌ها تحت روند پیرشدگی کوتاه مدت RTFOT و مقاومت در برابر پیرشدگی بلند مدت PAV قرار گرفته‌اند. هدف اصلی در تحقیقات Airey بررسی میزان بهبود در خرابی شیار افتادگی - که به دلیل ناکافی بودن سختی برشی روسازی رخ می‌دهد- و خستگی ناشی از اثر بارهای تکرار شونده بوده است. با

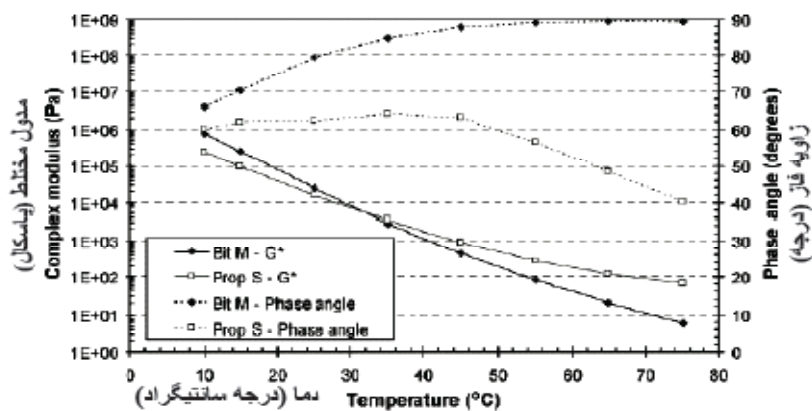
استفاده از نمونه های قیر اصلاح شده، نمونه های آسفالتی با دو ترکیب مخلوط آسفالتی چگال (AC)^۱ و مخلوط با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA)^۲ تهیه شده است.

مشخصات رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده، توسط دستگاه DSR در قالب پارامترهای مدول مختلط برشی (G^*) و زاویه تاخیر فاز (δ) در دماها و فرکانس های مختلف بارگذاری اندازه گیری شده و نمودارهای زمان ثابت و منحنی های بنیادی در دمای پایه ۲۵ درجه سانتی گراد، برای آنها تهیه شده است. برای مثال نمودار زمان ثابت مدول مختلط (G^*) برای قیر پایه خاورمیانه (M) و همچنین نمونه ی Prop S، تحت فرکانس های بارگذاری ۰/۰۲ و یک هرتز در شکل های (۳-۸) و (۳-۹) نشان داده شده است. این دو شکل به وضوح نشان دهنده وابستگی زیاد ویژگی های رئولوژیکی (G^* و δ) قیرهای مورد آزمایش به دما و زمان بارگذاری می باشند. این نمودارهای نشان می دهند که قیر Prop S در منطقه دماهای پایین دارای سختی (G^*) در مقایسه با قیر پایه است در حالی که همین نمونه، در منطقه دماهای بالا دارای سختی بیشتری است. با توجه به همین نمودار می توان دریافت که چگونه اضافه کردن پلیمر SBS به بهبود عملکرد قیر در هر دو منطقه دماهای بالا و دماهای پایین کمک کرده است. نتایج مشابهی برای سایر نمونه های اصلاح شده بدست آمده است. نشان داده شده است که حساسیت پارامتر زاویه تاخیر فاز به ترکیب قیر (SARA) و در نتیجه به اصلاحات انجام گرفته بسیار بیشتر از حساسیت مدول مختلط برشی می باشد. از شکل های (۳-۸) و (۳-۹) هم می توان چنین چیزی استنباط کرد.

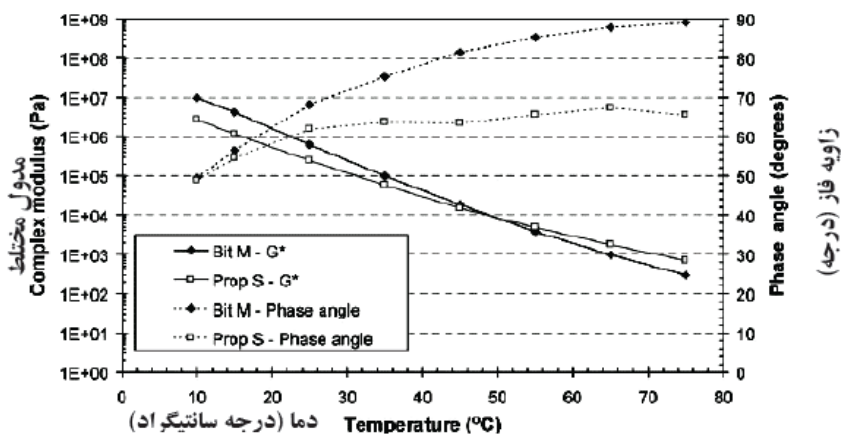
اثر اصلاح در نمونه Prop S که در نمودارهای زمان ثابت ارائه شده حاکی از آن است که مقدار زاویه ی تاخیر فاز در تمام بازه های حرارتی کاهش یافته است ولی مقدار این کاهش در دماهای بالا بسیار بیشتر از مقدار آن در دماهای پایین است. کاهش زاویه تاخیر فاز به معنای بیشتر شدن رفتار الاستیک در ماده است. بنابراین قیرهای اصلاح شده رفتاری بسیار بهتر در دماهای بالا در مقایسه با قیر پایه خاورمیانه- که در دماهای بالا تقریباً به طور کامل ویسکوز عمل می کند- از خود نشان می دهند [۵۸].

^۱ -Dense Graded Asphalt Concrete

^۲ -Ston Matrix Asphalt

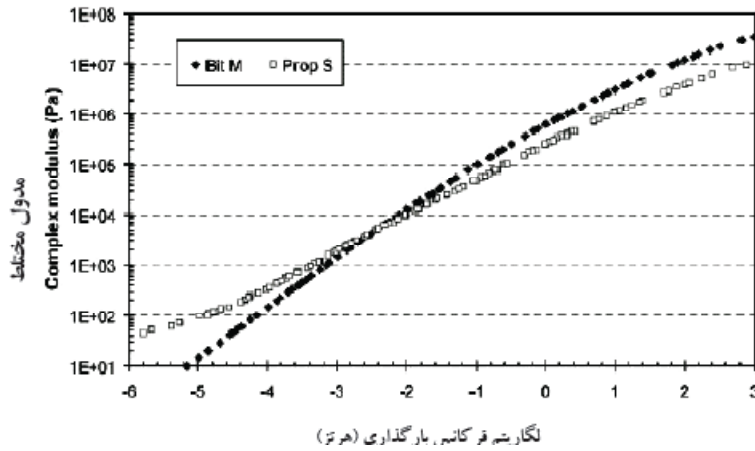


شکل ۳-۸: نمودار زمان ثابت برای فرکانس بارگذاری ۰,۰۲ هرتز در تحقیقات [۵۸] Airey

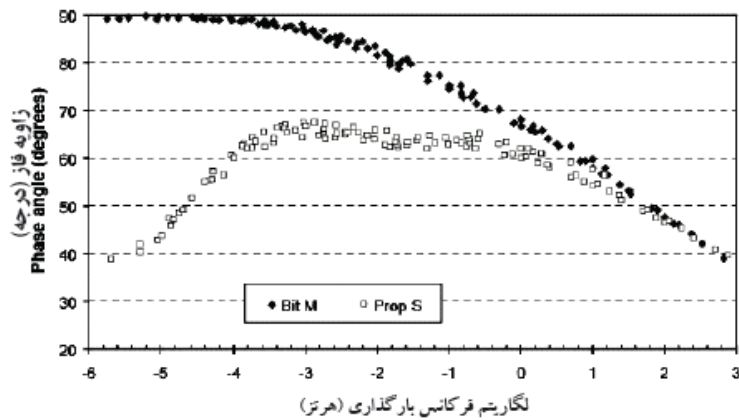


شکل ۳-۹: نمودار زمان ثابت برای فرکانس بارگذاری یک هرتز در تحقیقات [۵۸] Airey

نمودارهای بنیادی برای مدول مختلط برشی و زاویه تاخیری فاز برای قیر پایه خاورمیانه و نمونه Prop S در شکل‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) نشان داده شده‌اند. این نمودار نشان دهنده کاهش سختی در فرکانس‌های بالا و افزایش آن در فرکانس‌های پایین برای نمونه‌ی اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه است. همانند نتایجی که از نمودارهای زمان ثابت برای زاویه تاخیر فاز گرفته شده بود، در نمودار بنیادی هم زاویه تاخیر فاز، الاستیک تر شدن رفتار الاستیک قیر اصلاح شده Prop S در منطقه فرکانس‌های پایین، که نقش عظیمی در خرابی ناشی از تغییر شکل‌های ماندگار ایفا می‌کند، بیشتر مشهود است و این امر یک بهبود قابل توجه در رفتار ویسکوالاستیک قیر است [۵۹].



شکل ۳-۱۰: نمودار بنیادی G^* در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نحت فرکانس در پژوهش Airy [۵۹]



شکل ۳-۱۱: نمودار بنیادی δ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در پژوهش Airy [۵۹]

پارامتر رئولوژیکی قیر که در خرابی ناشی از تغییر شکل های ماندگار تاثیر گذار شناخته شده است، معکوس نرمی ویسکوز قیر ($1/n$) است که از لحاظ عددی برابر پارامتر $G^*/\text{Sin}\delta$ است. به طور کلی هر چه مقدار $G^*/\text{Sin}\delta$ برای یک قیر بیشتر باشد، مقاومت آن قیر در برابر تغییر شکل های ماندگار و خرابی شیار افتادگی بیشتر خواهد بود. مقادیر اندازه گیری شده این پارامتر برای قیر های پایه و نمونه هایی که Airy تهیه کرده در جدول (۳-۳) آورده شده است. همانگونه که انتظار می رود مقدار پارامتر $G^*/\text{Sin}\delta$ برای نمونه های اصلاح شده بیش از قیرهای پایه است و هرچه درصد پلیمر موجود در قیرها افزایش می یابد مقدار این پارامتر نیز افزایش نشان می دهد.

نمونه های اصلاح شده توسط EVA مقدار $G^* / \sin \delta$ بیشتری در مقایسه با نمونه های اصلاح شده توسط SBS از خود نشان می دهند.

جدول ۳-۳: نتایج پارامتر شیارشدگی قیر در پژوهش Airey [۶۰]

Binder Ref.	$G^*/\sin \delta @ 0.02 \text{ Hz (Pa)}$				$G^*/\sin \delta @ 1.59 \text{ Hz (kPa)}$			
	40°C	Ranking	60°C	Ranking	40°C	Ranking	60°C	Ranking
Bit M	3600	14	98	14	162	13	6.8	14
Bit V	2400	15	76	15	103	15	5.1	15
M5E	22,500	4	442	7	442	2	21.6	4
M7E	31,900	3	886	3	485	1	30.3	1
R5E	14,600	6	447	6	262	6	13.3	8
R7E	38,300	1	1638	2	360	3	24.6	3
V5E	19,500	5	580	5	297	5	16.3	6
V7E	36,800	2	2075	1	353	4	26.8	2
R3S	5400	13	151	13	180	11	8.2	13
R5S	7500	10	254	11	200	9	11.3	10
R7S	8500	9	365	10	192	10	13.1	9
V3S	6200	11	224	12	166	12	10.2	11
V5S	9100	8	437	8	204	8	16.1	7
V7S	12,300	7	644	4	220	7	20.3	5
Prop S	5900	12	396	9	116	14	9.6	12

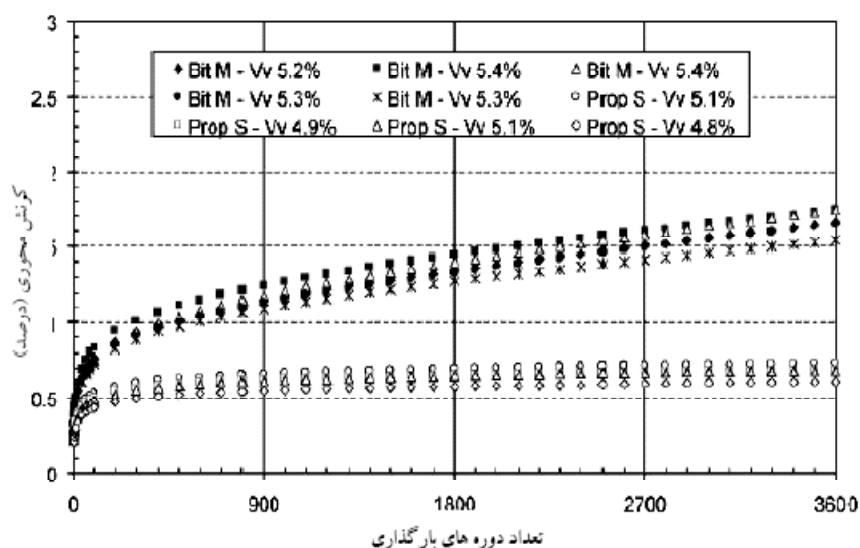
پارامتر $\sin \delta$. G^* قیر معیار مناسبی برای مقدار انرژی هدر رفته در هر دوره بارگذاری و شاخصی برای مقاومت قیر در برابر خرابی ناشی از خستگی قلمداد می شود به نحوی که کاهش در مقدار $\sin \delta$. G^* نشان دهنده افزایش مقاومت در برابر خستگی قیر است. مقدار این پارامتر برای قیرهای مورد آزمایش توسط Airey در جدول (۳-۴) نشان داده شده است [۶۰].

جدول ۳-۴: نتایج پارامتر خستگی قیرها در پژوهش Airey [۶۰]

Binder Ref.	$G^* \cdot \sin \delta @ 1.59 \text{ Hz (MPa)}$	Ranking
Bit M	6.8	13
Bit V	3.9	3
M5E	7.9	15
M7E	6.9	14
R5E	6.7	11
R7E	6.5	10
V5E	4.7	7
V7E	4.6	6
R3S	5.5	9
R5S	5.1	8
R7S	6.8	12
V3S	4.2	5
V5S	3.8	2
V7S	4.1	4
Prop S	2.3	1

به طور کلی با مبنا قرار دادن پارامتر $\text{Sin}\delta \cdot G^*$ ، قیرهای اصلاح شده توسط SBS نتایج نسبتاً بهتری را در مقایسه با قیرهای اصلاح شده توسط EVA از خود نشان می دهند.

مخلوط های آسفالتی ساخته شده در این تحقیق تحت آزمایش های بارگذاری محوری تکرار شونده RLAT^۱ (به عنوان آزمایشی برای تعیین مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی شیار افتادگی) و آزمایش خستگی در کشش غیر مستقیم ITFT^۲ (برای مقاومت مخلوط در برابر خرابی ناشی از خستگی) قرار گرفته اند. نتایج آزمایش RLAT برای دو نمونه آسفالتی تهیه شده با دانه بندی SMA و دو قیر خاورمیانه و قیر Prop S در نمودار (۱-۳) نشان داده شده است. همانگونه که در این نمودار هم ملاحظه می شود، افزودن SBS به قیر پایه تاثیر به سزایی در کاستن از مقدار تغییر شکل های تجمعی داشته است.



نمودار ۱-۳: نمودار کرنش محوری برحسب تعداد دوره های بارگذاری در آزمایش RLAT برای مخلوط های SMA تهیه شده از قیر های اصلاحی در پژوهش Airey [۶۰]

نتایج تمام نمونه ها در جدول (۳-۵) ذکر شده است. طبق این نتایج، همانگونه که از نتایج آزمایش های قیر قابل پیش بینی بود، افزودن EVA و SBS تاثیر به سزایی در کاستن از مقدار تغییر شکل های

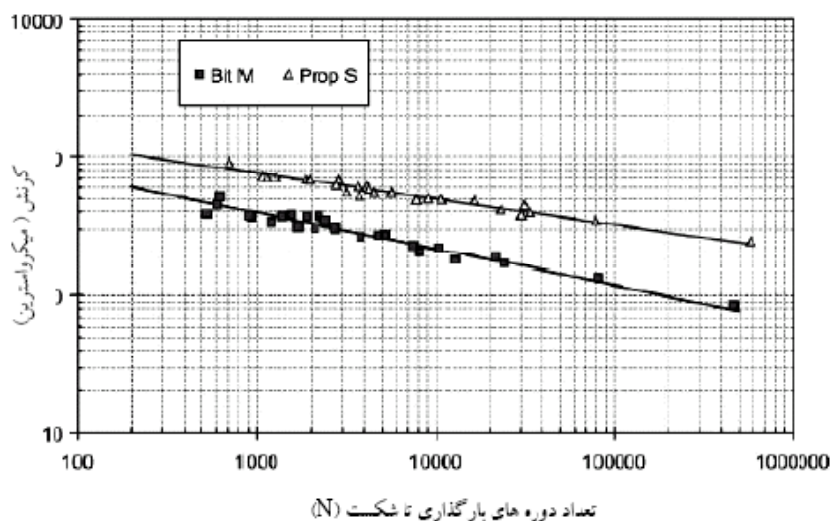
^۱ - Repeated load Axial Test

^۲ - Indirect Tensile Fatigue Test

ماندگار مخلوط آسفالتی متناظرشان داشته اند ولی بر خلاف مشاهده ای که در مقایسه قیرهای اصلاح شده توسط EVA و SBS در آزمایش های قیر به دست آمده بود، مخلوط های تهیه شده توسط SBS به طور میانگین نتایج بهتری را در مقایسه با مخلوط های تهیه شده توسط افزودن EVA از خود نشان می دهند. نتایج آزمایش ITFT برای نمونه های با دانه بندی SMA که از قیر پایه ی خاور میانه تهیه شده اند و همچنین قیر Prop S در شکل (۳-۱۳) آورده شده است. نتایج تمامی نمونه ها و همچنین مقایسه نمونه های تهیه شده برای مقاومت در برابر خستگی در جدول های (۳-۶) و (۳-۷) آمده است. همان گونه که در نتایج هم دیده می شود، افزودن پلیمرها تاثیر به سزایی در افزایش عمر خستگی نمونه های آسفالتی دارد.

جدول ۳-۵: پارامترهای تغییر شکل ماندگار مخلوط های آسفالتی در پژوهش Airey [۶۰]

Binder Ref.	Asphaltic concrete (AC)				Stone mastic asphalt (SMA)			
	Ult. strain (%)	Ranking	Strain rate ($\mu\epsilon/\text{cycle}$)	Ranking	Ult. Strain (%)	Ranking	Strain rate ($\mu\epsilon/\text{cycle}$)	Ranking
Bit M	-	-	-	-	1.67	14	1.73	14
Bit V	1.35	14	1.55	14	-	-	-	-
M5E	0.69	13	0.366	13	0.70	9	0.30	9
M7E	0.62	12	0.26	12	1.18	13	0.32	11
R5E	0.48	10	0.09	7	0.70	10	0.30	10
R7E	0.41	7	0.11	8	1.14	12	0.39	13
V5E	0.43	8	0.19	10	0.79	11	0.36	12
V7E	0.51	11	0.22	11	0.63	8	0.28	8
R3S	0.35	6	0.05	5	0.51	4	0.18	5
R5S	0.27	4	0.04	4	0.56	6	0.15	4
R7S	0.20	1	0.03	2	0.47	2	0.13	2
V3S	0.44	9	0.13	9	0.63	7	0.25	7
V5S	0.33	5	0.07	6	0.54	5	0.20	6
V7S	0.22	2	0.04	3	0.49	3	0.14	3
Prop S	0.22	3	0.03	1	0.44	1	0.08	1



شکل ۳-۱۲: توابع خستگی برای مخلوط های SMA تهیه شده از قیر خاورمیانه و Prop S در پژوهش Airey [۳۷]

نتایج به دست آمده در تحقیق Airey حاکی از این است که افزودن پلیمرها به طور قابل ملاحظه ای مقاومت مخلوط های آسفالتی تهیه شده را در برابر خرابی های ناشی از تغییر شکل های ماندگار (شیار افتادگی) و خستگی افزایش می دهد و این امر را می توان از نتایج آزمایش های دینامیکی مخلوط های آسفالتی استنباط کرد.

جدول ۳-۶: نتایج به دست آمده برای تعداد دوره های بارگذاری نظیر خرابی خستگی در پژوهش Airey [۶۰]

Binder Ref.	Asphaltic concrete (AC)		Stone mastic asphalt (SMA)	
	Fatigue function	R ²	Fatigue function	R ²
Bit M	—	—	$N_f = 6.76 \times 10^{12} e^{-3.78\sigma}$	0.95
Bit V	—	—	—	—
M5E	$N_f = 2.06 \times 10^{15} e^{-5.412\sigma}$	0.66	$N_f = 1.96 \times 10^{14} e^{-4.525\sigma}$	0.88
M7E	$N_f = 4.50 \times 10^{13} e^{-4.100\sigma}$	0.99	$N_f = 7.02 \times 10^{13} e^{-4.088\sigma}$	0.88
R5E	$N_f = 7.35 \times 10^{13} e^{-4.378\sigma}$	0.75	$N_f = 1.73 \times 10^{14} e^{-4.155\sigma}$	0.81
R7E	$N_f = 1.14 \times 10^{15} e^{-3.692\sigma}$	0.70	$N_f = 1.84 \times 10^{12} e^{-3.411\sigma}$	0.88
V5E	$N_f = 1.14 \times 10^{10} e^{-2.751\sigma}$	0.80	$N_f = 2.14 \times 10^{12} e^{-3.564\sigma}$	0.80
V7E	$N_f = 1.20 \times 10^{13} e^{-4.221\sigma}$	0.65	$N_f = 1.23 \times 10^{12} e^{-3.529\sigma}$	0.72
R3S	$N_f = 1.91 \times 10^{18} e^{-5.975\sigma}$	0.93	$N_f = 7.15 \times 10^{09} e^{-2.540\sigma}$	0.98
R5S	$N_f = 9.26 \times 10^{17} e^{-5.720\sigma}$	0.92	$N_f = 7.43 \times 10^{10} e^{-2.805\sigma}$	0.98
R7S	$N_f = 1.43 \times 10^{16} e^{-5.043\sigma}$	0.97	$N_f = 1.23 \times 10^{10} e^{-2.350\sigma}$	0.91
V3S	$N_f = 4.83 \times 10^{10} e^{-2.823\sigma}$	0.97	$N_f = 5.62 \times 10^{09} e^{-2.346\sigma}$	0.96
V5S	$N_f = 3.48 \times 10^{13} e^{-4.027\sigma}$	0.98	$N_f = 2.13 \times 10^{12} e^{-3.312\sigma}$	0.98
V7S	$N_f = 8.78 \times 10^{09} e^{-2.311\sigma}$	0.94	$N_f = 1.22 \times 10^{13} e^{-3.556\sigma}$	0.97
Prop S	$N_f = 1.93 \times 10^{15} e^{-4.284\sigma}$	0.91	$N_f = 3.81 \times 10^{12} e^{-3.246\sigma}$	0.98

جدول ۳-۷: پارامترهای خستگی نمونه های آسفالتی در پژوهش Airey [۶۰]

Binder Ref.	Asphaltic concrete (AC)				Stone mastic asphalt (SMA)			
	$\epsilon \cdot 10^6$ ($\mu\epsilon$)	Ranking	$N_f^{100\mu\epsilon}$	Ranking	$\epsilon \cdot 10^6$ ($\mu\epsilon$)	Ranking	$N_f^{100\mu\epsilon}$	Ranking
Bit M	—	—	—	—	64	8	186,000	9
Bit V	—	—	—	—	—	—	—	—
M5E	80	5	309,000	5	83	5	438,000	6
M7E	74	7	284,000	7	83	4	468,000	5
R5E	63	8	129,000	9	96	3	849,000	3
R7E	48	10	71,300	11	69	7	277,000	7
V5E	30	13	35,800	13	60	9	160,000	11
V7E	48	11	43,300	12	53	12	107,000	13
R3S	114	3	2,150,000	3	33	14	59,600	14
R5S	124	2	3,370,000	2	55	11	184,000	10
R7S	104	4	1,230,000	4	55	10	246,000	8
V3S	46	12	10,900	10	40	13	114,000	12
V5S	75	6	30,700	6	81	6	506,000	4
V7S	51	9	21,000	8	98	2	940,000	2
Prop S	147	1	5,230,000	1	211	1	5,370,000	1

همچنین Airey در مقاله ای که در ژورنال دانش مواد در سال ۲۰۰۴ در خصوص اصلاح پلیمر SBS قیرهای جاده به چاپ رسیده بود از دو نوع قیر A و B با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی که مشخصات آنها در جداول (۳-۸) و (۳-۹) ارایه شده است، با درصد های ۳، ۵ و ۷ درصد پلیمر به این دو قیر پایه در دماهای بین ۱۷۰ تا ۱۸۵ درجه اضافه کرد و به نتایج زیر دست یافت که نتایج آن در جدول (۳-۱۰) آمده است:

- ۱- با افزایش پلیمر، درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه کاهش و لی نقطه نرمی افزایش یافت .
- ۲- با افزایش مقدار پلیمر، نقطه شکست فراس کاهش ولی شاخص نفوذپذیری افزایش یافت. همچنین با افزایش پلیمر شکل پذیری و خاصیت الاستیسته تقریباً افزایش یافتند.
- ۳- با انجام آزمایش ویسکوزیته چرخشی برای دو گروه قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۰۰ و ۱۶۰ درجه که در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است، مشخص گردید که افزایش ثابتی در ویسکوزیته برای هر دو گروه قیر اصلاحی وجود دارد. مقادیر ویسکوزیته بدست آمده در جدول (۳-۱۱) نشان داده شده است.

۴- با انجام تحلیل های دینامیکی - مکانیکی، پارامترهای رئولوژیکی مدول پیچشی و زاویه فاز را تعیین نمودند و مشخص گردید که اصلاح پلیمر SBS مدول پیچشی هر دو نوع قیر پایه را مخصوصاً در درجه حرارت های بالا و فرکانس های پایین افزایش می دهد، و نیز مقادیر اصلاحی که متفاوت می باشند به طبیعت قیر پایه و قابلیت سیستم قیر- پلیمر بستگی داشتند [۶۰].

جدول ۳-۸: مشخصات شیمیایی قیرهای A و B در پژوهش Airey [۶۰]

قیر	اشباع ها (%)	آروماتیک ها (%)	رزین ها (%)	آسفالتن ها (%)	شاخص کلونیدی ^۱
قیر (A)	۴	۶۸	۱۹	۹	۰/۱۴۹
قیر (B)	۱۱	۵۸	۱۷	۱۴	۰/۳۳۳

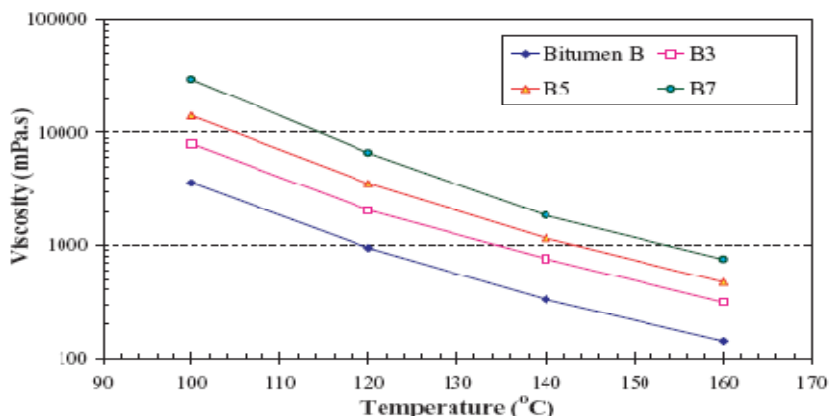
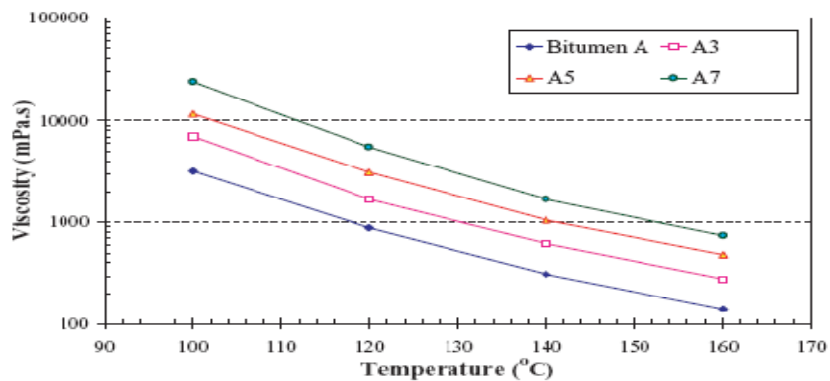
جدول ۳-۹: مشخصات فیزیکی قیرهای پایه A و B در پژوهش Airey [۶۰]

قیر	نفوذ در دمای ۲۵ درجه (mm)	نقطه نرمی (°C)	شاخص نفوذ (PI)	نقطه شکست فراس (°C)	ویسکوزیته دردمای ۶۰ درجه (pa.s)	ویسکوزیته دردمای ۱۳۵ درجه (pa.S)
قیر (A)	۷۳	۴۷	-۱,۰۸	-۱۲	۱۶۵	۰,۳۷۰
قیر (B)	۸۱	۴۶,۸	-۰,۸۶	-۲۸	۲۱۳	۰,۳۸۰

جدول ۳-۱۰: نتایج آزمایش Airey بر روی قیرهای پلیمری نوع A و B با درصدهای ۳,۵ و ۷ برای پلیمر SBS [۶۰]

قیر	نفوذ در دمای ۲۵ درجه (mm)	نقطه نرمی (°C)	شاخص نفوذ (PI)	نقطه شکست فراس (°C)	خاصیت آنگمی در دمای ۱۰ درجه (cm)	خاصیت الاستیسیته در دمای ۱۰ درجه (%)
قیر (A)	۷۳	۴۷	-۱,۰۸	-۱۲	۶۳	-
قیر (PMB-AS۳)	۶۳	۵۲,۴	-۰,۰۵	-۱۶	۹۵	۶۸
قیر (PMB-AS۵)	۵۷	۷۸	۴,۴۱	-۱۵	۹۹	۷۶
قیر (PMB-A S۷)	۵۰	۹۵	۶,۱۳	-۱۴	۱۰۱	۸۱
قیر (B)	۸۱	۴۶,۸	-۰,۸۶	-۲۸	۲۱۳	۳۸۰
قیر (PMB-BS۳)	۶۳	۵۲,۲	-۰,۰۹	-۱۸	۸۱	۷۱
قیر (PMB-BS۵)	۵۴	۷۴	۳,۶۷	-۱۶	۹۰	۷۸
قیر (PMB-BS۷)	۴۹	۸۸	۵,۲۹	-۱۴	۸۱	۸۰

$$I_c = \frac{\text{شاخص کلئیدی}}{\text{اسفالتهن ها + اشباع ها}} / \text{رزین ها + آروماتیک ها}$$



شکل ۳-۱۳: ویسکوزیته چرخشی قیرهای اصلاح شده با درصد‌های ۰.۳، ۵ و ۷ با پلیمر SBS [۶۰]

جدول ۳-۱۱: نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی با درصد‌های مختلف پلیمر (۰.۳، ۵، ۷) بر روی قیر A و B [۶۰]

η_{pmb} / η_{base} در دمای ۱۶۰ درجه	η_{pmb} / η_{base} در دمای ۱۰۰ درجه	ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۶۰ درجه (mpa.s)	ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۰۰ درجه (mpa.s)	قیر
۱	۱	۱۴۰	۳۱۷۰	قیر (A)
۲	۲,۲۱	۲۸۰	۷۰۰۰	قیر (PMB-AS۳)
۳,۴۳	۳,۶۹	۴۸۰	۱۱۷۰۰	قیر (PMB-AS۵)
۵,۲۹	۷,۵۷	۷۴۰	۲۴۰۰۰	قیر (PMB-A S۷)
۱	۱	۱۴۰	۳۶۰۰	قیر (B)
۲,۲۱	۲,۲۱	۳۱۰	۷۹۵۰	قیر (PMB-BS۳)
۳,۳۶	۳,۸۹	۴۷۰	۱۴۰۰۰	قیر (PMB-BS۵)
۵,۳۶	۸,۳۳	۷۵۰	۳۰۰۰۰	قیر (PMB-BS۷)

همچنین آیری در انتهای کار خود نتیجه می‌گیرد که اصلاح قیر تابعی از نوع قیر، سازگاری قیر و پلیمر و میزان پلیمر می‌باشد. در صورتی که این سازگاری بین SBS و قیر رخ دهد و مقدار کافی پلیمر نیز در ترکیب وجود داشته باشد، یک ترکیب الاستیک با سختی و ویسکوزیته بالا (به خصوص در دمای زیاد) بوجود می‌آید. پیرشدگی PMB در این شرایط منجر به کاهش اندازه مولکول‌های SBS شده که کاهش خاصیت الاستیک ترکیب را در پی خواهد داشت.

اما در مورد کار آیری یک نکته همراه با اشکال به نظر می‌رسد و آن اینکه آیری در مقایسه پیرشدگی PMB ها احتمالاً از فرکانس اهترز برای قیرهای A و B قبل از پیرشدگی و از فرکانس ۰/۰۲ برای PMB های پیرشده استفاده کرده و مقایسه قیرهای پیرشده و پیرنشده را در دو فرکانس مختلف انجام داده است و به این دلیل کاهش مدول مختلط را پس از پیرشدن قیر اعلام نموده است که پدیده‌ای بسیار غیرمعمول به نظر می‌رسد [۵۸،۵۹ و ۶۰].

۳-۲-۳- تحقیق چن و همکاران

کار مطالعاتی که چن و همکارانش انجام داده‌اند به تعیین درصد بهینه دو نوع پلیمر افزودنی به دو نوع قیر مختلف پرداخته است. برای این منظور از تست‌هایی چون تست پایداری نگهداری، رئومتر برشی و SEM استفاده شده است تا هم رفتار ویسکوالاستیک و هم میکروساختار PMB در این تصمیم‌نقشی ایفا کنند. مشخصات قیرها در جدول ۳-۱۲ آمده است. پلیمرها نیز از نوع SBS (خطی و شعاعی) هستند. SBS به صورت پودری با حداکثر قطر ذرات ۱ میلی‌متر تهیه شده بود که در دمای ۱۸۰°C به مدت ۲ ساعت با قیر مخلوط گردید.

جدول ۳-۱۲: مشخصات کلاسیک قیرها [۶۱]

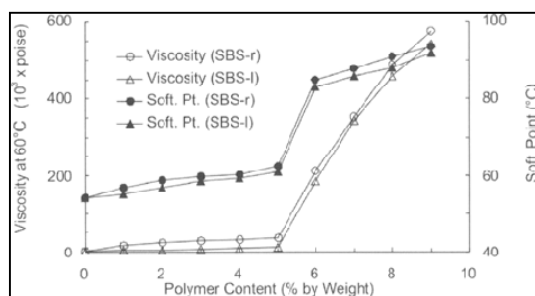
Grade	Penetration 25°C (dmm)	Soft. pt. (°C)	Viscosity 60°C (poise)	Asphaltenes (%)	Oils (%)	Resins (%)	Weight average M _w
AC-10	93	31	962	12.1	70.1	17.8	1280
AC-20	62	43	1856	18.3	54.8	26.9	1580

تست‌های گرانبوی، نقطه نرمی و چقرمگی و سفتی بر روی قیرها انجام شد. لازم به ذکر است که تست چقرمگی و سفتی برای تعیین خصوصیت مقاومت کششی قیر بر اساس ASTM D ۵۸۰۱ انجام می‌گیرد. نمونه قیر در دمای ۲۵°C با نرخ ۵۰ سانتیمتر در دقیقه کشیده می‌شود و منحنی بار-تغییرشکل رسم

می‌گردد. چقرمگی برابر مساحت زیر این منحنی خواهد بود. سفتی نیز برابر مساحت زیر منحنی تا قبل از خط مماس می‌باشد. خط مماس از نقطه صفر محور بار به نقطه‌ای که مقدار بار پس از رسیدن به مقدار حداکثر شروع به کاهش یافتن می‌کند وصل می‌شود.

اما نتایج نشان دادند که گرانی و دمای نقطه نرمی بر طبق شکل ۳-۱۴ با افزایش میزان پلیمر افزایش می‌یابد. در ۱٪ پلیمر افزایش گرانی بسیار ناچیز است، چراکه SBS به صورت فاز پراکنده عمل می‌کند. افزایش گرانی تا ۳٪ پلیمر نیز چندان قابل توجه نیست. در این مرحله SBS شروع به ساختن یک فاز شبکه‌ای پراکنده می‌کند. پس از این مقدار پلیمر (تا ۵٪) این شبکه محلی پلیمری شروع به گسترش کرده تا یک شبکه پیوسته را در سرتاسر قیر ایجاد کند. شاهد این مطلب نیز افزایش گرانی در این مراحل است. در نهایت با رسیدن میزان پلیمر به ۶٪ و درصدهای بالاتر نیز افزایش چشمگیری در گرانی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده غالب بودن تمام و کمال فاز پلیمر در PMB است.

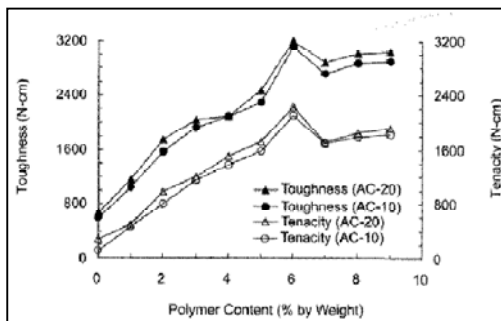
افزایش قابل توجه دمای نقطه نرمی نیز در ازاء درصد پلیمر ۶٪ رخ می‌دهد. پس از این نقطه فاز الاستومری SBS به صورت پیوسته و یکنواخت شده و در نتیجه افزایش دمای نقطه نرمی به صورت یکنواخت رخ می‌دهد. برای اینکه دمای نقطه نرمی حداقل 60°C درجه سانتیگراد باشد (که برابر حداکثر دمایی است که عموماً در روسازی‌ها اندازه‌گیری می‌شود) باید حداقل ۶٪ پلیمر به قیر افزوده گردد.



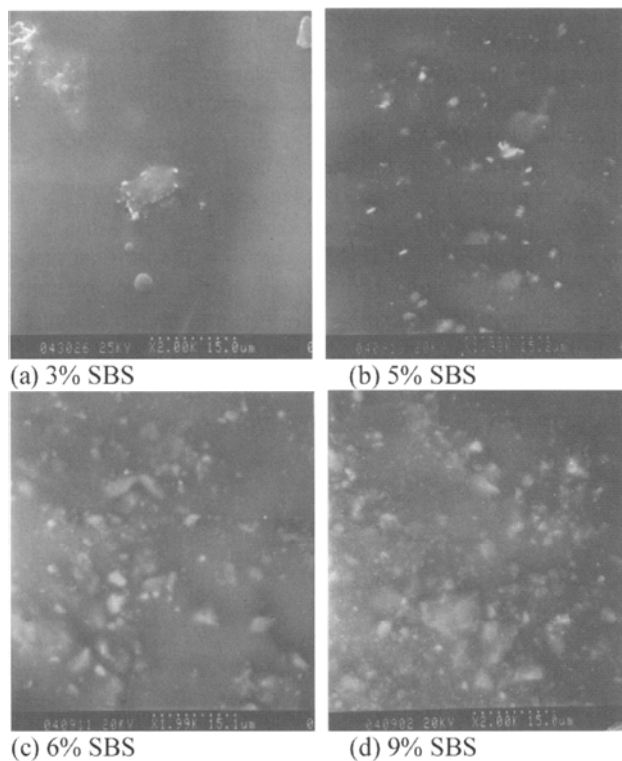
شکل ۳-۱۴: گرانی و دمای نقطه نرمی قیر AC-۱۰ مخلوط شده با پلیمر [۶۱]

شکل ۳-۱۵ نشان می‌دهد که با افزایش درصد پلیمر کار بیشتری برای کشیدن PMB مورد نیاز است. این افزایش تا ۶٪ پلیمر ادامه می‌یابد و سپس رو به کاهش می‌نهد که نشان می‌دهد که افزایش بیش از ۶٪ پلیمر می‌تواند منجر به وقوع ناپیوستگی مورفولوژیک بین قیر و SBS شود. لازم به ذکر است که این عدم پیوستگی بین قیر و پلیمر به میزان سازگاری این دو ماده بستگی دارد.

شکل ۳-۱۶ نتایج مورفولوژی مخلوط قیر با SBS را نشان می‌دهد. نتایج SEM، مطابق آنچه پیش از این نیز در مورد گرانروی و سایر خصوصیات فیزیکی PMB اشاره شد، نشان می‌دهند که با افزایش درصد پلیمر، SBS به تدریج فاز غالب PMB می‌شود که همین امر منجر به بهبود خواص مکانیکی قیر می‌گردد.



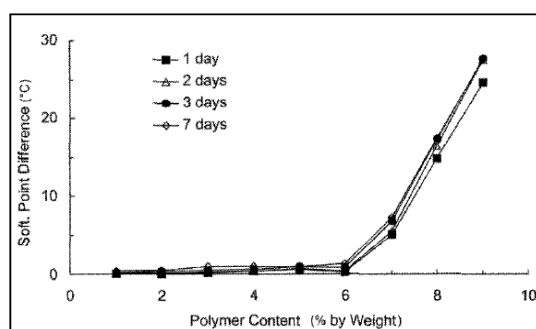
شکل ۳-۱۵: چقرمگی و سفتی قیرهای مخلوط شده با پلیمر [۶۱]



شکل ۳-۱۶: میکروساختار مخلوط قیر AC-۲۰ با SBS شعاعی مشاهده شده توسط SEM [۶۱]

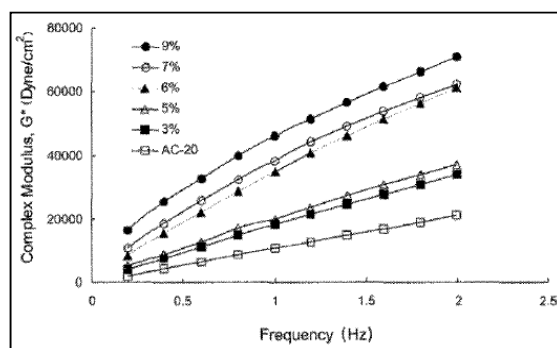
در ۳٪ پلیمر، قطره‌های کوچک پلیمری توسط فاز سازگار قیر که معمولاً آروماتیک‌ها هستند متورم شده و در فاز قیری که فاز غالب است پراکنده‌اند. در این وضعیت کاهش آروماتیک‌ها و افزایش فاز آسفالتین در قیر رخ داده که موجب افزایش چسبندگی و نیز بهبود خاصیت کشسانی قیر به صورت توأمان می‌گردد. در دماهای بالا از آن جهت که فاز پلیمری مدول سختی بیشتری از ماتریس قیری دارد که این برتری موجب افزایش گرانروی PMB می‌شود. در دماهای پایین نیز مدول سختی فاز پراکنده پلیمری کمتر از فاز ماتریسی قیر بوده که منجر به کاهش شکنندگی مخلوط می‌شود. از اینرو فاز پراکنده پلیمری منجر به بهبود خواص مهندسی قیر از جمله گرانروی، دمای نقطه نرمی و چقرمگی می‌شود.

در ۵٪ پلیمر، هر دو فاز پلیمر و قیر در هم قفل شده و شکل پیوسته‌ای یافته‌اند. در این مرحله است که پلیمر به تدریج می‌رود تا فاز غالب را تشکیل دهد و تغییر فاز رخ دهد. در ۶٪ پلیمر این تغییر فاز تکمیل می‌گردد. در این مرحله فاز پیوسته و تحکیم‌یافته پلیمری شبکه قیر-پلیمر را نگه می‌دارد. حداقل مقدار پلیمر لازم برای اطمینان یافتن از تشکیل چنین شبکه‌ای بیش از هر چیز به نوع قیر و پلیمر بستگی دارد. در خصوص ماندگاری نگهداری PMB نیز از اختلاف دمای نقطه نرمی دو نمونه بالا و پایین مخلوط پس از نگهداری استفاده شد که نتایج در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است. مادامی که مقدار پلیمر کمتر یا مساوی ۶٪ باشد پایداری مخلوط بسیار مناسب بوده ولی به محض افزایش درصد پلیمر تا ۷٪ این پایداری از بین می‌رود که علت آن ناسازگاری قیر با پلیمر اضافی و عدم تشابه خصوصیات قیر و پلیمر است که موجب این اختلاف می‌شود. به نظر می‌رسد با نگهداشتن این اختلاف در محدوده ۲°C بتوان حداکثر از ۶٪ پلیمر در اصلاح قیر استفاده نمود.



شکل ۳-۱۷: اختلاف دمای نقطه نرمی در درصدهای مختلف SBS-r در قیر پایه ۱۰-AC [۶۱]

مقادیر مدول ترکیبی PMB ها در شکل ۳-۱۸ به ازاء درصدهای مختلف پلیمر به تصویر کشیده شده است. افزایش این مدول با افزایش درصد پلیمر در همه حالتها اتفاق افتاده است. اما مشاهده می شود که این افزایش در تغییر درصد پلیمر از ۵٪ به ۶٪ بیشتر نمایان است که این پدیده ناشی از تشکیل شبکه پیوسته پلیمری است [۶۱].



شکل ۳-۱۸: مقادیر مدول ترکیبی برای درصدهای مختلف پلیمر [۶۱]

۳-۲-۴- تحقیق گاردنر

تحقیقی که توسط استروپ گاردنر انجام گرفت رابطه موجود بین مورفولوژی و رئولوژی قیرهای اصلاح شده را مورد بررسی قرار داد. او به این نکته اشاره می کند که قیرهایی که در یک دمای معینی دارای مدول سختی برابری هستند می توانند عملکرد روسازی متفاوتی داشته باشند. این مطلب عموماً از آنجا ناشی می شود که در شرایطی که مدول G^* دو نوع قیر برابر است، اما مدول های G' و G'' دو قیر می توانند کاملاً متفاوت باشند و این تفاوت می تواند رفتارهای متفاوتی را در قیرهای اصلاح شده به وجود آورد. برای بهبود مقاومت قیرها در برابر خرابی های ناشی از بار از پلیمرها با نقش افزاینده خاصیت عکس العملی ارتجاعی قیر استفاده می شود، اما نقش پلیمرها در تغییر مقدار مدول یا تغییر نسبت بخش الاستیک به بخش گرانو و در یک کلمه اینکه پلیمر مورد استفاده چه مقدار بتواند وظیفه اصلاح قیر را درست انجام دهد به فرم و ساختار و مورفولوژی پلیمر در شبکه قیر بستگی دارد و مورفولوژی های متفاوت، تغییرات رئولوژیک قابل ملاحظه- ای را در قیرها به وجود می آورند. پلیمرهایی که دامنه های درشت پراکنده در قیر بوجود می آورند منجر به تولید رفتارهای غیر نیوتنی و همچنین افزایش خاصیت الاستیک قیر می شوند. اما از سوی دیگر یک شبکه پلیمری ریز و پیوسته علی القاعده تأثیر بیشتر و پایدارتری بر رفتار قیر خواهد داشت.

در این تحقیق چهار نوع شبکه پلیمری مختلف با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی و چهار نوع رفتار رئولوژیک مختلف نیز به تناظر هر مورفولوژی شناسایی گردید. نخست، محدوده‌های درشت و مجزای پلیمری در فاصله بسیار زیاد از هم، دوم، محدوده‌های درشت و مجزای پلیمری در فاصله کم از هم، سوم، محدوده‌های درشت ولی درهم و پیوسته پلیمری و چهارم، شبکه ریز و پیوسته پلیمری با اتصال یکپارچه است که مجموعاً چهار گروه شناسایی شده در مورفولوژی قیرهای اصلاح شده هستند. برای تعیین رفتارهای رئولوژیک منحنی‌های Master Curve برای مدول الاستیک و فاکتور اتلاف با بکارگیری تکنیک همپوشانی دما-زمان و با استفاده از دستگاه DSR ساخته شد. فاکتور اتلاف نسبت انرژی هدر رفته در رفتار گرانی به انرژی ذخیره شده در رفتار الاستیک را نشان می‌دهد. رفتارهای چهارگانه رئولوژیک متناظر با هر کدام از مورفولوژی‌ها شامل ۱- کاهش پیوسته مدول و افزایش پیوسته فاکتور اتلاف همراه با کاهش فرکانس، ۲- ناحیه مسطحه در مدول و افزایش پیوسته فاکتور اتلاف همراه با کاهش فرکانس، ۳- ناحیه مسطحه هم در مدول و هم در فاکتور اتلاف همراه با کاهش فرکانس و ۴- ناحیه مسطحه هم در مدول و هم در فاکتور اتلاف همراه با کاهش فرکانس بعلاوه وجود مشخص یک مقدار حداقل برای فاکتور اتلاف در فرکانس‌های پایین می‌باشد. وجود ناحیه مسطحه نماینده مشخص تأثیر پلیمرها در رفتار قیرهای اصلاح شده است. همچنین وجود یک مقدار حداقل در مقدار فاکتور اتلاف در فرکانس‌های پایین با دمای انتقال شیشه-ای پیوندهای فیزیکی ایجاد شده مرتبط می‌باشد [۶۲].

۳-۲-۵- تحقیقات گילה و مولنار

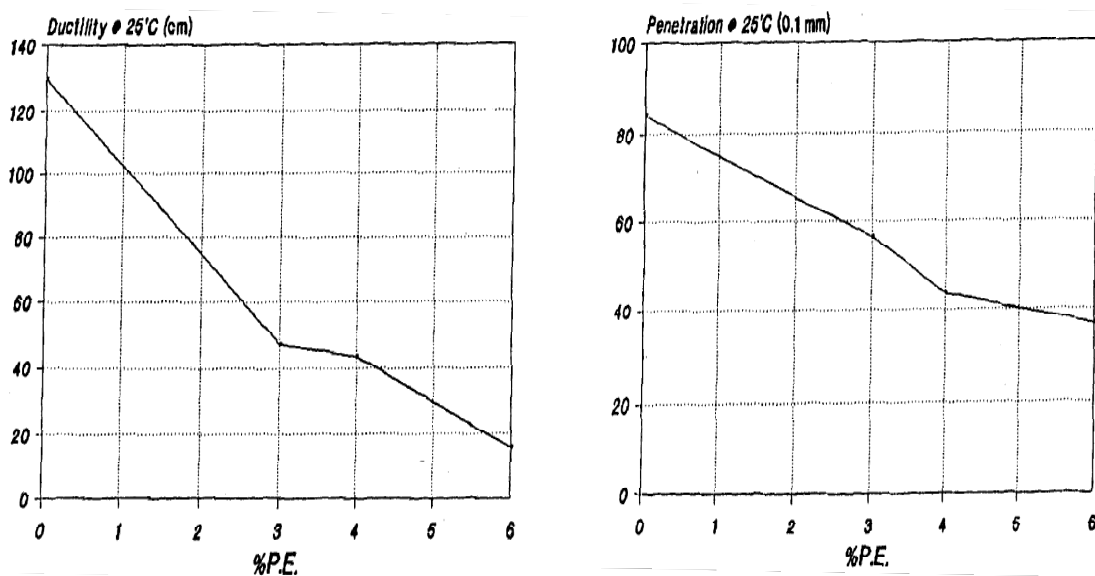
تحقیقاتی که توسط این دو نفر و سایر همکارانشان در دانشگاه دلف انجام گرفت، اثر افزودن ذرات نانوکلی را بر رفتار رئولوژیک قیر در فاز نخست و سپس بر مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار داد. این محققان در ابتدا بر این اساس کار خود را آغاز کردند که مشاهداتی از بهبود خواص فیزیکی برخی پلیمرها مانند حساسیت حرارتی آنها در اثر افزودن ذرات نانوکلی ثبت شده بود. از اینرو ایده امکان بهبود خواص مشابه قیر (که یک پلیمر است) در اثر افزودن این ماده شکل گرفت. هدف این محققان در درجه اول این بود که آیا ذرات نانوکلی خواص فیزیکی و رئولوژیک قیرها مانند سفتی قیر در دماهای مختلف، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر هوازگی و پیرشدگی، پایداری حرارتی و سایر پارامترها را بهبود می‌بخشد و سپس توجه به این مطلب که میزان تأثیرگذاری این تغییرات در عملکرد مخلوط آسفالتی چگونه است.

فعالیت‌های مختلفی برای رسیدن به اهداف فوق صورت گرفت. اولین کار مطالعه و مشاهده اصلاح-کننده نانوکلی در مقیاس نانو و تحلیل‌های انجام شده توسط اشعه X است. کار دوم بررسی تأثیر اصلاح-کننده نانوکلی بر رفتار رئولوژیک قیر است که توسط DSR و برای قیرهای تازه و هوازده انجام می‌گیرد. سومین کار هم بررسی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح‌شده توسط نانوکلی است که با انجام آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، تست مقاومت خستگی، تست خزش دینامیک و تست مدول ارتجاعی انجام می‌شود.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که نانوکلی نوع کلوزیت (یکی از دو نوع نانوکلی مورد استفاده در این تحقیق) سفتی قیر را افزایش می‌دهد و مقاومت قیر ۴۰/۶۰ را در برابر گودافتادگی جای چرخ بهبود می‌دهد. این بهبود مخصوصاً در حضور ۶٪ کلوزیت رخ می‌دهد. همچنین ۶٪ کلوزیت مقاومت کششی غیرمستقیم و انرژی شکست مخلوط آسفالتی را نیز افزایش می‌دهد. افزودن ۶٪ نانوفیل (نوع دوم نانوکلی مورد استفاده در این تحقیق) به قیر نیز مقاومت پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت قیر ۷۰/۱۰۰ را بهبود داده است. اما از سوی مقابل افزودن نانوکلی عملکرد مقاومت خستگی قیر و مخلوط آسفالتی را به خصوص در دماهای پایین نامناسب کرده است. نتیجه نهایی حاصل از این تحقیق اینگونه خواهد بود که افزودن نانوکلی منجر به بهبود برخی خواص قیر و مخلوط آسفالتی و تخریب برخی خواص دیگر می‌گردد [۶۳].

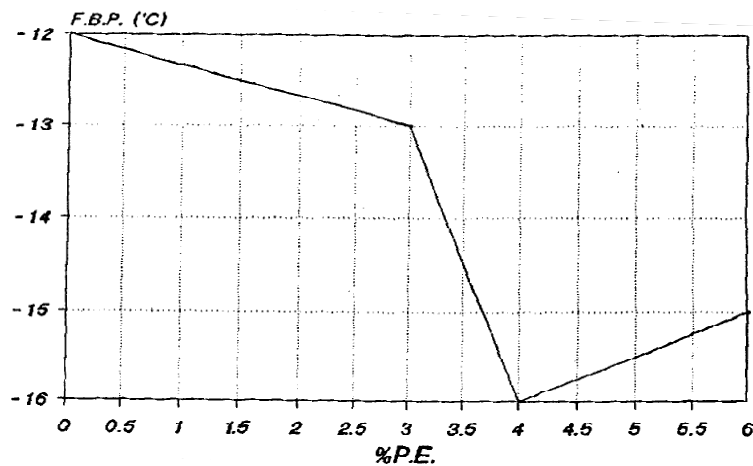
۳-۳- پژوهش های انجام شده در ایران

در تحقیقی که توسط مهندس احسان نظر بیگی بر روی قیرهای اصلاح شده با پلی اتیلن سبک، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می دهد که هرچه قدر درصد پلیمر بیشتر شود، نقطه نرمی نیز بیشتر می شود. بطوریکه ۶٪ پلی اتیلن، نقطه نرمی را ۱۹ درجه افزایش داده است. درجه نفوذ نیز به صورت تقریباً "خطی"، با افزایش پلی اتیلن کاهش یافته است شکل (۳-۱۹). در همین شکل اثر افزایش پلی اتیلن بر خاصیت کشش پذیری قیر نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش این پلیمر از خاصیت کشش پذیری کاسته می شود.



شکل ۳-۱۹: تغییرات درجه نفوذ و کشش پذیری قیر با افزودن پلی اتیلن سبک [۱]

شکل (۳-۲۰) اثر افزایش پلی اتیلن بر روی نقطه شکست فراست قیر را در دماهای پایین نشان می دهد. با افزایش پلی اتیلن، تحمل دمای پایین قیر افزایش می یابد. البته انحرافی که در افزایش ۶٪ ملاحظه می شود، به علت عدم همگنی کافی مخلوط و یا خطای آزمایش می باشد [۱].



شکل (۳-۲۰): تغییرات نقطه شکست فراست قیر در اثر افزودن پلی اتیلن سبک [۱]

صادق پور و میر عارفین در مقاله خود تحت عنوان "اصلاح خواص قیر توسط SEBS و بهبود سازگاری قیر- پلیمر به روش ماکروسکوپی و میکروسکوپی" دو روش را برای سازگاری SEBS با قیر پیشنهاد کردند. در روش اول (ماکروسکوپی) از افزایشده های متداول مثل (KC)^۱ استفاده کردند و اثر آن را بر روی خواص ذخیره سازی در دمای بالا، خواص رئولوژیکی، مکانیکی و مورفولوژی مورد بررسی قرار دادند. در روش دوم (میکروسکوپی)، تاثیر اندازه ذرات پلیمر بر روی سازگاری آن با قیر را مورد تحقیق قرار دادند. آنها در تحقیق خود به نتایج زیر دست یافتند:

- ۱- با افزایش پلیمر SEBS نقطه نرمی افزایش می یابد.
- ۲- قیر های اصلاح شده با ۴ درصد پلیمر و با نسبت SEBS/KC برابر ۱۰۰/۵۰ بهترین خواص مکانیکی و رئولوژیکی را به همراه داشتند.
- ۳- افزایش مقدار SEBS در قیر های اصلاح شده، ویسکوزیته و خاصیت آنگمی در دمای پایین را افزایش و درجه نفوذ را کاهش می دهد.
- ۴- افزایش KC برای مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد SEBS تاثیر ناچیزی بر روی ویسکوزیته، آنگمی و درجه نفوذ داشته، اما برای مقدار ۶٪ SEBS، افزایش KC موجب تنزل ویسکوزیته و آنگمی در دمای پایین و بهبودی در درجه نفوذ گشته است و دلیل این امر را نقش پرکن بودن KC دانسته اند.

^۱ - Kaolinite clay

۵- افزایش پلیمر، افزایش قابل توجهی در مدول پیچشی در تمامی محدوده های دمایی حاصل کرد که نتیجه این امر بالا رفتن مدول الاستیک قیر های اصلاح شده است.

۶- با کوچک کردن اندازه ذرات SEBS تا حد چند ده نانومتر سازگاری و پایداری قیرهای اصلاح شده را به طور چشم گیری بهبود بخشیدند.

افلاکی و طباطبایی در پژوهش خود از پنج نوع ماده^۱ اصلاحی برای بهبود خواص قیر استفاده نمودند (لاستیک های خرد شده، گیلسونایت، SBS، اسید پلی فسفریک و قیرهای هوا دمیده). نتایج تحقیق آنها نشان می دهد که ویسکوزیته قیر های اصلاحی حاوی ۱۶ درصد Crumb Rubber از ۲۹۸ مگا پاسکال به ۲۱۵۱ مگا پاسکال افزایش می یابد و بر اساس دستورالعمل ASTM D۶۳۷۳ برای کارایی قیر های آسفالتی رضایت بخش هستند و بقیه مواد اصلاحی نیز ویسکوزیته قیر را بهبود می بخشند. همچنین درجه حرارت قیرهای اصلاح شده از ۲،۸ تا ۲۳،۵ درجه نسبت به قیر پایه افزایش می یابد. قیرهای اصلاحی با Crumb Rubber با مقادیر ۱۰، ۱۴ و ۱۶ درصد به ترتیب ۱۰،۳، ۱۵،۶ و ۱۴،۳ درجه، دمای قیر را افزایش می دهند و در قیر های اصلاحی با اسید پلی فسفریک با مقادیر ۰،۵، ۰،۷، ۱،۳ و ۱،۶ درصد به ترتیب ۱۰،۳، ۱۰، ۱۹،۱ و ۲۳،۵ درجه، دمای قیرها را افزایش می دهند. در ادامه نتایج آنها حکایت از آن دارد که قیرهای اصلاح شده با Crumb Rubber و شبیه سازی شده با air blowing درجه حرارت های قیر را در دماهای پایین در حدود ۲ تا ۴ درجه بهبود می بخشند. همچنین نتایج نشان می دهد که اصلاح کننده های گیلسونایت و پلی فسفریک همراه با بدتر شدن در درجه حرارت های پایین و متوسط موجب افزایش مقاومت قیر می گردند و اظهار می نمایند که نایستی از اصلاح کننده SBS (۳درصد) در بهبود خواص قیر در دمای پایین انتظار داشت [۶۴].

۳-۴- جمع بندی پژوهشهای انجام شده

در این فصل به ذکر نتایجی از تحقیقات انجام شده در داخل و خارج کشور در ارتباط با اصلاح قیر توسط پلیمرها و به خصوص SBS پرداخته شد. آنچه که مسلم است هر کدام از تحقیقات ذکر شده بر

^۱ - Crumb rubber, Gilsonite, SBS, PPA(Polyphosphoric acid), Air blowing

مبنای هدفی است که محققان آن از اصلاح قیر یا عملکرد قیر اصلاح شده دنبال می کرده اند و نتایج بدست آمده در خصوص موضوع در این فصل به آن اشاره شد. در اینجا به ذکر چکیده از نتایج مهم تحقیقات انجام شده می پردازیم. ایساکسون که تحقیقات جامعی بر روی خواص اصلاح قیر با SBS انجام داده بود به این نتیجه رسیده بود که با افزایش درصد SBS به قیر درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی و ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه افزایش می یابد و همچنین شاخص درجه نفوذ نیز افزایش می یابد. در همین راستا تحقیقات Airey و Burak Sengoz و دیگر محققان نیز نشان می دهد که به وجود چنین نتایج مشابهی دست یافتند. ایساکسون در ادامه تحقیقات خود بر روی خواص پایداری قیر های اصلاح شده با SBS به ناپایداری بسیار آنها در طول ذخیره سازی متوجه شد و دلیل آن را حرکت پلیمرها در طول مدت آزمایش به سمت بالا استوانه می باشد که سبب افزایش خاصیت الاستیسیته در این قسمت می شود و در قسمت پایین استوانه اجزاء سنگین قیر قرار می گیرند و سبب سفتی می شوند. اظهار می نماید که قیرهای اصلاحی ساخته شده از قیرهای با مقادیر بالای آروماتیک، قابلیت ذخیره سازی را بهبود می بخشد. نتایج تحقیقات Navarro در خصوص پایداری نیز نشان از ناپایدار بودن زیاد نمونه های ساخته شده با SBS می دهد که دلیل آن را جدای فاز پلیمر از قیر می داند اما در همین راستا نتایج تحقیقات Burak Sengoz نشان از پایداری بسیار خوب نمونه در طول ذخیره سازی را می دهد که نتایج آزمایش نقطه نرمی برای درصدهای مختلف SBS بین ۲ تا ۴ درجه بوده است. اکثر محققان نیز در خصوص خاصیت الاستیسیته و کشش پذیر بودن قیرهای اصلاحی با SBS به یک نتیجه مشابه دست یافته اند و آن بهبودی نسبی هر دو خاصیت با افزایش پلیمر است. Uddin و Isacsson در تحقیقات خود در خصوص سختی خزشی $s(t)$ قیر های اصلاحی با SBS به نتیجه مشابهی دست یافتند. تحقیقات آنها نشان می دهد که قیرهای اصلاح شده پلیمری سختی خزشی کمتری نسبت به قیر پایه مشابه خود دارند که با افزایش درصد مقدار پلیمر این پارامتر بهبود بهتری را نتیجه می دهد و بیان می دارند که انقباض های ایجاد شده ناشی از کاهش درجه حرارت در مخلوط های آسفالتی، باعث تنش های کششی کمتری در مخلوط ها شده و در نتیجه منجر به کاهش در میزان ترک های حرارتی می شود. اکثر محققان معتقداند که ویسکوزیته چرخشی با افزایش مقدار پلیمر SBS افزایش می یابد و مقداری که استانداردها برای ماکزیمم آن در نظر گرفته اند (۳ پاسکال - ثانیه) را برآورد می کنند. در تحقیق Burak Sengoz برای ۶ درصد SBS ای که به کار برده است، مقدار ویسکوزیته چرخشی ۱,۵ پاسکال - ثانیه بوده است. نتایج تحقیقات Airey در خصوص ویژگی های رئولوژیکی با استفاده از DSR نشان می دهد که در فرکانس های ثابت، زاویه فاز با تغییر دما کاهش یافته ولی مقدار این کاهش در دماهای بالا بسیار بیشتر از مقدار آن در دماهای پایین است (کاهش زاویه فاز را به

معنای بیشتر شدن رفتار الاستیک ماده دانسته است). همچنین در ادامه تحقیقات خود بر روی پارامترهای شیارشدگی ($G^*/\sin(\delta)$) و خستگی ($G^* \cdot \sin(\delta)$) بیان می نماید که پارامتر شیار شدگی برای نمونه های اصلاح شده بیش از قیر پایه است و هر چه درصد پلیمر موجود در قیر بیشتر باشد، این پارامتر افزایش می یابد و خرابی شیارشدگی بهبود می یابد و نتایج پارامتر خستگی نیز نشان از بهبودی آن دارد. دیگر محققان نیز هر کدام در بررسی های خود به بهبودی خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاحی رسیده اند که در متن به صورت کامل توضیح داده شده است. در نهایت اکثر محققان اذعان دارند که از بین افزودنی های مجاز به قیر، SBS بهترین کارایی را برای خواص دمای بالا و بعضا نیز برای دمای پایین دارد. در پایان، مطالعات انجام شده در خصوص موضوع پژوهش در این فصل به همراه نام مولف و سال در جدول ۳-۱۴ آورده شده است.

جدول ۳-۱۳: مطالعات انجام شده در خارج و داخل کشور به همراه نام مولف و سال چاپ

سال	نام	مطالعات انجام شده در خارج
۱۹۹۶	Bonemazzi	ارزیابی عملکرد پلیمرها در خصوص اصلاح رفتار قیر و مخلوط های آسفالتی
۱۹۹۶	Isacsson	قابلیت دخیره سازی و سازگاری قیرهای اصلاح شده با SBS
۱۹۹۷	Lee	تاثیر تشکیل شبکه در خصوصیات رئولوژیکی قیر اصلاح شده با SBR
۱۹۹۷	Isacsson	تاثیر SBS و اصلاح پلیمر در ویسکوزیته قیر
۱۹۹۹	Isacsson	اصلاح قیر با پلیمرهای ترموپلاستیکی
۲۰۰۰	Wen	خاصیت رئولوژیکی قیر اصلاح شده با SBS
۲۰۰۱	Becker	قیر اصلاح شده با پلیمر
۲۰۰۳	Isacsson	تاثیر اصلاح پلیمر در رفتار دمای پایین قیر و مخلوط
۲۰۰۳	Uddin	خصوصیات ویسکوالاستیک قیرهای اصلاح شده با پلیمر برای استفاده در روسازی
۲۰۰۳	Sebaaly	ارزیابی تکنولوژی های جدید روسازی در Nevada
۲۰۰۳	Chen	تعیین مقدار پلیمر در اصلاح خواص قیر
۲۰۰۴	Wong	پاسخ شیارشدگی مخلوط آسفالتی برای مدول برش دینامیکی قیر مورد استفاده در آسفالت
۲۰۰۴	Airey	ارزیابی مخلوط های ساخته شده با قیرهای پلیمر اصلاح شده و قیر پایه
۲۰۰۴	Airey	اصلاح پلیمر SBS برای قیرهای مورد استفاده در جاده
۲۰۰۹	Burak Sengoz	ارزیابی خصوصیات و ساختمان میکروسکوپی قیرهای اصلاح شده با SBS و EVA
۲۰۰۹	Navarro	اصلاح خواص قیر با پلیمر های واکنش پذیر و غیر واکنش پذی
۲۰۰۹	افلاکی	پیشنهاداتی برای اصلاح قیرهای ایران با توجه به شرایط آب و هوایی
۱۳۷۱	نظر بیگی	سازگاری و بهینه سازی خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط های ..
۱۳۸۵	صادق پور و میر عارفین	اصلاح خواص قیر توسط SEBS و بهبود سازگاری قیر- پلیمر.....

فصل چهار:

نانو کامپوزیت های پلیمری

۴-۱- ویژگیهای نانوکامپوزیت های پلیمری

نانو کامپوزیت های پلیمری، دسته ای از کامپوزیت ها هستند که اندازه ذرات تقویت کننده در آنها حداقل دارای یک بعد (طول، عرض یا ضخامت) در محدوده ۱۰۰-۱ نانومتر می باشد. دامنه این ذرات می تواند از عناصر سوزنی تا ورقه ای و از ایزوتروپیک تا کاملاً غیر ایزوتروپیک باشد [۳۶].

این دسته از مواد به دلیل محدوده نانو، نانو ذرات تقویت کننده خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بهبود یافته تری در مقایسه با میکرو کامپوزیتها از خود نشان می دهند. نانو کامپوزیت های تجاری انواع مختلفی دارند که شامل ذرات پلیمر/غیر آلی، پلیمر/پلیمر، فلز/سرامیک و نانوکامپوزیتهای بر پایه مواد غیر آلی است. توزیع یکنواخت این ذرات نانومتری ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک می تواند منجر به مساحت بین سطحی خیلی زیادی بین عناصر تشکیل دهنده گردد، برای مثال در توزیع سیلیکاتهای لایه ای در پلیمرها مساحت بین سطحی (مساحت/حجم) حدود $700 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ می شود.

این مساحت بین سطحی بالا، امکان آنرا فراهم می کند که در مقدار بسیار پایین نانوذرات، فاصله بین نانو ذرات به ابعاد مولکولی برسد. این مساحت بین سطحی بالا و ابعاد نانومتری بین عناصر تشکیل دهنده، نانو کامپوزیتهای پلیمری را از کامپوزیتها و پلاستیکهای تقویت شده متمایز می کند. برتری نواحی بین سطحی که از فاز نانومتری نتیجه می شوند و بیانگر رفتار نانوکامپوزیتهای پلیمری است، نمی تواند به وسیله استدلال های ساده ای که برای کامپوزیتهای پلیمری مرسوم استفاده می شود توجیه شود.

نقطه کلیدی در تولید نانو کامپوزیت های پلیمری، مهندسی فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره می باشد. برای این منظور عموماً از اصلاح کننده های سطحی استفاده می شود. برای مثال در سیلیکات- های لایه ای از مولکول هایی که بصورت یونی با سطح نانوذرات پیوند داشته باشند استفاده می شود و درمورد نانولوله های کربنی از پلیمرهایی که بصورت فیزیکی به آنها متصل می شوند استفاده می شود. انجام اصلاح سطحی باعث می شوند که عکس العمل بین فصل های مشترک بهبود یابد. درحال حاضر بیشترین تلاش ها در بر روی اصلاحات سطحی شده است که باعث می شود توزیع نانوذرات تسهیل یافته و بصورت یکنواخت توزیع شوند.

جنبه های مهم مطالعاتی و تحقیقاتی در رابطه با نانو کامپوزیت های پلیمری عبارتند از:

۱- درک دقیق و عمیق از منطقه فصل مشترک فاز تقویت کننده و پلیمر

۲- وابستگی خصوصیات فصل مشترک به شیمی سطح نانوذره، آرایش اجزاء

۳- ارتباط بین منطقه فصل مشترک و خصوصیات نانو کامپوزیت ها

ارزش نانو کامپوزیت های پلیمری از هر دو جنبه تجاری و نظامی، مختص به خواص مکانیکی نیست. در کامپوزیت ها کارایی مورد نیاز، خواص مکانیکی، هزینه و قابلیت فرآوری از موضوعات بسیار مهم می باشد [۳۶، ۳۷ و ۳۸]. نانو کامپوزیت های پلیمری بر این محدودیت ها غلبه کرده است. برای مثال تلاش- های ده سال اخیر و پیشرفت سریع نانو کامپوزیت های پلیمر-سیلیکات لایه ای را در نظر بگیرید، باعث شده است که مدول کششی و استحکام این کامپوزیتها دو برابر شود، بدون اینکه مقاومت به ضربه آنها کاهش یابد. مثلاً برای تعداد زیادی رزین های ترموپلاستیک مثل نایلون و اولفین و همچنین رزین های ترموست مثل اورتان، اپوکسی [۳۹ و ۴۰] و سیلوگزان با افزایش مقدار کمی مثلاً ۲٪ حجمی از سیلیکات لایه ای می توان به این خواص رسید.

اخیراً جنرال موتورز و شرکایش مثل باسل و Black hawk Automotive و southren clay product در قسمت های خارجی اتومبیل از نانو کامپوزیت هایی با زمینه اولفین ترموپلاستیک و تقویت کننده سیلیکات لایه ای استفاده کرده اند.

یک نانو کامپوزیت اولفینی با ۵/۲٪ سیلیکات لایه ای که در ساخت کامپوزیت های مرسوم به کار می رود در مقایسه با ذرات مرسوم تالک، بسیار مستحکم تر و سبکتر می باشد. باتوجه به نوع قطعه و ماده تقویت کننده در یک نانو کامپوزیت اولفینی می توان کاهش وزنی در حدود ۲۰٪ را بدست آورد. علاوه بر این مقدار مواد مصرفی نیز نسبت به کامپوزیت های مرسوم کاهش خواهد یافت. این مزایا باعث خواهد شد که تأثیرات مثبتی بر مسائل زیست محیطی و بازیافت آنها بوجود بیاید.

به عنوان مثال گزارش شده است که استفاده از نانو کامپوزیت های پلیمری با لایه های سیلیکاتی در صنایع خودرو آمریکا باعث صرفه جویی در مصرف ۵,۱ میلیارد لیتر گازوئیل در طول عمر خودرو تولید شده در یک سال خواهد شد و در نتیجه چیزی در حدود ۱۰ میلیارد پوند ماده آلاینده دی اکسید کربن کمتر در محیط نشر خواهد یافت. باتوجه به گسترده بودن پلیمرها و رزین ها و همچنین نانومواد تقویت کننده و کاربردهای فراوان آنها، موضوع نانو کامپوزیت های پلیمری بسیار گسترده می باشد.

از جمله مهمترین مزایای نانو کامپوزیت های پلیمر - خاک رس را می توان به شرح زیر نام برد:

۱- در ساخت آنها به فناوری پیشرفته نیازمند نیست.

۲- هزینه ساخت آنها پایین است.

۳- در صنعت کاربردهای زیادی دارد.

۴- دارای خواص استثنایی هستند.

۴-۲- انواع نانوکامپوزیت ها

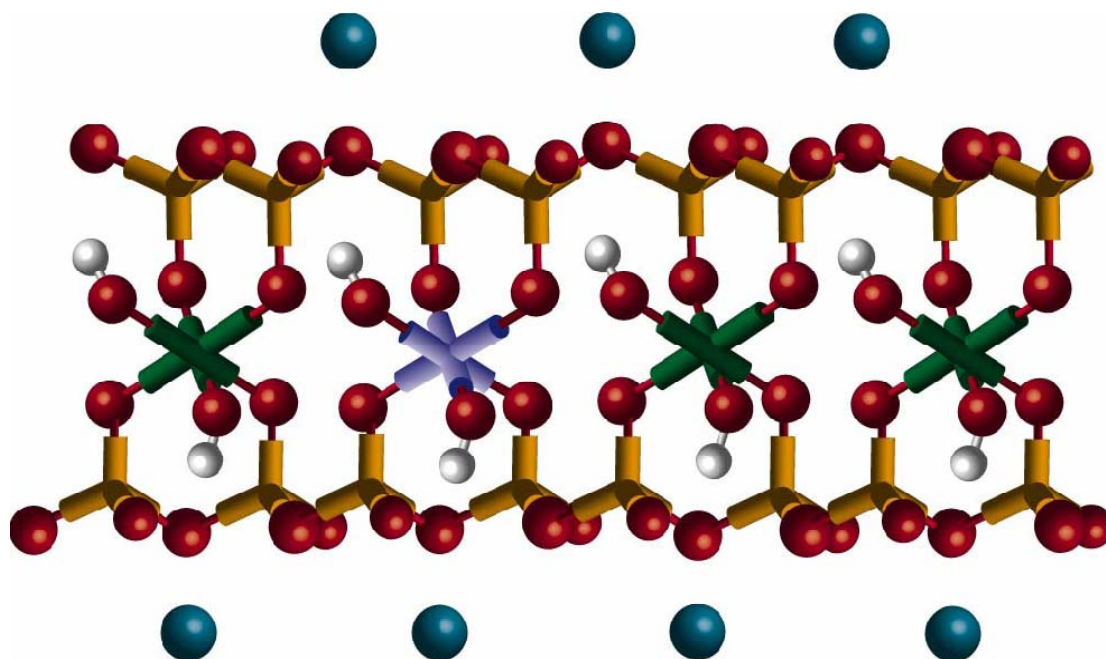
ذرات مورد استفاده در تولید نانوکامپوزیتها می توانند به وسیله ابعادشان در فضای سه بعدی دسته بندی شوند. اگر هر سه بعد نانوذرات در مقیاس نانو باشد، کروی هستند. نانوتیوبها دارای دو بعد در اندازه نانومتر هستند. نانوکامپوزیت یک بعدی، فقط یک بعد در دامنه نانو دارد. در این حالت به شکل صفحات یک بعدی هستند که طول آن صدها تا هزارها نانومتر است. این صفحات بصورت واحدهای انفرادی ایزوله شده تشکیل نمی شوند بلکه یک ساختار کریستالی شاخه ای تشکیل می دهند. این دسته از نانوکامپوزیتها می توانند به عنوان نانوکامپوزیتهای پلیمری کریستالی نامگذاری شوند [۳۶، ۳۷ و ۳۸].

نانولوله های کربنی در حین افزایش و بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلیمرها، باعث می شوند که خواص الکتریکی و گرمایی رزین ها نیز بهبود یابد. قطر این نانولوله ها می تواند از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد و نسبت و جهی (طول به قطر) بیشتر از ۱۰۰ یا حتی ۱۰۰۰ باشد. مانند سیلیکات های لایه ای، ماهیت غیرهمسانگردی این لوله ها باعث می شود که در کسر حجمی کمی از نانولوله ها رفتار جالبی در این نانوکامپوزیت ها پیدا شود.

نانوسیلیکاتهای لایه ای به دلیل قابلیت اصلاح پذیری سطوح و سازگار شدن با پلیمرها بخصوص پلی اولفینها و همچنین مزایای اقتصادی آنها نسبت به نانوتیوبها بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند.

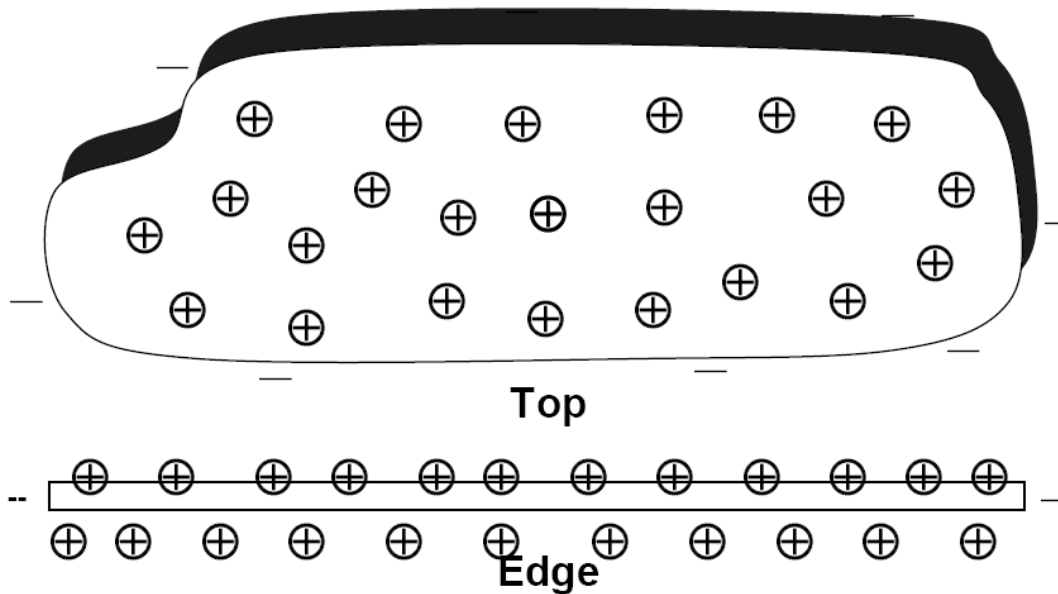
۴-۲-۱- ساختار و خواص سیلیکاتهای لایه ای

سیلیکات های لایه ای به دو دسته سیلیکاتهای لایه ای طبیعی و سیلیکات های لایه ای سنتزی تقسیم می شوند. از جمله سیلیکاتهای لایه ای طبیعی می توان به مونت موریلونیت (MMT) و میکا، واز جمله سیلیکات های لایه ای سنتزی می توان به ماگادیت، لاپونیت و فلوروهکتوریت اشاره نمود. همانطور که در شکل ۴-۱ مشاهده می شود سیلیکات های لایه ای، ساختاری لایه ای دارند و هر لایه با ضخامت یک نانومتر متشکل از دو صفحه اتمهای سیلیسیم (تراهدرال سیلیکا SiO_2) بصورت چهار وجهی که به یک صفحه هشت وجهی میانی $\text{Al}(\text{OH})_3$ ای $\text{Mg}(\text{OH})_2$ متصل شده، تشکیل شده است.



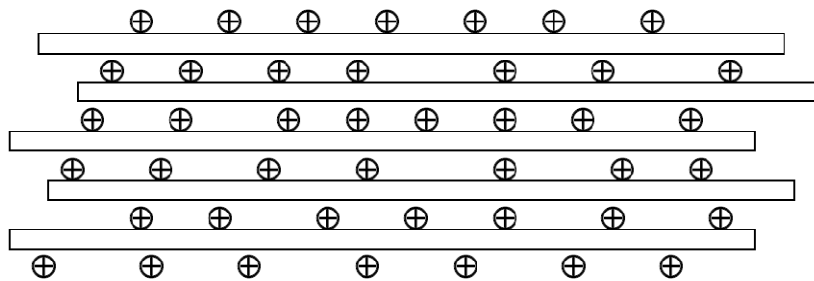
شکل ۴-۱: ساختمان شیمیایی خاک رس های نوع اسمکتیت (آرایه دوبعدی تراهدرال سیلیکا و آرایه دوبعدی اکتا هدرال آلومینا یا منیزیم) [۳۸]

بار منفی اضافی در سطح نانو به کمک کاتیون ها خنثی می شود. دستاورد این موازنه، یک پلی یون بسیار باردار است که در بین مواد معدنی از خصوصیات ویژه ای برخوردار است. بدین معنی که انواع مختلف نانو در ساختمان خویش دارای کاتیون های غیر آلی هستند که تعویض آنها با بنیان های آلی، نه تنها باعث تغییر قطبیت سطح گونه های مختلف نانوی مثل اسمکتیت می شود، بلکه فاصله بین صفحات سیلیکاتی را افزایش می دهد. این امر باعث سهولت ورود پلیمر در فواصل بین صفحات می شود.



شکل ۲-۴: ساختار کریستالی سیلیکاتهای لایه ای [۳۸]

در شکل ۲-۴ و ۳-۴ ساختار کریستالی خاک رس ها را مشاهده می کنید. نیروهای واندروالس در بین لایه ها که حامل کاتیون ها (M^+) می باشند، لایه ها را که توسط پیوند کووالانسی به هم متصل اند را از هم جدا می سازند. این لایه ها ضخامتی در حدود ۹۶ نانومتر دارند.



شکل ۳-۴: Aggregate های سیلیکاتهای لایه ای [۳۸]

با توجه به طبیعت پیوند بین این اتمها، انتظار می رود این مواد خواص مکانیکی فوق العاده ای را در جهت موازی با این لایه ها نشان دهند ولی خواص مکانیکی دقیق این لایه ها هنوز شناخته نشده اند. اخیراً با استفاده از روشهای مدل سازی تخمین زده شده که مدول در راستای لایه ها، پنجاه تا چهارصد برابر بیشتر از یک پلیمر عادی است. صدها یا هزاران عدد از این لایه ها بوسیله یک نیروی واندروالسی ضعیف، روی هم انباشته می شوند تا یک جزء نانو را تشکیل دهند. با یک پیکربندی مناسب این امکان وجود دارد که نانوها را به اشکال و ساختارهای گوناگونی، درون یک پلیمر، به شکل سازمان یافته قرار دهیم.

مهمترین مشخصه های نانو با هدف افزایش سازگاری با فاز زمینه پلیمری و بهبود خواص نانوکامپوزیت

عبارت است از:

۱- میزان خلوص

۲- ظرفیت تبادل کاتیونی

۳- نسبت منظر (Aspect Ratio)

۱- میزان خلوص:

خلوص نانو یکی از خواص بحرانی و مهم برای بدست آوردن نانوکامپوزیتی با حداکثر بهبود در خواص است. به عنوان مثال یکی از کاربردهای نانوکامپوزیتهای نانو - پلیمر در صنایع بسته بندی مواد غذایی است و چنانچه نانو استفاده شده در ساختمان نانوکامپوزیت، ناخالصی بالایی داشته باشد باعث کدر شدن ظروف بسته بندی می شود.

۲- ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC):

در نانوهای مختلف به دلیل جایگزینی آلومینیم سه ظرفیتی با منیزیم یا آهن دو ظرفیتی روی سطح لایه های سیلیکاتی باری منفی ایجاد می شود. حال هرچه این ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر باشد، امکان جایگزینی میزان بالاتری از عامل اصلاح کننده روی سطوح لایه های نانو وجود دارد.

۳- نسبت منظر:

گونه های مختلف نانو دارای خواص منحصر به فردی هستند و آن صفحه ای بودن ساختمان آنهاست. ضخامت این صفحات حدود ۱ نانومتر است و دوبعد دیگر آنها دارای اندازه های میکرونی است که در نهایت

نسبت منظر آنها (نسبت عرض به ضخامت) در محدوده ۱۵۰۰-۳۰۰ است. بالا بودن نسبت منظر و سطح ویژه ($700\text{ m}^2/\text{gr}$) مونت موریلونیت از عوامل مهم استفاده از مونت موریلونیت در نانو کامپوزیتها است. برای انتخاب نانو مناسب در تهیه نانوکامپوزیت پلیمری، موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرند:

۱- نوع نانو

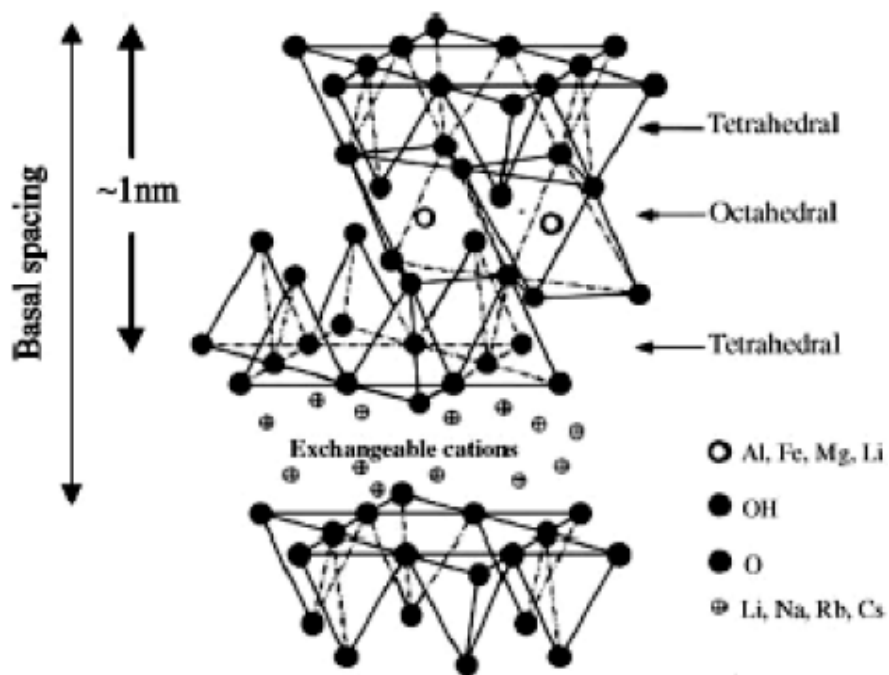
۲- اندازه ذرات

۳- میزان سازگاری آن با پلیمر که خود تابعی از نحوه اصلاح و نوع ماده ارگانوفیل (Organofil) استفاده شده در افزایش فاصله بین لایه های آن است.

۴- مقدار یا غلظت فیلر نسبت به پلیمر

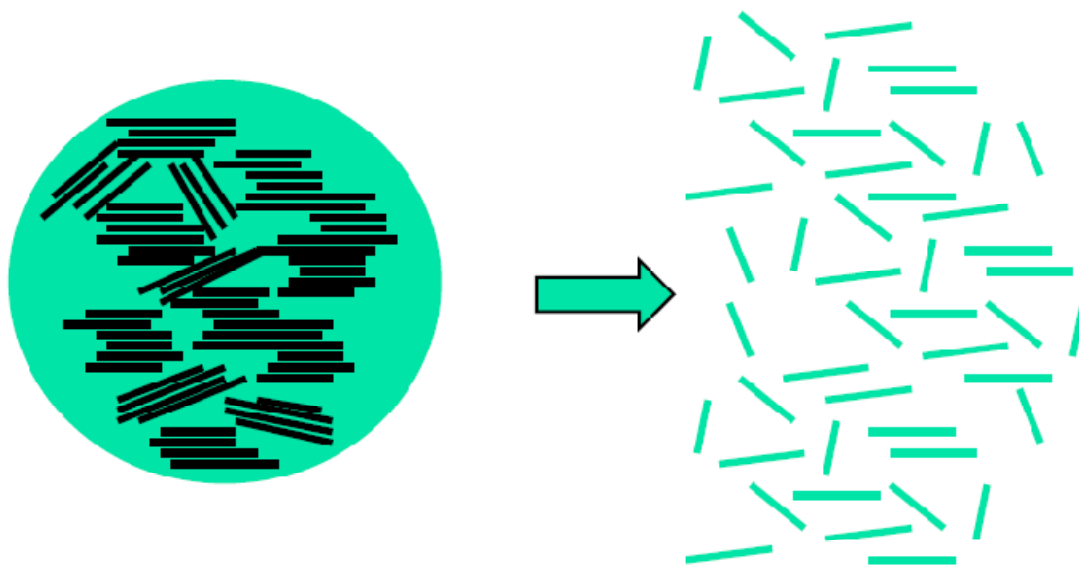
ذرات سیلیکاتهای لایه ای دارای استحکام، سفتی و نسبت ابعادی بالایی هستند که این موارد در تمام انواع جامدات لایه ای دیده می شود، اما نانو های از نوع اسمکتیت مانند مونت موریلونیت به دو دلیل استعداد بیشتری برای مصرف در ساخت نانوکامپوزیت ها دارند. اول این که این مواد در طبیعت به وفور یافت می شوند، از نقطه نظر کانی شناسی دارای خلوص بالایی هستند و قیمت پایینی دارند. دلیل دوم ساختار شیمیایی آنها است که با انجام اصلاحات سطحی، با پلیمرهای آلی سازگار می شوند [۴۱].

ابعاد جانبی لایه ها در خاک های اسمکتیت از سیصد آنگستروم تا چندین میکرون بسته به نوع سیلیکات متغیر است. این ساختار همچنین در تالک و میکا نیز دیده می شود، اما تفاوت آنها با تالک و میکا در میزان سلول واحد لایه آنها است. این میزان بار امکان فرآیند تعویض کاتیون را در این خاک ها فراهم می آورد، در حالی که این امر در مورد تالک و میکا امکان پذیر نیست [۳۶]. ساختار مونت موریلونیت که یک سیلیکات لایه ای اسمکتیت است در شکل ۴-۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۴: ساختار سیلیکات لایه ای مونت موریلونیت [۳۶]

اصلی که در نانوکامپوزیت های خاک رس/پلیمر رعایت می شود، این است که نه تنها ذرات نانو را از هم جدا می کنند، بلکه لایه های هر ذره را نیز از هم جدا می کنند. با انجام این عمل، خواص مکانیکی فوق العاده هر لایه نیز بطور موثر بکار می آید و این در حالی است که در اجزای تقویت شده خواص مکانیکی نیز بطور چشمگیری افزایش پیدا می کند، زیرا هر جزء نانو خود از صدها تا هزاران لایه تشکیل شده است.



شکل ۴-۵: نانو آلی پودری شکل با متوسط اندازه ذرات ۸ میکرومتر که در هر ذره پودری بیشتر از ۳۰۰۰ صفحه وجود دارد [۳۶]

- خصوصیات نانوکامپوزیت ها

نانوکامپوزیت هایی که دارای مقدار اندکی نانو (وزنی $< 5\%$) هستند، بهبود زیادی در خواص مکانیکی نسبت به پلیمر خالص نشان می دهند. این بهبودها شامل مدول بالا، افزایش استحکام و مقاومت گرمایی، کاهش در عبور پذیری گاز و اشتعال پذیری می باشند. دلیل اصلی این بهبود در خواص نانوکامپوزیت ها به برهم کنش قوی بین ماتریس و لایه های سیلیکات در مقایسه با سیستم های کامپوزیتی قدیمی می باشد.

برتری نانوکامپوزیتها در خصوصیات مکانیکی و خصوصیات خصوصیات کششی در مقالات مختلف تأیید شده است. نانوکامپوزیتهای پلیمری دارای مدول بالاتری نسبت به پلیمرهای عادی بوده و لذا از استحکام بالاتری نیز بهره مند هستند. از طرفی این مواد به طور جالبی از ازدیاد طول بهتری نیز در نقطه شکست برخوردار هستند.

۴-۳- استفاده از نانو کامپوزیتهای پلیمری در قیر

تا کنون تحقیقات جامع و کاملی، به طور خاص بر روی قیرهای اصلاح شده توسط نانوکامپوزیتهای صورت نگرفته است. تحقیقات صورت گرفته بسیار ناقص بوده و آنالیز کاملی نیز از رفتار فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی این قیرها به دست نمی دهد. به عنوان مثال بر روی نحوه آلیاژ کردن پلیمر، قیر و نانوذرات و اولویت های عملیاتی هنوز به طور جدی صحبتی به میان نیامده است. تأثیر درصد پلیمر، نوع نانوذرات، منبع نفت خامی که قیر از آن بدست آمده است، نیروهای بین ذرات، نحوه آلیاژ کردن و بسیاری از موارد دیگر هنوز با شبهه های زیادی روبرو است.

استفاده از نانوکامپوزیتهای در قیر شاید از چند نظر پیچیده تر از دیگر کاربردهای این مواد باشند که این موضوع به طبیعت پیچیده قیر از یک طرف و پلیمرهای خاصی که جهت اصلاح قیر به کار می رود (مثل SBS) از طرف دیگر، وابسته است. در ضمن به دلیل قیمت نسبتاً پایین قیر، هنوز استفاده از پلیمرهای نسبتاً گران مثل SBS در برخی از کشورها مانند کشور ما، چندان توصیه شده نیست و همواره قیرهای اصلاح شده توسط SBS با دو پارامتر قیمت تمام شده آسفالت و عمر آسفالت دست و پنجه نرم می کند.

افزودن نانوذرات به سیستم قیر و پلیمر مطمئناً استحکام سیستم و مدول آن را افزایش می دهد. نانوذرات بر روی خواص کشسانی و الاستیک قیرهای اصلاح شده توسط پلیمرها نیز احتمالاً اثر مثبتی می گذارد. اما مهمترین اثرات این مواد چیز دیگری است. همانطور که می دانیم قیر و SBS به دلیل ساختار غیر اشباع و وجود پیوندهای از نوع پای در ساختارشان همواره در معرض پیرشدگی قرار دارند و احتمال اکسید شدن قید و تنزل SBS همیشه وجود دارد که این یکی از معضلات همیشگی قیرهای اصلاح شده توسط SBS می باشد. در اثر آلیاژ کردن صحیح این قیرها با نانوذرات، اجازه نفوذ اکسیژن درون ساختار قیرهای اصلاح شده گرفته می شود و تجربه نشان داده است که قیرهای پلیمری اصلاح شده توسط نانوذرات کمتر پیر می شوند.

همانطور که قبلاً نیز شرح دادیم، جدا شدن فاز های غنی از پلیمر و غنی از آسفالتن همواره یکی از مشکلات قیرهای پلیمری می باشد. در اثر افزودن نانوذرات به قیرهای اصلاح شده پلیمری، قیر و پلیمر در بین لایه های نانوذرات نفوذ کرده و ساختار اینترکلیت یا اکسفولیت را تشکیل می دهد. قیر و پلیمر در فضای بین صفحات جا می گیرند و به دلیل تعادل ترمودینامیکی تمایلی به خارج شدن از این وضعیت را ندارند. لذا مخلوط حاصله دارای پایداری انبارداری مناسبی بوده و جدا شدن فازها به دلیل Interaction بالای قیر/پلیمر/نانوذرات در فصل مشترک میان آنها به حداقل می رسد.

چنانچه نانوذرات ما به درستی مخلوط شوند و موفق به جلوگیری از پیرشدگی و افزایش پایداری انبارداری شوند، در کنار مزیت های دیگر، مطمئناً این ترکیبات مورد استقبال خوبی واقع می شوند. هدف اصلی این پروژه در استفاده از نانوذرات، اثبات حقانیت مطالب فوق و تأیید نظریات تئوری به کمک آزمایش های متعدد بر روی آلیاژ قیر/پلیمر/نانوذرات می باشد [۷۰ و ۸۲].

فصل پنجم:
روش انجام آزمایش ها

روش انجام آزمایش ها

۱-۵- تست های رایج قیر

جهت بررسی عملکرد قیر، آزمایشهای گوناگونی را بر روی آن باید انجام داد. به کمک این آزمایشها خواص فیزیکی، مکانیکی، مورفولوژی، رئولوژی و ... قیر را می توان تعیین نمود. در بخش - های بعد می توانیم اثر افزایش پلیمرها به قیر را بر روی نتایج بدست آمده از این آزمایشها، در قیاس با قیر خالص بررسی نماییم.

بطور کلی آزمایشهای انجام شده بر روی قیر از دو دسته هستند. آزمایش های قدیمی که مطابق با استانداردهای ASTM و AASHTO معمولاً تعیین می گردند و آزمایشهای شارپ که چند سالی است بطور جدی در کشور آمریکا و بسیاری از کشورهای اروپایی بکار گرفته می شوند. تست های شارپ معمولاً در حالت دینامیک انجام می شوند، تا رفتارهای قیر را با تغییرات زمان بررسی کند.

۱-۱-۵- تست تعیین درجه نفوذ قیر (ASTM : D5)

آزمایش تعیین درجه نفوذ (Penetration) برای تعیین قابلیت نفوذ پذیری قیرها بکار می رود. برای این آزمایش، یک سوزن فولادی متصل به وزنه ۱۰۰ گرمی را در دمای 25°C بر روی قیر به مدت ۵ ثانیه قرار می دهند و میزان نفوذ این سوزن را بر حسب دهم میلیمتر بیان می کنند. در این آزمایش، پس از گرم کردن و هم زدن قیر، آن را داخل ظرف مخصوص ریخته و پس از رسیدن به دمای محیط، به مدت یک ساعت در آب 25°C قرار داده، سپس ظرف حاوی نمونه را زیر سوزن دستگاه نفوذسنج برده و سوزن را با سطح نمونه تماس می کنند و تحت نفوذ وزنه ۱۰۰ گرمی به مدت ۵ ثانیه قرار می گیرد. میزان نفوذ سوزن به داخل قیر از روی درجه بندی دستگاه بر حسب دهم میلیمتر قرائت و به عنوان درجه نفوذ یادداشت می گردد. درجه نفوذ کمتر، به معنی قیر سفت تر و درجه نفوذ بیشتر، به معنی قیر شل تر می باشد. [۷].

۱-۱-۱-۵- روش کار

ابتدا سوزن را با تولوئن یا حلال مناسب دیگر مانند بنزین شستشو می دهیم و کاملاً خشک می کنیم. اگر دستگاه نفوذسنج در درون حمام قرار دارد، ظرف حاوی نمونه ها بایستی کاملاً زیر آب قرار گیرد اما

اگر دستگاه نفوذ سنج خارج حمام واقع شده، بایستی روی نمونه موجود در ظرف را کاملاً با آب موجود در حمام با دمای ثابت پرنموده و سپس ظرف را در محل خود در زیر دستگاه قرار دهیم.

با توجه به نوع دستگاه سوزان را به آهستگی پایین آورده تا نوک سوزن با سطح نمونه تماس ایجاد کند. با یک منبع نوری می توان بهتر این قضیه را مشاهده کرد(خود دستگاه دارای یک منبع نوری می باشد). در این هنگام بسته به نوع دستگاه یا عددی را قرائت کرده یا دستگاه را صفر می کنیم. سپس بار را اعمال کرده و با دقت $0/1$ میلی متر میزان نفوذ را قرائت می نمایم. در هر ظرف نمونه سه بار این کار را در سه نقطه به صورت مثلثی تکرار می کنیم. این نقاط بایستی بیش از 10 میلی متر از یکدیگر و یا از جداره ظرف فاصله داشته باشند. همچنین هر بار بایستی نوک سوزن را کاملاً تمیز کرد. در نهایت میانگین سه میزان نفوذ را گزارش می کنیم. در شکل زیر نمونه ای از دستگاههای اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی نشان داده شده است [۷].



شکل ۵-۱: دستگاه اندازه گیری درجه نفوذ سوزنی مطابق با استاندارد ASTM D۵ [۶۴]

۵-۱-۲- تست تعیین نقطه نرمی قیر (ASTM : D۳۶)

قیرهای خالص در برابر افزایش درجه حرارت به تدریج از حالت جامد به حالت خمیری و در نهایت به حالت مایع تغییر حالت می دهند. سرعت تغییر حالت برای قیرهای مختلف متفاوت می باشد. نقطه نرمی یکی از معیارهایی است که در تعیین حساسیت قیرها نسبت به درجه حرارت بکار می رود. درجه حرارتی که قیر از حالت جامد به حالت روان در می آید، نقطه نرمی قیر نامیده می شود. قیری که درجه نرمی اش بیشتر باشد، کمتر در مقابل تغییرات درجه حرارت حساس بوده و درجه نفوذ یا کندروانی آن کمتر تغییر می کند.

آزمایش تعیین نقطه نرمی با روش حلقه و گلوله انجام می گیرد. در این روش ابتدا قیر گرم می شود، سپس قیر در داخل حلقه های مخصوص ریخته شده و سطح آن توسط کاردک گرم شده، صاف می گردد. حلقه ها در محل خود قرار داده می شوند. مجموعه در داخل ظرف محتوی آب 4°C قرار داده شده و گلوله ای فلزی با وزن و قطر معین روی قیر قرار می گیرد. به ظرف آب از پایین بطور یکنواخت با سرعت ۵ درجه در دقیقه حرارت داده می شود. درجه حرارتی که گلوله ها، تحت اثر وزن خود از داخل لایه قیر عبور کرده و با صفحه زیرین تماس حاصل می نماید، اندازه گیری شده و به عنوان نقطه نرمی قیر یادداشت می گردد [۷]. در شکل ۵-۲ یکی از مجهزترین دستگاههای اندازه گیری نقطه نرمی که به صورت اتوماتیک کار می کند، نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ : دستگاه اندازه گیری نقطه نرمی مطابق با استاندارد ASTM D۳۶ [۶۴]

این آزمایش برای تعیین نقطه نرمی مواد قیری که در دامنه ۳۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد قرار دارند بکار می رود. نقطه نرمی موادی که بین ۳۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد باشند از آب، ۸۰ تا ۱۵۷ درجه سانتی گراد از گلیسرین و ۳۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد از اتیلن گلیکول استفاده می شود.

۵-۱-۲-۱- آماده سازی نمونه

قیر را با دقت گرم می کنیم تا بتوان آن را در قالب مورد نظر ریخت. برای جلوگیری از گرم شدن موضعی و جلوگیری از ایجاد حباب هوا در نمونه آن را خوب هم می زنیم. قیر را آن قدر حرارت می دهیم تا کاملا سیال شود اما این دما در هیچ حالت نباید بیش از ۱۱۰ درجه سانتی گراد بیشتر از نقطه نرمی قیر باشد. هر دو حلقه برنجی را تا دمای جاری شدن حرارت داده و آنها را روی یک صفحه ای که با مواد جداکننده قالب آغشته شده است قرار می دهیم. داخل هر یک از حلقه ها قیر داغ شده می ریزیم و اجازه می دهیم که نمونه ها حداقل ۳۰ دقیقه در دمای محیط سرد شوند.

برای موادی که در دمای اتاق نرم هستند نمونه ها را در هوایی با دمای ۱۰ درجه سانتی گراد برای حداقل ۳۰ دقیقه قرار می دهیم تا خنک شوند. مدت سرد شدن نمونه ها نباید بیش از دو ساعت طول بکشد. هنگامی که نمونه ها سرد شدند قیر های اضافی را با یک کاردک گرم شده یا اسپاتول تریم (Trim) می کنیم بطوری که سطح قیر با سطح حلقه یکسان شود.

۵-۲-۲-۱- فرآیند آزمایش

یکی از حمام ها و دماسنج ها را با توجه به نقطه نرمی مورد انتظار انتخاب می کنیم. اگر از حمام آب و اتیلن گلیکول استفاده می نمائید، دما را روی 5 ± 1 و برای گلیسرین روی 30 ± 1 درجه سانتی گراد تنظیم کنید. اگر از اتیلن گلیکول استفاده می شود آزمایش را زیر هود (hood) انجام داده و باید مطمئن شویم که فن هود روشن بوده و درست کار می کند. عمق مایع حمام باید 105 ± 3 میلی متر باشد. وقتی حمام به دمای مورد نظر رسید نمونه ها و گلوله ها را به مدت ۱۵ دقیقه در حمام قرار دهید تا با حمام هم دما شوند. حال حمام را از زیر گرم کرده بطوری که دما با سرعت پنج درجه سانتی گراد در دقیقه زیاد شود. دمای هریک از گلوله و حلقه ها را با استفاده از دماسنج در زمانی که قیر اطراف گلوله، پایین صفحه را لمس کند، ثبت کنید. این دما نقطه نرمی نمونه می باشد. اگر تفاوت میان دو دمای اندازه گیری شده با دو گلوله بیش از یک درجه سانتی گراد باشد، آزمایش را تکرار می کنیم [۷].

۵-۱-۳- تست کشش پذیری (ASTM : D۱۱۳)

قیری که در راه‌سازی به کار میرود باید دارای خاصیت چسبندگی زیاد باشد تا دانه‌های مصالح سنگی را به خوبی اندود کرده و آنها را به یکدیگر بچسباند. برای تعیین نشانه‌های از چسبندگی قیرها مقدار قابلیت شکل‌پذیری آنها اندازه‌گیری می‌شود، زیرا هر اندازه قیری چسبنده‌تر باشد دارای قابلیت شکل‌پذیری بیشتری خواهد بود. طبق تعریف قابلیت شکل‌پذیری (خاصیت انگمی) یک قیر عبارتست از میزان افزایش طولی که نمونه قیری با شکل و ابعاد معین می‌تواند کش بیاید تا پاره شود. سرعت کشش و دما، مقادیر مشخصی هستند، معمولاً دمای 25 ± 0.5 درجه و سرعت 5 ± 0.5 سانتی متر در دقیقه استفاده می‌گردند مگر اینکه مقادیر آن مشخص گردند [۷].



شکل ۳-۵: دستگاه Ductility [۶۴]

۵-۱-۳-۱- شرح آزمایش

قالب را روی یک صفحه برنجی قرار می‌دهیم. به منظور جلوگیری از چسبیدن نمونه به قالب بایستی تمام سطح قالب با یک لایه نازک از مخلوط گلیسرین و پودر تالک و یا روغن سیلیکون آغشته شود. از طرفی صفحه‌ای که قالب روی آن قرار می‌گیرد باید کاملاً صاف و مسطح باشد. نمونه را بایستی به دقت حرارت داد تا به صورت سیال درآید. به منظور جلوگیری از ایجاد حرارت موضعی باید در طی گرم کردن، نمونه را به دقت به هم بزیم، و پس از اینکه کاملاً بهم زده شد آن را درون قالب بریزیم. در ریختن قیر در قالب باید آن را از یک انتها به انتهای دیگر بریزیم تا قالب بیش از حد مشخص شده پر گردد. سپس باید اجازه داد تا به مدت ۴۰-۳۰ دقیقه در دمای اتاق سرد و به مدت ۳۰ دقیقه هم در حمام با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گیرد. سپس توسط کاردک سطح را صاف کرده تا سطح نمونه با سطح قالب کاملاً برابر

شود. نمونه و قالب را به مدت ۹۵-۸۵ دقیقه دیگر در حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داده و سپس نمونه را از قالب جدا کرده و سریعاً مورد آزمایش قرار دهیم.

حلقه های موجود در انتهای نمونه را بوسیله پیچ به دستگاه متصل کرده و با سرعت ثابت و از پیش تعیین شده آن را به حرکت در آورید تا زمانیکه نمونه پاره شود (دستگاه با سرعت پنج سانتی متر در دقیقه حرکت می کند). پنج درصد تغییر در سرعت قابل نظر است. مسافتی که گیره ها حرکت کرده اند تا نمونه پاره شود را برحسب سانتی متر یادداشت می نمایم. در طی انجام آزمایش آب بایستی حداقل ۲/۵ سانتی متر در بالا و پایین نمونه قرار داشته باشد و تغییرات دمای آب بایستی حداکثر ۰/۵ درجه سانتی گراد باشد [۷].

۵-۱-۴- نقاط اشتعال و احتراق (ASTM : D۹۲) Flash and fire point

درجه اشتعال قیر درجه حرارتی است که وقتی گرمای قیر به آن درجه حرارت می رسد، با نزدیک کردن شعله به سطح آزاد آن، جرقه ای در نقطه ای از سطح قیر تشکیل شود. این آزمایش دارای اهمیت زیادی است زیرا با تعیین درجه اشتعال قیر، حداکثر درجه حرارتی را که بدون خطر آتش سوزی می توان قیر را گرم کرد، بدست آورد. این آزمایش با استفاده از ظرف روبازی که نمونه در آن قرار داده شده و به آن از پایین حرارت داده می شود، انجام می گیرد. درجه حرارت در هر لحظه به کمک دماسنج مشخص شده و درجه حرارتی که در آن با نزدیک کردن شعله ای به سطح قیر، گازهای حاصل مشتعل می گردد، به عنوان درجه اشتعال قیر مورد نظر گزارش می شود.

درجه حرارت قیر در هر لحظه به کمک میزان آزمایش تعیین درجه اشتغال ممکن است که با استفاده از وسیله رو بسته و در حالی که نمونه قیر در ضمن گرم شدن هم زده می شود، انجام گیرد. در این صورت حتی مقادیر جزئی بخارات قابل اشتغال قیر مورد آزمایش جمع آوری شده و از این جهت درجه اشتغالی که در این روش تعیین می شود تا حدودی کوچکتر از درجه اشتغالی است که در روش ظرف روباز بدست می آید.

۵-۱-۴-۱- شرح آزمایش

برای انجام این تست، فنجان تست را تا سطح معین از نمونه پر می کنیم. درجه حرارت نمونه را ابتدا به سرعت و سپس در حوالی نقطه اشتعال، با یک سرعت ثابت آهسته تر، افزایش می دهیم. در فواصل زمانی

معین یک شعله تست کوچک را از روی فنجان عبور می‌دهیم. پایین‌ترین درجه حرارتی که در آن بخارات روی نمونه، بر اثر اعمال شعله تست، یک جرقه کوتاه بزنند را نقطه اشتعال (Flash p.) می‌نامند.



شکل ۵-۴: دستگاه Flash and fire point

۵-۱-۵- تست تعیین ویسکوزیته (ASTM : D۲۱۷۰)

مقاومت سیالات در مقابل جاری شدن را ویسکوزیته گویند. قیر خالص در درجه حرارت محیط، حالت جامد یا نیمه جامد داشته و در اثر افزایش درجه حرارت، حالت خمیری و سپس مایع پیدا می‌کند. با افزایش درجه حرارت، ویسکوزیته قیر کاهش می‌یابد. ویسکوزیته قیر یکی از عوامل اصلی در نحوه ساخت و اجرای مخلوطهای آسفالتی و همچنین کیفیت آسفالت ساخته شده می‌باشد. مثلاً برای بدست آوردن دمای اختلاط قیر و مصالح و دمای تراکم آسفالت، ویسکوزیته را در دمای 135°C و $98,9^{\circ}\text{C}$ اندازه گیری می‌نمایند و با استفاده از صفحات نیمه لگاریتمی این دو دما را بدست می‌آورند. روشهای مختلفی جهت تعیین میزان ویسکوزیته قیرهای خالص ارائه گردیده که متداولترین آنها روش آزمایشی ویسکوزیته سینماتیک می‌باشد. در این روش قیر در داخل لوله شیشه ای U شکل ریخته شده و در دمای 135°C تحت تأثیر وزن خود یا اختلاف فشار در آن به حرکت درآورده می‌شود. مدت زمانی را که قیر داخل لوله، فضای معینی را پر می‌کند اندازه گیری می‌شود. از ضرب زمان اندازه گیری شده در ضریب کالیبراسیون لوله، ویسکوزیته سینماتیک استوکس بدست می‌آید [۷].

همانطور که ذکر شد برای تعیین ویسکوزیته قیر روش های متعددی وجود دارد (به عنوان مثال ویسکوزیته سیبولت فورال). اما تمامی روش های دیگر به نوعی منسوخ می باشند و روش ویسکوزیته سینماتیکی در دماهای ذکر شده معروفترین روش مطرح است (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵ : دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته سینماتیکی مطابق با ASTM D۲۱۷۰ [۶۴]

۵-۱-۶- آزمایش نقطه شکست^۱ (IP : ۸۰)

هدف از این آزمایش تعیین نقطه شکست مواد قیری در دماهای پایین می باشد. در این آزمایش سطح یک پلاک فلزی استیل نازک فنی از نمونه آزمایشی پوشیده می شود و تحت شرایط آزمون در حالیکه دما بتدریج کاهش داده می شود خم می گردد تا در سطح پوشش قیری ترک مشاهده گردد. نقطه شکست دمائی است که در آن اولین شکست در سطح قیر حاصل آید. برای هر آزمایش، سه پلاک آماده می گردد. مقدار ۰,۴-۰,۶ گرم از نمونه قیری را روی صفحه فلزی انعطاف پذیری به شکلی یکنواخت و با کنترل سرعت حرارت دهی پخش می کنند. پس از سرد شدن این فیلم نازک، قبل از آزمایش یک تا چهار ساعت پلاکها بصورت ایستاده نگه داشته می شوند. هنگام انجام آزمایش، پلاکها را در جای خود قرار داده و دور محفظه را استن می ریزند. سپس با افزودن هوای مایع، دمای اطراف را با سرعت یک درجه در دقیقه پایین می

^۱ Fross point

آورند. هنگامیکه به دمای حداقل 10°C بالای نقطه شکست مورد انتظار رسیدند در هر دقیقه پلاک را با چرخاندن دستگیره و با شدت یک دور در ثانیه خم می نمایند و نمونه را بازرسی کرده و دستگیره را با همان سرعت بر می گردانند و این کار را آنقدر تکرار می کنند تا اولین شکست در سطح فیلم مشاهده گردد [۴]. شمایی از آزمایش نقطه شکست در شکل ۵-۶ آورده شده است.



شکل ۵-۶: شمایی از دستگاه تعیین نقطه شکست [۶۴]

۷-۱-۵- وزن مخصوص قیرهای جامد و نیمه جامد Specific Gravity by Nickel

(ASTM : D۲۳۸۹-۷۸) Crucible

وزن مخصوص، نسبت حجم معینی از ماده داده شده به وزن هم حجم آن آب در دمای 60°F یا 77°F ($15/6^{\circ}\text{C}$ یا 25°C) را گویند که به صورت وزن مخصوص $77/77^{\circ}\text{F}$ یا $60/60^{\circ}\text{F}$ ($15/6/15/6^{\circ}\text{C}$ یا $25/25^{\circ}$) گزارش می کنند.

جهت انجام این تست نمونه را داخل نیکل گروسبیل می ریزند وزن آنرا یکبار در هوا و یکبار در آب (در دمای تست) به دست می آورند. سپس مقادیر به دست آمده را توسط وزن ظرف نیکل گروسبیل خالی در هوا و آب (در دمای تست) تصحیح می کنند. وزن مخصوص با توجه به قانون ارشمیدس محاسبه می کنند [۷].

۵-۱-۸- تعیین PI (Penetration Index) و PVN

با توجه به نتایج حاصل از آزمایشهای قیر، مقدار نشانه نفوذ (PI) و نشانه نفوذ اصلاح شده (PVN) برای قیر مورد نظر با روابط زیر محاسبه می گردد [۶]:

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (1)$$

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}PEN(25^\circ C)}{T_{R\&B} - 25} \quad (2)$$

$$PVN = -1.5 \left(\frac{L - \text{Log}V}{L - M} \right) \quad (3)$$

که پارامترهای موجود در روابط فوق عبارتند از:

V: ویسکوزیته قیر در دمای $135^\circ C$ بر حسب سانتی استوکس

L: (درجه نفوذ در $25^\circ C$) $L = 4.258 - 0.7967 \text{Log}$

M: (درجه نفوذ در $25^\circ C$) $M = 3.46289 - 0.61094 \text{Log}$

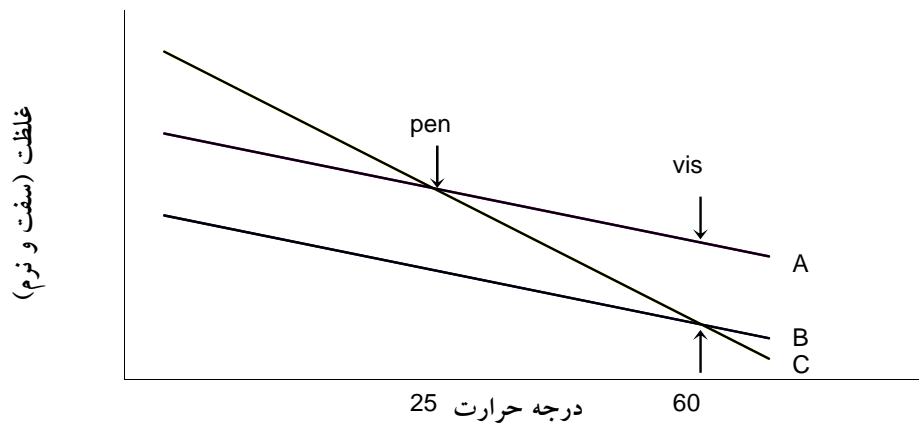
۵-۲- آزمایش های شارپ (SHRP) بر روی قیرها

آزمایشات فعلی قیرها اکثراً آزمایشات تجربی بوده اند که بر پایه تجربه نیم قرن اخیر تدوین گشته اند و تا حدودی گویای خواص قیر هستند اما اغلب آنها با شرایط راه همخوانی ندارند. به منظور نشان دادن کاستی های سیستم درجه بندی قیرها بر پایه درجه نفوذ یا ویسکوزیته، مثال زیر آورده می شود:

در شکل ۵-۷ سه نوع قیر که از نظر درجه بندی ویسکوزیته ای یک نوع محدوده دارند نشان داده شده است (هر سه در $60^\circ C$ در محدوده استاندارد قرار دارند). در حالیکه قیرهای A و B حساسیت حرارتی یکسانی دارند اما از نظر میزان روانی متفاوتند بطوریکه قیر A در تمام درجه حرارت-ها سفت تر از قیر B است.

قیر A و C هر دو از نظر درجه نفوذ یکسان هستند اما در درجه حرارت های بالا و پایین این قیرها درجه روانی و سفتی کاملاً متفاوتی از خود نشان می دهند. قیر B و C نیز در دمای $60^\circ C$ روانی یکسانی دارند، اما به نظر نمی رسد تشابهی با قیر A داشته باشند گر چه از نظر درجه بندی هر سه قیر در یک

محدوده می باشند. استانداردهای فعلی نواقص زیر را برای تشابه با شرایط راه دارند:



شکل ۵-۷: سه نوع قیر از نظر درجه بندی ویسکوزیته ای

- ۱- عدم اندازه گیری خصوصیات قیر در حرارت های پایین
 - ۲- عدم تطابق شرایط فیزیکی آزمایشات با شرایط واقعی راه
 - ۳- عدم تناسب آزمایشات برای اندازه گیری خصوصیات قیر در حرارت های بالا
 - ۴- عدم پیشگویی چگونگی سخت شدن قیر در طول زمان [۹].
- بر اساس موارد ذکر شده در فوق، تحقیقات شارپ (Strategic Highway Research Program) به منظور تعیین استانداردهای مؤثر برای قیر منجر به آزمایشات زیر شده است.

۵-۲-۱- آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (ASTM :D۲۸۷۲)

این آزمایش برای شبیه سازی پیر شدگی قیر در هنگام ساخت در کارخانه آسفالت است و حدود ۸۵ دقیقه بطول می انجامد. به سبب آنکه در آزمایش RTFO نمونه ها در حال چرخش و دوران هستند و مرتباً مخلوط می شوند، برای قیرهای اصلاح شده مناسب تر است (شکل ۵-۸).



شکل ۸-۵: دستگاه RTFO [۶۴]

هدف از این آزمایش تعیین اثر توأم حرارت و هوا بر روی فیلم متحرکی از قیر می باشد. هشت بطری نمونه برای آزمایش Superpave قیر مورد نیاز است. دو بطری برای تعیین اتلاف جرم مورد نیاز است و شش بطری برای آزمایش های دیگر مورد استفاده قرار می گیرند برای این منظور حدود ۳۵ گرم قیر در هشت استوانه شیشه ای حاوی قیر که بصورت افقی در یک دیسک گردان عمودی قرار داده شده اند ریخته می شود و سپس دمای اجاق را به 163°C می رسانند. سپس دیسک به مدت ۸۵ دقیقه با شدت 15 r/min شروع به گردش کرده و در همین زمان در هر لحظه، هوا با شدت 4000 ml/min به داخل استوانه ها دمیده می شود. آنگاه تغییرات درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته و ... اندازه گیری می شود. این آزمایش، نوعی شبیه سازی از پیری قیر در هنگام اختلاط با مصالح و عملیات راهسازی می باشد [۷و۴].



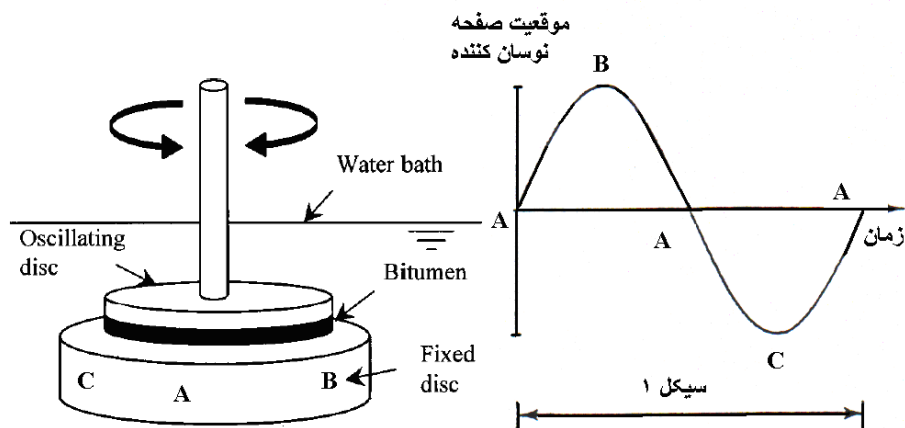
شکل ۹-۵: بطری های مخصوص دستگاه RTFO

۲-۲-۵- رئومتر برش دینامیکی (Dynamic Shear Rheometer)

برای بررسی رفتار قیر، آزمایش مطلوب آنست که اثر مدت بارگذاری و دما را لحاظ کند. در دیگر زمینه های مهندسی، به ویژه در صنایع پلاستیک، دستگاهی به نام رئومتر دینامیکی برشی یا DSR مورد استفاده قرار می گیرد. این دستگاه می تواند "مدول پیچیده تنش برشی" و "زاویه اختلاف فاز" را در دمای بالا اندازه گیری نماید.

اصول اولیه این دستگاه بسیار ساده است. قیر بین یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک که دارای حرکت چرخشی است مقدار کمی فشرده می شود. سپس صفحه متحرک خود را از نقطه A به سمت B و سپس از B به A و C و بازگشت به A را انجام می دهد (شکل ۱۰-۵). مسیر طی شده، به شرح فوق یک سیکل را تشکیل می دهد.

دو نوع متداول این دستگاه وجود دارد: یکی در تنش ثابت و دیگری در کرنش ثابت. آزمایش-های شارپ معمولاً در حالت کرنش ثابت انجام می‌شود. بدین صورت که یک کرنش ثابت برای چرخش صفحه متحرک از نقطه A به B اعمال می‌شود.

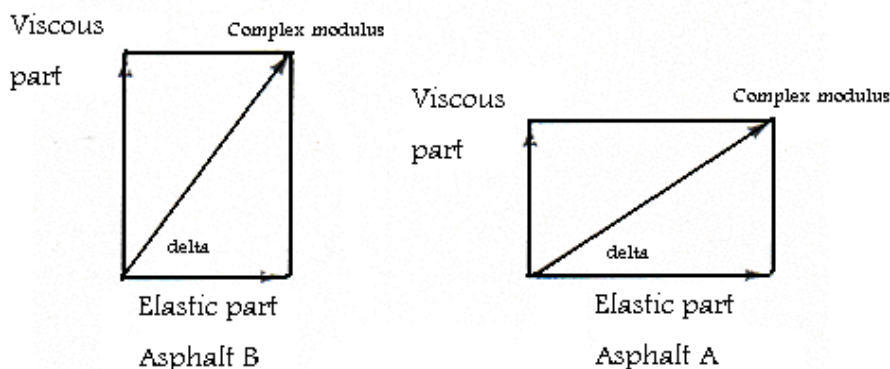


شکل ۵-۱۰: اصول آزمایش برش دینامیکی [۶۴]

از مقاومت قیر در برابر تنش برشی مکرر، مقدار مدول برش پیچشی (G^*) بدست می‌آید. این مدول، ترکیبی از دو قسمت است: یکی قسمت الاستیک (برگشت پذیر) و دیگری قسمت ویسکوز (برگشت نا پذیر). اختلاف فاز (δ) نشان دهنده مقدار نسبی تغییر شکل برگشت پذیر به برگشت ناپذیر می‌باشد.

مقادیر عددی G^* و δ برای قیر بستگی زیادی به درجه حرارت دارند. در درجه حرارت های بالا، قیر مانند مایع عمل کرده و در درجه حرارت های خیلی پایین مانند مواد جامد الاستیک رفتار می‌کند. در دمایی که بارگذاری ترافیکی بر روی روسازی اعمال می‌شود رفتار قیر مجموعه ای از ویسکوز و الاستیک می‌باشد. به همین جهت رفتار آنرا ویسکوالاستیک (Viscoelastic) می‌نامند [۷ و ۱۲].

در شکل ۵-۱۱ اگرچه مقدار G^* برای قیر A و B یکسان است، قیر A دارای خاصیت الاستیک بیشتری از قیر B می‌باشد و بالعکس. بنابراین فقط مقدار G^* کافی نیست بلکه زاویه δ نیز برای بیان رفتار قیر لازم است. مقدار زاویه اختلاف فاز δ برای مواد کاملاً الاستیک، صفر و برای مواد کاملاً ویسکوز ۹۰ درجه می‌باشد [۹، ۱۱ و ۱۲].



شکل ۵-۱۱: دو نوع قیر که دارای G^* یکسان ولی خواص متفاوتند

تغییر شکل دائمی با محدود ساختن مقدار $G^*/\sin\delta$ در دمای آزمایش، کنترل می شود. مقدار مجاز، بالاتر از $1,0\text{ kPa}$ (برای قیر پیر نشده) و $2,2\text{ kPa}$ (برای قیر بعد از آزمایش RTFO) می باشد. ترک های ناشی از خستگی با محدود ساختن $G^* \times \sin\delta$ برای قیر پیر شده سریع (Viscous) به مقدار کمتر از 5000 kPa کنترل می شود. این روش برای دمای بین 5°C تا 85°C که مقدار G^* بین $0,1$ تا 10000 kPa است، متناسب است [۱۰ و ۱۱].

روش آزمایش بدین طریق است که یک قرص ساخته شده از قیر که قطر آن با قطر صفحه چرخنده یکسان است برای آزمایش بکار می رود. ضخامت قرص قیر بستگی به درجه حرارت آزمایش دارد. برای دمای پایین در محدوده 7°C تا 34°C احتیاج به ضخامتی در حدود 2 میلیمتر است. برای دماهای بالاتر از 52°C ضخامت قرص بایستی کمتر باشد (در حدود 1 میلیمتر). قطر صفحه چرخنده نیز به دما بستگی دارد. در دمای بالا از صفحه چرخنده بزرگ (25 mm) و در دمای پایین از نوع کوچک آن (8 mm) استفاده می شود.

قیر بین صفحه ثابت و صفحه چرخنده فشرده شده تا ضخامت لازم برای دمای مورد نظر بدست آید. با اندازه گیری تنش و کرنش برشی مقدار G^* از رابطه زیر بدست می آید:

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{2T}{nr^3} \quad (5)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{\theta r}{h} \quad (6)$$

که پارامترهای موجود در روابط فوق عبارتند از:

T: حداکثر تنش پیچشی اعمال شده

r: شعاع قرص قیر چرخنده

θ : زاویه تغییر شکل

h: ضخامت قرص قیر (۱ یا ۲ میلیمتر)

در شکل ۵-۱۲ یک دستگاه اتوماتیک DSR نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: دستگاه رئومتر برش دینامیکی

۵-۲-۳- رئومتر تیرچه خمشی (Bending Beam Rheometer)

از آنجاییکه قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی توان با استفاده از رئومتر دینامیکی برشی بدست آورد. بدین منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خزشی بدست می آید استفاده می شود.

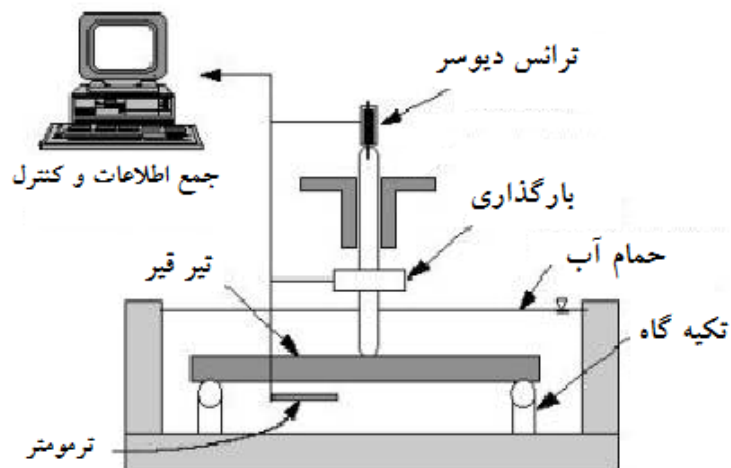
در رئومتر تیرچه خمشی، تیرچه ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دوره عمرش تحمل می کند، مورد آزمایش قرار می گیرد. اساس این آزمایش بر این اساس استوار است که در

دمای پایین، قیر عمدتاً رفتار الاستیک دارد. تیرچه قیری به مدت ۴ دقیقه تحت بار ثابت قرار می‌گیرد و مقدار افت و خیز حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه‌گیری می‌شود. از این آزمایش که در دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقه مورد نظر انجام می‌شود، سختی خزشی که بیانگر مقاومت آسفالت تحت اثر بار ثابت است و شیب یا نرخ خزش (m) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می‌باشد، بدست می‌آید [۷].

آزمایش بدین صورت انجام می‌گیرد که تیرچه قیری با ریختن قیر داغ در قالب‌های مکعب مستطیل ساخته می‌شود. پس از حدود ۴۵ الی ۶۰ دقیقه قیر اضافی را با یک کاردک داغ تراشیده و نمونه را همراه قالب به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه بایستی در داخل فریزر قرار داد. پس از جداسازی نمونه از قالب آن را به مدت ۶۰ دقیقه در داخل حمام رنومتر قرار داده تا دما به وضعیت تعادل برسد. پس از این مدت تیرچه قیری بر روی تکیه‌گاهها گذاشته شده و باری حدود ۳ تا ۴ گرم بر آن وارد می‌شود. سپس بار ۱۰۰ گرمی بصورت اتوماتیک به مدت ۱ ثانیه توسط دستگاه وارد می‌شود و به مدت ۲۰ ثانیه برداشته می‌شود. پس از این مدت بار ۱۰۰ گرمی به مدت ۲۴۰ ثانیه اعمال می‌شود و افت و خیز حاصله نیز همزمان اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵-۱۳ و ۵-۱۴). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می‌توان سختی خزش و مقدار m را بدست آورد. بر اساس آیین‌نامه شارپ مقدار m در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰,۳ باشد [۱۱۰].



شکل ۵-۱۳: رنومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۵-۱۴: شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

۵-۲-۴- آزمایش کشش مستقیم (Direct Tensile Strain)

موادی مانند قیر که قبل از بروز شکست مقدار کشیدگی زیادی در آنها ایجاد می شود، کشسان (Ductile) نامیده می شوند. در مواد شکننده (Brittle) برخلاف دسته قبل بدون کشیدگی، شکست رخ می دهد. تحقیقات شارپ نشان داده است که قیرهای سفت، شکننده تر از قیرهای نرم می باشند. همانگونه که ذکر شد سختی خزشی حاصل از رئومتر تیرچه خمشی برای بدست آوردن نقطه شکست بطور کامل کفایت نمی کند. به این سبب آزمایش کشش مستقیم توسط محققین شارپ پیشنهاد شده است. این آزمایش در دمای بین ۰ تا -36°C ، که قیر رفتاری شکننده دارد انجام می شود. مقدار کرنش در هنگام شکست بصورت زیر محاسبه می شود:

$$E_r = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

که پارامترهای موجود در رابطه فوق عبارتند از:

E_r : کرنش هنگام شکست

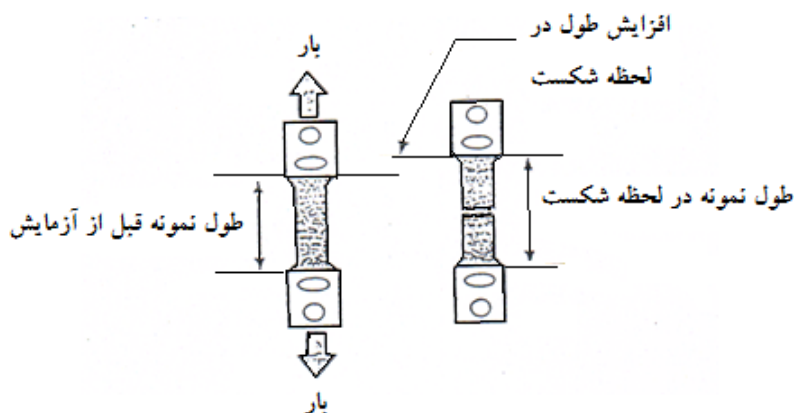
ΔL : تغییرات حاصله در طول نمونه

L : طول اولیه نمونه

آئین نامه شارپ حداقل کرنش در هنگام شکست را یک درصد تعیین می کند. حدود ۲ گرم قیر را در

قالبی به طول ۱۰۰ میلی‌متر می‌ریزیم. بعد از سرد شدن آنرا از قالب خارج کرده و پس از حدود ۱ ساعت، مورد کشش قرار می‌دهیم. نرخ کشش ۱,۰ میلی‌متر در دقیقه می‌باشد و نحوه اتصال نمونه به دستگاه باید به گونه‌ای باشد که هیچگونه خمشی در نمونه ایجاد نشود. از آنجاییکه کشش در دمای بسیار پایین انجام می‌گیرد، مقدار کرنش بسیار کم خواهد بود. بنابراین از یک میکرومتر لیزری برای اندازه‌گیری کرنش استفاده می‌نمایند [۷].

میانگین نتایج آزمایش کشش بر روی چهار نمونه بایستی گزارش شود. اگر شکست در قسمت میانی نمونه باشد، آزمایش قابل قبول قلمداد می‌شود. حداقل مقدار قابل قبول برای کرنش در حالت شکست یک درصد می‌باشد [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. شکل ۵-۱۵ نحوه انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۵: اصول آزمایش کشش مستقیم (DTT) [۶۴]

۵-۲-۵- ویسکومتر چرخشی (Rotary Viscometer)

این آزمایش برای حصول اطمینان از قابلیت پمپاژ قیر در پالایشگاه، ایستگاه بارگیری، کارخانه آسفالت و برای ارزیابی کارایی بتن آسفالتی در دمای بالا کاربرد دارد و ویژگیهای روانی قیر در دمای بالا را بررسی می‌کند و در استاندارد ASTM D۴۴۰۲، ویسکومتر بروکفیلد نامیده شده است. برخلاف ویسکومترهای سینماتیکی و دینامیکی (مطلق) که براساس جریان قیر در یک لوله موئینه کار می‌کنند، این نوع ویسکومتر

دارای محفظه بزرگتری است و برای قیرهای اصلاح شده و یا نشده کاربرد دارد. با استفاده از این نوع ویسکومتر می توان منحنی های ویسکوزیته - دما، که برای تخمین دمای اختلاط و تراکم مخلوط های آسفالتی لازم است، را بدست آورد.

ویسکوزیته چرخشی با اندازه گیری تنش پیچشی مورد نیاز برای ثابت نگهداشتن سرعت چرخش همزن استوانه ای در دمای ثابت تعیین می شود. مقدار تنش پیچشی مورد نیاز مستقیماً قابل تبدیل به ویسکوزیته نمونه قیر می باشد.

برای این آزمایش حدود ۱۰ گرم قیر به قدری حرارت داده می شود تا روان شود. تحت هیچ شرایطی نمونه نباید بیش از 150°C حرارت داده شود. پس از روان شدن قیر، نزدیک ۱۰ گرم آنرا در درون محفظه مخصوص دستگاه ریخته و برای رسیدن به حالت تعادل دما در 135°C ، حدود ۱۵ دقیقه زمان لازم است. پس از آنکه دما به حالت ثابت رسید، اپراتور می تواند مقدار ویسکوزیته را از روی نمایشگر دستگاه بخواند (شکل ۵-۱۶). سه مشاهده برای ویسکوزیته در فواصل زمانی یک دقیقه ای بایستی انجام شود.



شکل ۵-۱۶: شمای کلی آزمایش ویسکوزیته دورانی [۶۴]

سرعت دوران موتور ۲۰ دور در دقیقه می باشد و نمایشگر دستگاه مقدار ویسکوزیته را بر حسب سانتی پواز (cP) نشان می دهد درحالیکه آئین نامه شارپ ویسکوزیته را بر حسب پاسکال-ثانیه (Pa.s)

مشخص می کند [۸]. برای تبدیل می توان از معادله $1 \text{ pa.s} = 1000 \text{ cp}$ استفاده کرد. بنابراین برای تبدیل نتایج ویسکوزیته چرخشی با واحد سانتی پواز به پاسکال - ثانیه باید آن را در $0/001$ ضرب کرد. علاوه بر ویسکوزیته، دمای آزمایش، اندازه استوانه چرخنده و سرعت دوران نیز بایستی گزارش شود. حداکثر ویسکوزیته برای پمپاژ قیر بدون خطر آتش سوزی ۳ پاسکال-ثانیه می باشد [۱۲، ۱۱، ۱۰].

۵-۲-۶- آزمایش محفظه تسریع پیری (Pressure Aging Vessel)

یکی از نکات بارز آئین نامه مشخصات قیر شارپ تأکید بر انجام آزمایشها در حالت هایی است که مراحل حساس و بحرانی دوره عمر قیر را شبیه سازی می کند. این مراحل بحرانی عبارتند از:

۱- هنگام حمل، ذخیره سازی و برداشت

۲- هنگام عملیات اختلاط و ساخت (اجرا)

۳- پس از سپری شدن زمان زیادی از اجرا

آزمایش هایی که بر روی قیرهای پیر نشده انجام می شود بیانگر مرحله اول است. وضعیت مرحله دوم، بوسیله آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) شبیه سازی می شود. مرحله سوم، با انجام آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV) شبیه سازی می شود. این آزمایش در زمان نسبتاً کوتاهی در دما و فشار بالا، شرایط سپری شدن سالهای طولانی در محل را شبیه سازی می کند.

در این آزمایش نمونه قیر بدست آمده از RTFO در مقابل هوای فشرده و دمای بالا (90°C تا 110°C) قرار می گیرد تا عمل پیری در طول عمر تسریع فیزیکی قیر پیر شده اندازه گیری شود. این آزمایش در دماهای متفاوت که بیان کننده شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر است انجام می شود (شکل ۵-۱۷). هر نمونه PAV که از باقیمانده چند بطری آزمایش RTFO بدست می آید، بایستی حدود ۵۰ گرم وزن داشته باشد. در این آزمایش ابتدا بایستی محفظه را گرم نمود. پس از آنکه اختلاف دما با دمای آزمایش به حدود 7°C الی 10°C رسید، نمونه ها را بر روی طبقات محفظه قرار داده تا به مدت ۲۰ ساعت در فشار 2070 کیلو پاسکال قرار گیرند. پس از این مدت، بشقاب های حاوی قیر به مدت ۳۰ دقیقه داخل یک اجاق با دمای 165°C قرار داده می شوند. در این آزمایش نتیجه ای، به جز افت وزنی گزارش نمی شود.

آئین نامه شارپ حداکثر یک درصد افت وزنی را برای انواع قیرها مجاز می داند [۷، ۱۰ و ۸۲].



شکل ۵-۱۷: شمای آزمایش فرسودگی قیر در ظرف فشار (PAV) [۶۴]

۵-۳- آزمايشات آمیزه های قیر - پلیمر

تست های ذکر شده تا قبل از این بخش، هم بر روی قیر خالص و هم بر روی قیر اصلاح شده بوسیله پلیمرها قابل انجام بودند. در آزمایشهای مخلوط آسفالتی نیز ممکن بود که مخلوط آسفالتی از قیرهای اصلاح شده تشکیل شده باشد. اما چند آزمایش مخصوص آمیزه های قیر - پلیمر وجود دارد تا اثر پلیمرها بر روی شبکه قیر بررسی گردند.

۵-۳-۱- آزمايش پایداری در ذخیره سازی (Storage Stability)

از این آزمایش برای بررسی پایداری مخلوط قیر و پلیمر در شرایط انبارداری استفاده می گردد. بدین

منظور آمیزه ای از قیر - پلیمر را با هر نسبت که ترکیب شده اند، در داخل یک استوانه باریک و نازک ریخته و به مدت ۳ شبانه روز در درجه حرارت حدود 163°C نگهداری می شود. در تمام این مدت مخلوط داخل استوانه در زیر اتمسفری از یک گاز خنثی قرار دارد. پس از گذشت زمان مذکور، استوانه را تا دمای محیط سرد و سپس آنرا در راستای طول به سه قسمت مساوی تقسیم می کنند. حال سه استوانه بدست می آید که برای بررسی پایداری ذخیره سازی باید قسمت بالا و پائینی را مورد ارزیابی قرار داد. نقطه نرمی و ویسکوزیته برای قسمت فوقانی و تحتانی استوانه تعیین می گردد. چنانچه اختلاف نقطه نرمی برای این دو قسمت کمتر از $2,2^{\circ}\text{C}$ و نسبت ویسکوزیته های آنها بین ۰,۹ تا ۱,۱ بود، پایداری قیر و پلیمر مناسب بوده است. می توانیم به جای استوانه آلومینیومی از یک لوله خمیر دندان و یا حشره کش کاملاً تخلیه شده استفاده کنیم.

تست پایداری ذخیره سازی در دمای بالا صورت می گیرد، زیرا در این دماها است که احتمال جدا شدن قیر - پلیمر وجود دارد [۶۶و۷].

۵-۳-۲- بازایی الاستیک (Elastic Recovery)

در این آزمایش مقدار بازگشت مخلوط بعد از کشیده شدن اندازه گیری می شود. در این آزمایش با دستگاهی مشابه با دستگاه آزمایش کشش پذیری، مخلوط را به میزان ۱۰ سانتیمتر می کشند و پس از ۵ دقیقه از وسط به دو نیمه می برند. میزان بازایی طول اولیه نمونه ها را پس از گذشت ۱ ساعت (با حرکت معکوس دستگاه) اندازه گیری می کنند و نسبت طول نهایی به طول اولیه را به عنوان درصد بازایی گزارش می کنند [۷].

۵-۳-۳- مشاهده در زیر میکروسکوپ

در این قسمت مناسب است اندکی در مورد تعیین سازگاری مخلوطهای قیر و پلیمر با استفاده از تکنیک های میکروسکوپی توضیح داده شود. چندین تکنیک میکروسکوپی همچون:

SEM (Scanning Electron Microscopy)

STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy)

FOM (Flourescence Optical Microscopy)

برای بررسی دقیق تر فازهای قیرهای اصلاح شده با پلیمر معرفی شده اند.

SEM برای بررسی تشکیل مناطق پلیمری در مخلوط مورد استفاده قرار می گیرد. این روش احتیاج به واکنش مخلوط اصلاح شده پلیمری با مخلوطی حاوی اسمیوم تترااکسید OsO₄ دارد. OsO₄ با باندهای دوگانه بر روی ساختار اصلی پلیمر، تا تشکیل یک ساختار پیوسته در مخلوط مورد نظر، واکنش می دهد که بعداً این ماده قابل استخراج و خارج شدن می باشد. سپس نمونه های مورد نیاز برای آنالیز SEM بریده و جدا می شوند.

مطالعات و آزمایشات پترسون (Peterson) و همکارانش با استفاده از این روش نشان داد که بسته به منبع و نوع قیر، می توان انواع گوناگونی از مورفولوژی را مشاهده نمود.

روش دیگری که توسط محققین استفاده گردیده، STEM می باشد. این روش احتیاج دارد به اینکه نمونه به صورت منجمد (سرد شده) شکسته شده و سپس تحت اثر محلولی شامل OsO₄ قرار گیرد. OsO₄ جهت نشانه گذاری جزء اشباع قرار می گیرد. میکروسکوپی فلئورسانس روش دیگری برای مخلوطهای اصلاح شده با پلیمر می باشد. این روش برای بررسی ساختمان میکروسکوپی مخلوط مورد نظر می باشد. هر چند که میکروسکوپی انعکاسی یا بازتابی (Reflective) اجازه می دهد که ماده در حالت خالص رؤیت شود، میکروسکوپی فلئورسانس اجازه می دهد که ساختمان، ساختار و همگنی قابل مشاهده باشد. در این روش سطح نمونه بوسیله نور آبی بمباران شده و نور زرد ناشی از فلئورسانس با یک میکروسکوپ چشمی مشاهده می گردد. روغنهای متورم کننده فاز پلیمری، اثر زرد رنگ (ظاهراً سفید) در مخلوط باقی می گذارند، در حالیکه چسب قیری تیره می ماند. دیفور (Defor) مورفولوژی چندین پلیمر مختلف را در مخلوط سازگار و غیرسازگار بررسی نموده و سیستم دسته بندی برای تصاویر میکروسکوپی فلئورسانس، مطابق اندازه، حالت و ظاهر ساختمان ارائه داد، که در زیر بدان اشاره می شود [۶۵و۶۶]:

✓ همگنی میکروسکوپی - (شبه) سازگار

✓ کرم مانند (Vermicular) - سازگاری قابل قبول، اندازه ذره > 2 میکرومتر

✓ گلبولی (کروی) - اندکی سازگار، اندازه ذره $> 10-20$ میکرومتر

✓ رشته ای (Stranal) - ناسازگار، اندازه ذره < 50 میکرومتر

فصل ششم:
شرح فعالیت های
آزمایشگاهی و تحلیل
نتایج آزمایش های انجام شده

مقدمه

در این فصل به تفصیل به بررسی مراحل تحقیق انجام گرفته خواهیم پرداخت تا با مقایسه آنها با ادبیات فنی به بررسی ویژگی های اصلاح قیر توسط استایرن- بوتادین - استایرن بپردازیم. در ابتدا بر اساس مطالعات علمی مقادیر پایه ای برای هر نوع پلیمر بر حسب درصد انتخاب گردید و همچنین با استفاده از قیر ۸۵/۱۰۰ پالایشگاه اصفهان و ترکیب آن با درصد خاصی از VB ونهایتاً ساخت قیر ۱۲۰/۱۵۰، تأثیر دو نوع از قیرهای تولید کشور با دو رده از پلیمرهای SBS (خطی و شاخه ای) به طور کامل بررسی گردیده و بهترین ترکیب برای استفاده در مناطق آب و هوای کشور انتخاب گردید.

در بخشی دیگر از پروژه به بررسی پایداری انبارداری مخلوط قیر-پلیمر می پردازیم و بحث استفاده از نانوکامپوزیت های پلیمری را جهت بهبود این مشخصه، مطرح می کنیم. البته تحقیقات در این زمینه به طور کلی در سراسر دنیا نیز از قدمت طولانی برخوردار نیست و تحقیقات ناچیز و اکثراً ناقصی در این زمینه منتشر شده است. تأثیر نانوذرات بر روی پارامترهای رئولوژیکی و همچنین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی، تأثیر این ذرات بر روی پایداری انبارداری و مورفولوژی قیرهای اصلاح شده پلیمری، بررسی و تحقیق خواهد شد.

نتایجی که در ادامه ارائه خواهد شد، نتیجه هشت ماه کار آزمایشگاهی شبانه روزی و چندین ماه کار مطالعاتی می باشد. تمامی آزمایشات در واحد قیر و راهسازی پژوهشگاه صنعت نفت صورت گرفته است.

۶-۱- مواد مورد استفاده

۶-۱-۱- قیر پایه

از آنجایی که هر چه قیر شل تر باشد در واقع مالتن آن بیشتر بوده و پدیده swelling پلیمرها بهتر صورت گرفته و در نهایت آمیخته شدن قیر و پلیمر سریع تر می باشد، به هم دلیل دو نوع قیر ۸۵/۱۰۰ و ۱۲۰/۱۵۰ برای تحقیقات در این پروژه انتخاب گردیدند. قیر ۸۵/۱۰۰ استفاده شده تولید پالایشگاه اصفهان بوده و با افزودن ۲۳ درصد VB (ته مانده برج تقطیر) به آن قیر ۱۲۰/۱۵۰ تولید شده است. از این به بعد جهت سادگی قیر ۸۵/۱۰۰ را با A و قیر ۱۲۰/۱۵۰ را با B نمایش می دهیم.

۶-۱-۲- پلیمر SBS

در این پروژه از دو گرید Calprene ۵۰۱ (C۵۰۱) و Solprene ۴۱۶ (S۴۱۶) کمپانی Dynasol در اسپانیا استفاده شده است. از دو گرید استفاده شده است تا تأثیر نوع SBS نیز بررسی شود. گرید C۵۰۱ دارای ساختار مولکولی خطی (Linear)، و گرید S۴۱۶ دارای ساختار مولکولی شاخه ای (Branch) می باشد. از هر دو گرید استفاده کردیم تا تأثیر خطی یا شاخه ای بودن را به خوبی نشان دهیم. مشخصات این دو بلاک کوپلیمر در جداول ۱-۶ و ۲-۶ ارائه شده است.

جدول ۱-۶: مشخصات پلیمر SBS رده ۵۰۱ Calprene

Polymer Properties	Value	Test Method
Toluene solution viscosity 25% Pa.s	5	MA 04-3-064
Toluene solution viscosity 5,23% cSt	13	MA 04-3-003
Volatile matter, %	0.4	ASTM D-5668
Hunterlab color	2	ASTM D-1925-70
Total styrene (on polymer), %	31	ASTM D-5775
Hardness, °Shore A	76	ASTM D-2240
Insolubles in toluene, 325 mesh, %	<0.1	MA 04-3-018
Ashes, %	<0.35	ASTM D-5669

جدول ۲-۶: مشخصات پلیمر SBS رده ۴۱۶ Solprene

Polymer Property	Value	Test Method
Toluene solution viscosity 5.23%, cSt	11	NM-300-11
Volatile matter, % max	0.75	ASTM D-5668
Block styrene, % min	28	NM-202-07
Total styrene (on polymer), %	30	ASTM D-5775
Specific gravity	0.94	DIN-53479
Melt index, g/10 min (200 °C, 5kg)	<0.5	ASTM D-1238
Hardness, °Shore A	78	ASTM D-2240
Tensile at break, MPa	17	ASTM D-412
300% modulus, MPa	2.7	ASTM D-412
Elongation, %	800	ASTM D-412

۳-۱-۶- نانوذرات مورد استفاده

نانوکلای (Nano Clay) مورد استفاده در این پروژه از کمپانی *Süd – Chemie AG* آلمان تهیه شد. این نانوکلای به صورت سیلیکات لایه ای و با نام تجاری *Closite® ۱۵A* بوده است. این نانوکلای از نوع ارگانوفیل بوده و کاتیونهای معدنی مثل Na^+ و Ca^{+2} در آن با کاتیونهای آلی جایگزین شده اند. مشخصات این نانوکلای در جدول ۳-۶ ارائه شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) برای این نانوکلای برابر $۱۲۰ meq/۱۰۰ gr$ گزارش شده است.

جدول ۳-۶: نانوکلای مورد استفاده در تحقیق

دانسیتته (gr/cm^3)	اندازه ذرات (μm)	اصلاح کننده سطحی			نام
		مقدار اسمی (%)	ترکیب	نام شیمیایی	
۱,۴	۳۶	۴۵	$[CH_3(CH_2)_{17}]_2N^+(CH_3)_2Cl^-$	Distearyldimethylammonium chloride	Closite ۱۵A

۶-۲- آماده سازی آلیاژ قیر و پلیمر

اختلاط پلیمر SBS و قیر با استفاده از میکسرهای با برش بالا (High shear mixer) امکان پذیر است. بدین منظور ابتدا قیر را گرم کردیم تا روان شود سپس در زیر یک میکسر با برش بالا، در دمای 180°C و با شدت برش 4000rpm ، پلیمر را به قیر اضافه کردیم. زمان مورد نیاز برای هموژن شدن مخلوط حدود ۲ ساعت می باشد که ما این زمان را از بررسی فیلم حاصل در زیر میکروسکوپ و ثابت شدن ویسکوزیته با زمان، بدست آورده ایم. زمان اختلاط مناسب بدست آمده با نتایج محققان دیگر که در مقالات انتشار یافته، تطابق دارد. (لازم به ذکر است در صورت استفاده از پلیمر نوع شاخه ای و حجم های نمونه بیشتر از یک لیتر این زمان افزایش پیدا می کند نتیجه بر این شد که ترکیب شیمیایی قیر پایه و نوع پلیمر بر روی زمان اختلاط تأثیر می گذارند.)

در انجام این تحقیق در پژوهشگاه صنعت نفت از یک هموژنایزر با برش بالا استفاده شده که نتایج مناسبی را نیز نشان داده است. کنترل دمای آزمایش در میکسرهای با برش بالا به دلیل افزایش شدید دما در آنها، مسئله ای است که بسیار حائز اهمیت بود. محدوده اپتیمم دمای اختلاط بین $170-190^{\circ}\text{C}$ می باشد. در دماهای پایین تر هنوز مخلوط سیالیت مناسب برای انجام فرآیند را بدست نیاورده است و در دماهای بالاتر نیز مسئله تخریب (Degradation) پلیمرها مطرح می شود. در هر حال هیچگاه دما به 220°C که دمای گزارش شده برای تخریب SBS می باشد، نباید برسد. دو ساعت زمان اختلاط شامل زمان تورم (Swelling) و پخش شدن پلیمر در قیر جهت تشکیل یک مخلوط هموژن می باشد.

هموژنایزر در آزمایشگاه در واقع شرایط آسیاب کلوئیدی (Colloidal mill) در صنعت را برای ما شبیه سازی میکند. همانطور که می دانیم در صنعت آسیاب های کلوئیدی ظرف حدوداً ۱۵ دقیقه عملیات اختلاط را باید بتوانند انجام دهند لذا استفاده از هموژنایزر به مدت ۲ ساعت، با توجه به شرایط بسیار سخت کنترل دمای آن و غیر عملی بودن آن، روش درستی به نظر نمی رسد با اینکه در مقالات از همین روش استفاده شده بود. به همین دلیل ما از روش دیگری نیز به عنوان روش اپتیمم عملیاتی استفاده کردیم. در این روش ابتدا قیر را گرم کردیم تا سیالیت مناسب را پیدا کند. سپس در زیر یک میکسر معمولی با دور حدود 550rpm ، پلیمر SBS را به قیر اضافه می کنیم. مخلوط را در دمای $180 \pm 10^{\circ}\text{C}$ به مدت ۱ ساعت در زیر میکسر نگه می داریم. کنترل شرایط در این شرایط بسیار راحت تر از هموژنایزر می باشد. در این مدت تورم SBS به خوبی در داخل قیر انجام می پذیرد. سپس مخلوط حاصله را به مدت ۱۵ دقیقه در زیر هموژنایزر با دور 4000rpm می بریم تا در اثر برش های شدید، پلیمر در داخل ماتریکس قیری به صورت

کاملاً یکنواخت در آید. در این مرحله اختلاط کامل می شود اما جهت Curing مناسب پلیمر، ۱ ساعت مجدداً در زیر یک میکسر معمولی با دور ۵۰۰rpm، مخلوط را میکس می کنیم. در نهایت تجربه نشان داده است که این روش ساده، نتایجی برابر و حتی بهتر از میکس کردن در هموژنایزر به تنهایی به ما میدهد. در تمام مدت اختلاط سعی می شود از ورود اکسیژن هوا به ظرف اختلاط، حتی الامکان جلوگیری کنیم. ضمن اینکه زمانی که با هموژنایزر کار می کنیم مقدار زیادی هوا در آلیاژ ما به تله می افتد که باعث اکسید شدن قیر می شود لذا هرچه از هموژنایزر کمتر استفاده شود، مناسب تر است.

۳-۶- بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری

۱-۳-۶- نتایج آزمایش درجه نفوذ (Penetration)

این آزمایش بر روی بایندهای پایه و بایندهای اصلاح شده در دمای ۲۵°C صورت گرفته است. جدول ۴-۶ و ۵-۶ نتایج آزمایش درجه نفوذ را برای قیر A اصلاح شده توسط درصدهای مختلف ۵۰۱ Calprene و ۴۱۶ Solprene نشان می دهد.

جدول ۴-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene

نمونه	درجه نفوذ در ۲۵°C (dmm)
Bitumen A+ ۰% polymer	۹۸
Bitumen A+ ۳% polymer	۷۶
Bitumen A+ ۴% polymer	۶۸
Bitumen A+ ۵% polymer	۶۲
Bitumen A+ ۶% polymer	۵۹

جدول ۵-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene

نمونه	درجه نفوذ در ۲۵°C (dmm)
Bitumen A+ ۰% polymer	۹۸
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	۶۵
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	۵۷
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	۵۶

همانطور که ملاحظه می شود، قیر ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده در این پروژه دارای حد بالای درجه نفوذ یعنی ۹۸dmm بوده است. افزایش درصد پلیمر منجر به کاهش درجه نفوذ قیر شده و لذا از هم اکنون مشخص است که مدول سختی در دمای ۲۵°C با افزایش پلیمر، افزایش می یابد. درجه نفوذ تمامی قیرهای اصلاح شده فوق تقریباً در محدوده قیر ۶۰/۷۰ که گرید مرسوم در راهسازی است، می باشد. اما در مورد پلیمر ۴۱۶ Solprene قضیه کمی متفاوت است. افت ناگهانی درجه نفوذ با افزایش درصد پلیمر از ۰ به ۳٪ برای پلیمر قبلی نیز قابل مشاهده بود. اما کاهش درجه نفوذ در مورد این پلیمر بیش از پلیمر C۵۰۱ است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این پلیمر تأثیر شدیدتری را بر روی قیر گذاشته است و با درصد حدوداً یکسان نسبت به پلیمر اول، احتمالاً سختی قیرهای اصلاح شده توسط S۴۱۶ بالاتر از قیرهای C۵۰۱ می باشد.

در جداول ۶-۶ و ۷-۶ نتایج آزمایش درجه نفوذ را برای قیر B اصلاح شده توسط درصدهای مختلف ۵۰۱ Calprene و ۴۱۶ Solprene نشان می دهد.

جدول ۶-۶: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene

نمونه	درجه نفوذ در ۲۵°C (dmm)
Bitumen B+ ۰٪ polymer	۱۴۰
Bitumen B+ ۳٪ polymer	۱۰۴
Bitumen B+ ۴٪ polymer	۹۲
Bitumen B+ ۵٪ polymer	۹۰,۵
Bitumen B+ ۶٪ polymer	۷۸,۵

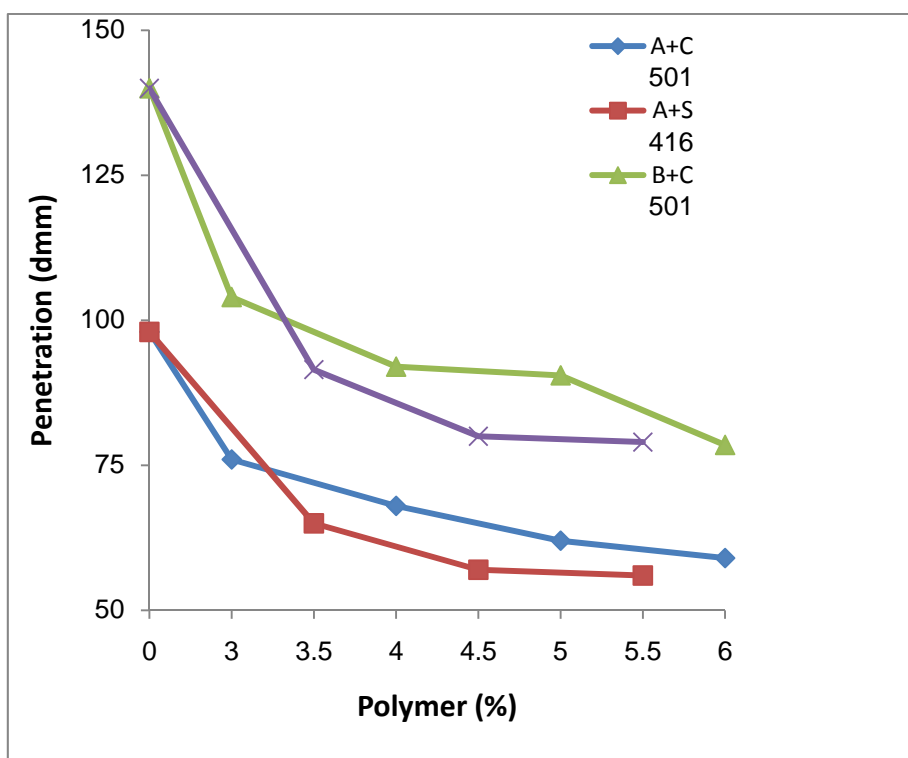
جدول ۶-۷: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene

نمونه	درجه نفوذ در ۲۵°C (dmm)
Bitumen B+ ۰٪ polymer	۱۴۰
Bitumen B+ ۳,۵٪ polymer	۹۱,۵
Bitumen B+ ۴,۵٪ polymer	۸۰
Bitumen B+ ۵,۵٪ polymer	۷۹

همانطور که ملاحظه می شود و انتظار می رفت در این نوع قیر نیز با افزایش درصد پلیمر درجه نفوذ کاهش می یابد که نشان دهنده ی غلبه شبکه پلیمری بر قیر است. البته این تصور که همواره با افزایش درصد پلیمر، درجه نفوذ کاهش می یابد اشتباه است زیرا تجربه نشان داده است که در درصدهای بالای پلیمر مثل ۱۰-۱۲٪ این روند عکس می شود. این درصدهای بالا برای مصارف عایق بام مناسب می باشد و در راهسازی به دلیل نقطه نرمی و ویسکوزیته بسیار بالای مخلوط، جایی ندارند. مطابق استاندارد ASTM، درجه نفوذ برای قیرهای اصلاح شده توسط SBS نباید کمتر از ۵۰-۴۰ dmm باشد.

شکل ۶-۱ روند تأثیر افزایش میزان پلیمرهای C۵۰۱ و S۴۱۶ را بر درجه نفوذ قیرهای A و B نشان

می دهد.



شکل ۶-۱: تأثیر افزایش دو رده از پلیمر SBS بر روی درجه نفوذ قیرهای مختلف

مطابق شکل ۶-۱ ملاحظه می گردد که شیب نمودارها در مورد پلیمر S۴۱۶ نسبت به C۵۰۱ تند تر می باشد که حاکی از تاثیر شدیدتر این پلیمر بوده و همچنین از درصد ۴/۵ به بعد اثر افزایش پلیمر S۴۱۶ بر روی درجه نفوذ کاهش محسوسی می یابد.

۶-۳-۲- نتایج آزمایش نقطه نرمی (Softening Point)

آزمایش نقطه نرمی در کنار آزمایش درجه نفوذ از مهمترین آزمایش هایی هستند که جهت مشخص کردن خواص فیزیکی قیرها مورد استفاده قرار می گیرند. تأثیر پلیمر Calprene ۵۰۱ و Solprene ۴۱۶ بر روی نقطه نرمی قیر A در جداول ۶-۸ و ۶-۹ آمده است. قیر A به صورت خالص دارای نقطه نرمی 47°C بوده است. با افزایش درصد پلیمر، نقطه نرمی افزایش می یابد. دلیل افزایش نقطه نرمی این است که جزء پلاستیکی پلیمر (استایرن)، به سبب دمای گذار شیشه ای (Tg) بالای خود می تواند استحکام قیر را در دماهای بالا افزایش دهد. در ضمن جذب مالتن قیر توسط جزء رابری پلیمر نیز به این موضوع کمک می نماید.

جدول ۶-۸: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	نقطه نرمی (°C)
Bitumen A+ ۰% polymer	۴۷
Bitumen A+ ۳% polymer	۵۴
Bitumen A+ ۴% polymer	۵۵
Bitumen A+ ۵% polymer	۶۰
Bitumen A+ ۶% polymer	۸۷

جدول ۶-۹: نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط Solprene ۴۱۶

نمونه	نقطه نرمی (°C)
Bitumen A+ ۰% polymer	۴۷
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	۵۵,۵
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	۷۶
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	۸۰

باز هم مشاهده می شود که با افزایش درصد پلیمر، نقطه نرمی افزایش می یابد. افزایش در نقطه نرمی مطلوب است به دلیل آنکه قیر با نقطه نرمی بالا ممکن است کمتر نسبت به تغییرات دمایی حساس باشد (شیارشدهگی) و همچنین می توان انتظار داشت که آسفالت ساخته شده از این نوع قیرها در مقابل تغییر شکل های دائمی و شیارشدهگی مسیر چرخ در دمای بالای شرایط عملکردی روسازی مقاوم تر باشند و در نهایت پایداری آن نسبت به تغییرات درجه حرارت محیط بیشتر خواهد بود.

در جداول ۶-۱۰ و ۶-۱۱ تأثیر پلیمرهای Calprene ۵۰۱ و Solprene ۴۱۶ بر روی نقطه نرمی قیر B

آمده است.

جدول ۶-۱۰: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر B اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	نقطه نرمی (°C)
Bitumen B+ ۰% polymer	۴۳
Bitumen B+ ۳% polymer	۵۱
Bitumen B+ ۴% polymer	۵۳
Bitumen B+ ۵% polymer	۵۹,۵
Bitumen B+ ۶% polymer	۶۴,۵

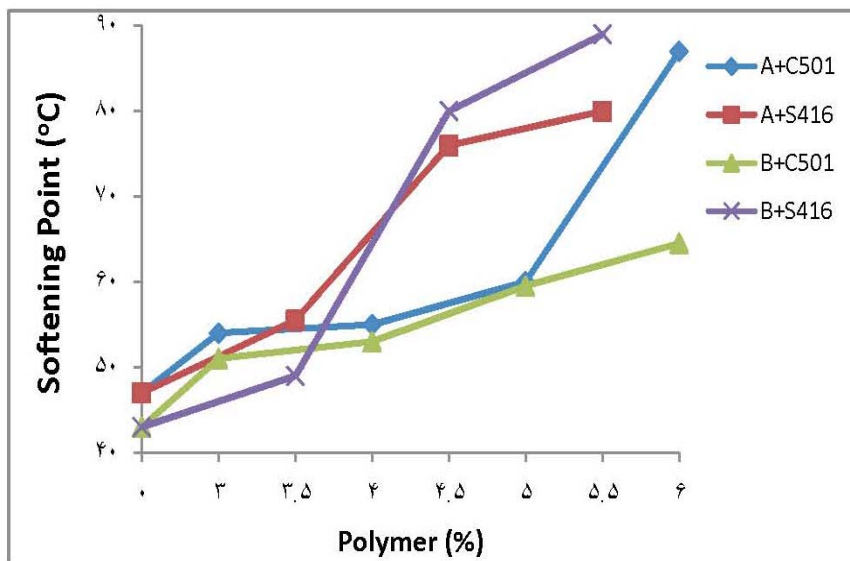
جدول ۶-۱۱: نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر B اصلاح شده توسط Solprene ۴۱۶

نمونه	نقطه نرمی (°C)
Bitumen B+ ۰% polymer	۴۳
Bitumen B+ ۳,۵% polymer	۴۹
Bitumen B+ ۴,۵% polymer	۸۰
Bitumen B+ ۵,۵% polymer	۸۹

همان طور که ملاحظه میشود در قیر B نیز با افزایش درصد پلیمر نقطه نرمی بالا می رود که درصدهای بیشتر بدلیل داشتن نقطه نرمی بالاتر مناسب برای مناطق دارای ترافیک سنگین و آب و هوای گرمتر می باشد. اما نکته قابل توجه تاثیر قوی تر پلیمر S۴۱۶ بر روی نقطه نرمی می باشد که بدلیل شاخه ای بودن آن است و همچنین تاثیر این پلیمر بر روی قیر ۱۲۰/۱۵۰ بیشتر از ۸۵/۱۰۰ بوده که احتمالاً به این دلیل است که قیر ۱۲۰/۱۵۰ بدلیل داشتن مالتن بیشتر سبب آمیخته شدن کامل پلیمر S۴۱۶ در خود شده و پلیمر تاثیر خود را به طور کامل نشان داده است.

شکل ۶-۲ روند تأثیر افزایش میزان پلیمرهای C۵۰۱ و S۴۱۶ را بر نقطه نرمی قیرهای A و B نشان

می دهد.



شکل ۶-۲: تأثیر افزایش پلیمر بر روی نقطه نرمی قیرهای مختلف

۶-۳-۳- نتایج محاسبات اندیس نفوذ (Penetration Index)

ما اندیس نفوذ را به کمک رابطه موجود در هندبوک قیر شرکت شل (The Shell Bitumen Handbook) محاسبه کردیم. اندیس نفوذ معیاری از حساسیت حرارتی (Thermal Susceptibility) می باشد. هرچه اندیس نفوذ بالاتر باشد، حساسیت قیرها به درجه حرارت کمتر بوده و در نتیجه شیار افتادگی و تغییر شکل های دائمی و شکست حرارتی در آنها کمتر دیده می شود. رابطه موجود به صورت زیر است [۶]:

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(\text{pen}_{25}) - 20 \times SP}{50 \log(\text{pen}_{25}) - SP - 120}$$

که در این رابطه Pen_{25} درجه نفوذ قیر در دمای 25°C برحسب دهم میلیمتر و SP ، نقطه نرمی آن برحسب درجه سانتیگراد می باشد.

نتایج اندیس نفوذ برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱ و Solprene ۴۱۶ در جداول ۶-۱۲ و ۶-۱۳ ارائه شده است.

جدول ۶-۱۲: اندیس نفوذ (PI) برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	PI
Bitumen A+ ۰% polymer	-۰,۲۴
Bitumen A+ ۳% polymer	۰,۸۵۵
Bitumen A+ ۴% polymer	۱,۱۱۵
Bitumen A+ ۵% polymer	۱,۵۹۵
Bitumen A+ ۶% polymer	۵,۶۸۴

جدول ۶-۱۳: اندیس نفوذ (PI) برای قیر A اصلاح شده توسط Solprene ۴۱۶

نمونه	PI
Bitumen A+ ۰% polymer	-۰,۲۴
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	۰,۷۵۹
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	۴,۱۲
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	۴,۶۴

همانطور که در این دو جدول ملاحظه می شود با افزایش درصد پلیمر، PI افزایش می یابد و یا حساسیت حرارتی کاهش می یابد.

نتایج اندیس نفوذ برای قیر B اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱ و Solprene ۴۱۶ در جداول ۶-۱۴ و ۶-۱۵ ارائه شده است.

جدول ۶-۱۴: اندیس نفوذ (PI) برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene

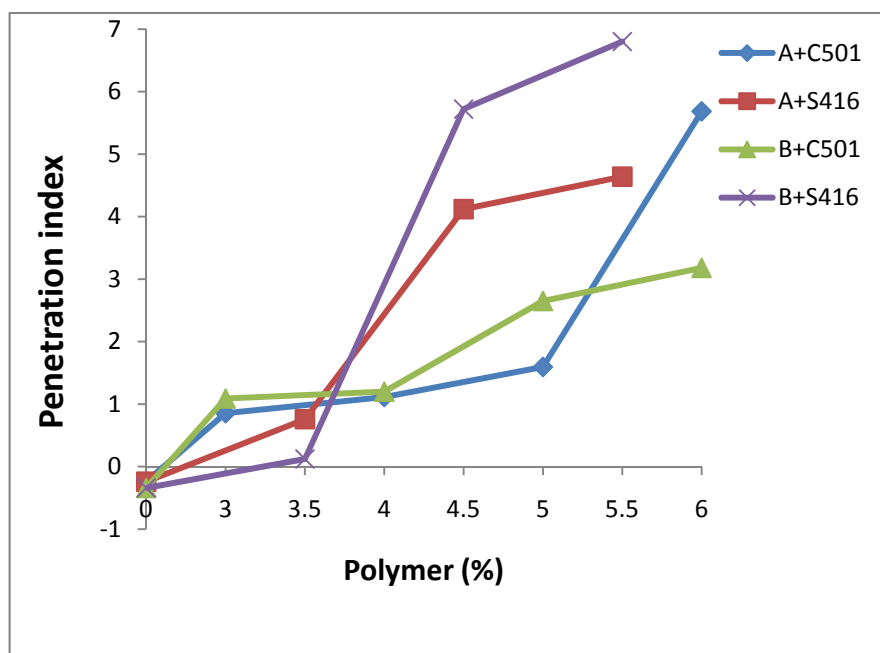
نمونه	PI
Bitumen B+ ۰٪ polymer	-۰,۳۴
Bitumen B+ ۳٪ polymer	۱,۰۹
Bitumen B+ ۴٪ polymer	۱,۲۰
Bitumen B+ ۵٪ polymer	۲,۶۵
Bitumen B+ ۶٪ polymer	۳,۱۸۰

جدول ۶-۱۵: اندیس نفوذ (PI) برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene

نمونه	PI
Bitumen B+ ۰٪ polymer	-۰,۳۴
Bitumen B+ ۳,۵٪ polymer	۰,۱۲۳
Bitumen B+ ۴,۵٪ polymer	۵,۷۲
Bitumen B+ ۵,۵٪ polymer	۶,۸۰

مقدار PI برای قیرهای پایه، منفی می باشد که این موضوع به محدود بودن دمای سرویس آنها و حساسیت شدید آنها به درجه حرارت اشاره دارد. هرچند که گفته می شود افزایش PI به منزله کاهش حساسیت حرارتی اطلاق می شود اما افزایش بیش از حد آن نیز در بایندهای راهسازی چندان توصیه نشده است. در رابطه PI تنها درجه نفوذ و نقطه نرمی حضور دارند که تأثیر درجه نفوذ در این رابطه به علت تغییرات کند آن با افزایش درصد پلیمر، کمتر از نقطه نرمی می باشد و یا به عبارت دیگر حساسیت رابطه PI برای قیرهای پلیمری، به نقطه نرمی بیش از درجه نفوذ است. بنابراین افزایش بیش از حد PI به افزایش شدید نقطه نرمی مرتبط است لذا PI بسیار بالا برای قیر A اصلاح شده توسط ۶٪ از پلیمر ۵۰۱C و قیر B اصلاح شده توسط ۵,۵٪ از پلیمر ۴۱۶S به همین موضوع اشاره دارند.

PI با افزایش نقطه نرمی و افزایش درجه نفوذ، افزایش می یابد تا هم استحکام و هم انعطاف قیر را شامل شود.



شکل ۳-۶: تاثیر افزایش پلیمر بر روی اندیس نفوذی

۳-۶-۴- نتایج آزمایش بازیابی الاستیک (Elastic Recovery)

آزمایش بازیابی الاستیک یکی از مهمترین آزمایش‌هایی است که بر روی قیرهای اصلاح شده پلیمری صورت می‌گیرد. این آزمایش به صورت استاندارد در دمای 25°C صورت می‌گیرد. بازیابی الاستیک برای قیر پایه در دمای مذکور بسیار ناچیز می‌باشد اما برای قیرهای پلیمری به دلیل تشکیل شبکه الاستیک پلیمری در داخل ماتریکس قیر، این مقدار بسته به درصد پلیمر تفاوت‌های زیادی می‌کند. توجه شود که بازیابی الاستیک نباید خیلی کم باشد زیرا تغییر شکل بوجود آمده در این حالت به صورت دائمی (Permanent Deformation) خواهد بود.

نتایج حاصل از آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر A و B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene و ۴۱۶ Solprene در جداول ۳-۶ الی ۳-۱۹ ارائه شده است.

جدول ۱۶-۶: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	بازیابی الاستیک در ۲۵°C (%)
Bitumen A+ ۰% polymer	۰
Bitumen A+ ۳% polymer	۸۶
Bitumen A+ ۴% polymer	۹۰
Bitumen A+ ۵% polymer	۹۴
Bitumen A+ ۶% polymer	۱۰۰

جدول ۱۷-۶: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر A اصلاح شده توسط Solprene ۴۱۶

نمونه	بازیابی الاستیک در ۲۵°C (%)
Bitumen A+ ۰% polymer	۰
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	۸۵,۵
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	۹۵
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	۱۰۰

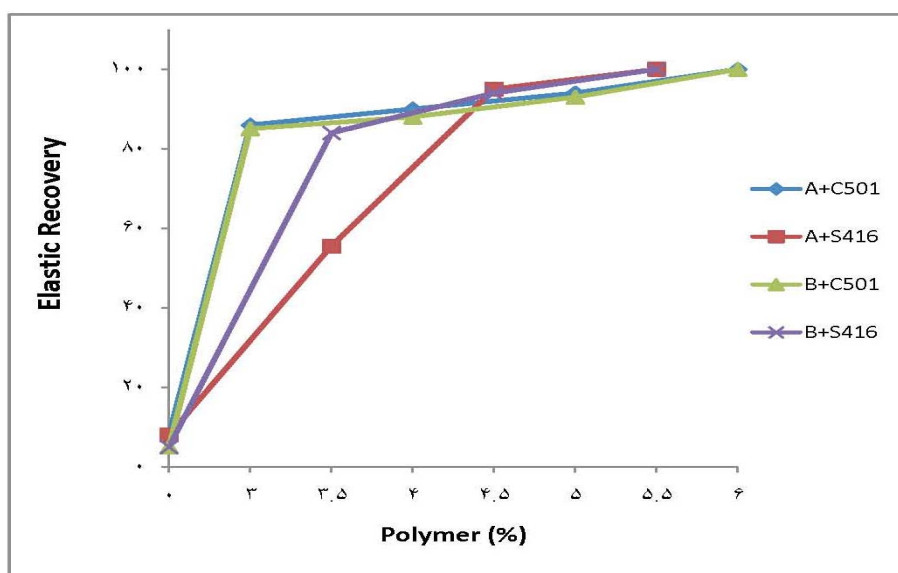
جدول ۱۸-۶: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر B اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	بازیابی الاستیک در ۲۵°C (%)
Bitumen B+ ۰% polymer	۰
Bitumen B+ ۳% polymer	۸۵
Bitumen B+ ۴% polymer	۸۸
Bitumen B+ ۵% polymer	۹۳
Bitumen B+ ۶% polymer	۱۰۰

جدول ۶-۱۹: نتایج آزمایش بازیابی الاستیک برای قیر B اصلاح شده توسط ۱۶ Solprene

نمونه	بازیابی الاستیک در ۲۵°C (%)
Bitumen B+ ۰% polymer	۰
Bitumen B+ ۳,۵% polymer	۸۴
Bitumen B+ ۴,۵% polymer	۹۴
Bitumen B+ ۵,۵% polymer	۱۰۰

با توجه به نتایج قیر پایه بازگشت الاستیک پایینی دارد که با افزایش SBS به آن، این خاصیت در دمای ۲۵ درجه به طور چشمگیری افزایش می یابد. دلیل بهبودی این خاصیت را می توان در ساختار SBS جستجو کرد، چرا که بلاک استایرن در SBS به عنوان یک بلاک سخت عمل می کند و معمولاً مقاومت ماده را تامین می کند، در حالیکه بلاک بوتادین یک بلاک نرم است که به خاصیت الاستیسته قیر ساخته شده کمک می کند، به این صورت که مولفه های فاز مالتن قیر را جذب می کند و حجم شان را به اندازه ۴ تا ۱۰ برابر افزایش می دهند و در سرتاسر قیر به آن خاصیت الاستیسته می بخشد.



شکل ۶-۴: تاثیر افزایش پلیمر بر روی بازیابی الاستیک

می توان به این نتیجه رسد که میزان برگشت پذیری نمونه های قیر پلیمری با افزایش SBS نسبت مستقیم دارد. پس این خاصیت از تغییرشکل های ماندگار و شیارافتادگی مسیر چرخ در سطح جاده ها جلوگیری می کند. از روند نمودار به نظر می رسد که هر دو ترکیب تقریباً بازگشت الاستیک یکسانی دارند.

۵-۳-۶- نتایج آزمایش کشش پذیری (Ductility)

آزمایش کشش پذیری هم بر روی قیرهای پلیمری و هم بر روی قیرهای خالص صورت می گیرد. در استانداردها برای قیرهای اصلاح شده پلیمری مقدار خاصی به عنوان حداقل Ductility در نظر گرفته نشده است اما برای قیرهای خالص راهسازی معمولاً این عدد باید بزرگتر از ۱۰۰ سانتیمتر باشد. طبیعتاً برای قیرهای پلیمری هرچقدر Ductility بزرگتری داشته باشد، کاربرد موفقیت آمیزتری را در راهسازی خواهد داشت. جداول ۶-۲۰ الی ۶-۲۳ به ترتیب نتایج آزمایش کشش پذیری را برای قیرهای A و B اصلاح شده توسط پلیمرهای C۵۰۱ و S۴۱۶ نشان می دهند.

جدول ۶-۲۰: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	کشش پذیری در ۲۵°C (cm)
Bitumen A+ ۰% polymer	۱۵۰
Bitumen A+ ۳% polymer	۱۱۷
Bitumen A+ ۴% polymer	۱۱۰
Bitumen A+ ۵% polymer	۹۰
Bitumen A+ ۶% polymer	۶۱

جدول ۶-۲۱: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر A اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene

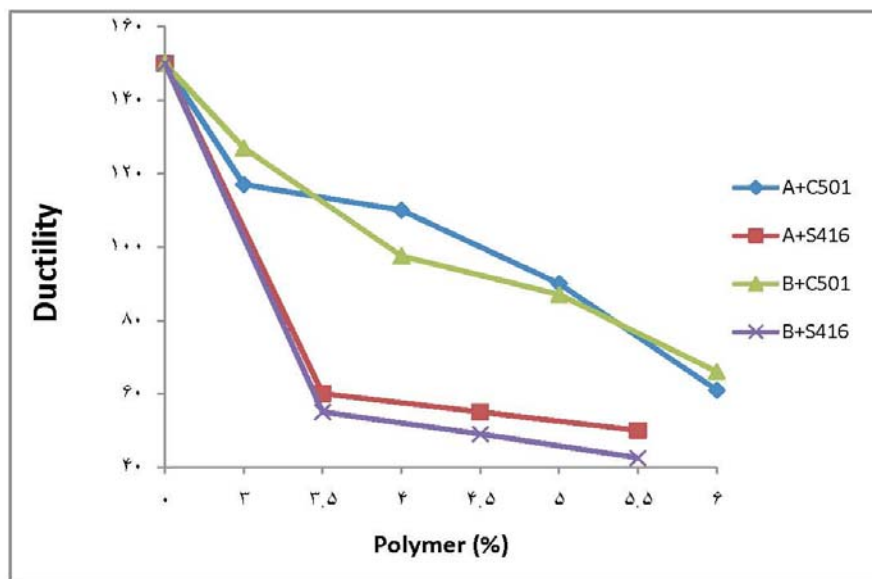
نمونه	کشش پذیری در ۲۵°C (cm)
Bitumen A+ ۰% polymer	۱۵۰
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	۶۰
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	۵۵
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	۵۰

جدول ۶-۲۲: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر B اصلاح شده توسط ۵۰۱ Calprene

نمونه	کشش پذیری در ۲۵°C (cm)
Bitumen B+ ۰% polymer	۱۵۰
Bitumen B+ ۳% polymer	۱۲۷
Bitumen B+ ۴% polymer	۹۷,۵
Bitumen B+ ۵% polymer	۸۷
Bitumen B+ ۶% polymer	۶۶

جدول ۶-۲۲: نتایج آزمایش کشش پذیری برای قیر B اصلاح شده توسط ۴۱۶ Solprene

نمونه	کشش پذیری در ۲۵°C (cm)
Bitumen B+ ۰% polymer	۱۵۰
Bitumen B+ ۳,۵% polymer	۵۵
Bitumen B+ ۴,۵% polymer	۴۹
Bitumen B+ ۵,۵% polymer	۴۲,۵



شکل ۶-۵: تاثیر افزایش پلیمر بر روی کشش پذیری

نشان می دهد که با افزایش درصد SBS خاصیت آنگمی قیرها افزایش یافته است، که این افزایش در درصد های ۴،۵، ۵ و ۵،۵ تقریباً یکسان است. قیر شاهد نیز دارای خاصیت کشش پذیری خوبی می باشد که با افزودن SBS به آن تقریباً این خاصیت حفظ شده است. این خاصیت نشانه ای از چسبندگی قیرها است، هر اندازه قیر چسبنده تر باشد، قابلیت شکل پذیری بیشتری خواهد داشت و نیز دانه های مصالح سنگی را به خوبی به هم می چسباند و از آب شستگی آنها جلوگیری می کند. تغییر زیاد در شیب این نمودار از قیر شاهد به قیر اصلاحی با ۴ درصد SBS، به علت تاثیر افزودن SBS به قیر شاهد بوده که در هر دو ترکیب این روند مشاهده می شود.

۶-۳-۶- نتایج آزمایش نقطه شکست فراس

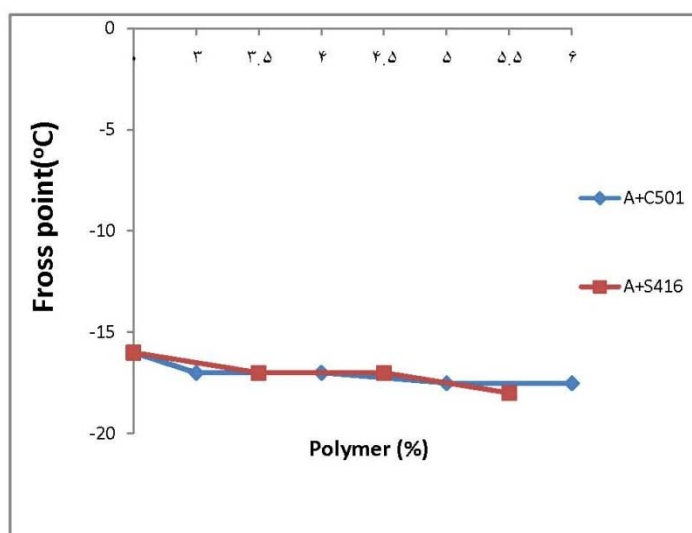
آزمایش نقطه شکست فراس بر روی قیرهای پایه و قیرهای اصلاح شده می تواند صورت گیرد. متأسفانه در انجام این آزمایش مشکلاتی همچون تشکیل فیلم یکنواخت قیر بر روی صفحه، وجود دارد. در انجام این آزمایش بر روی قیرهای خالص با مشکل خاصی روبرو نیستیم زیرا نقطه نرمی این قیرها پایین بوده و فیلم تقریباً یکنواختی بر روی صفحه آزمایش تشکیل می دهند اما هنگام انجام آزمایش بر روی قیرهای پلیمری به دلیل سرد شدن سریع نمونه، علیرغم تمام تلاشهای صورت گرفته جهت پیش گرم کردن صفحه، و همچنین عدم امکان تشکیل فیلم یکنواخت بر روی صفحه، با مشکل روبرو بودیم. در کل این آزمایش برای قیرهای پلیمری چندان توصیه نمی شود. نتیجه آزمایشات به این صورت بود که نقطه شکست فراس برای تمامی نمونه ها در حدود قیر پایه شد. با تمام مشکلاتی که در انجام این آزمایش برای قیرهای پلیمری وجود دارد مطمئناً اعداد بدست آمده بیانگر رفتار شکنندگی این قیرها در دمای پایین نیستند اما از آنجا که نقطه شکست فراس بدتر از قیر پایه نشده است، نشان می دهد که به احتمال زیاد قیرهای پلیمری عملکرد بهتری نسبت به قیرهای پایه در دمای پایین دارند. در مقالات موجود نیز بر روی این آزمایش تأکیدی نمی شود و نتایج به همین صورت گزارش می شوند که نقطه شکست قیر پایه و اصلاح شده تقریباً با هم برابرند.

جدول ۶-۲۳: نتایج آزمایش نقطه شکست فراس برای قیر A اصلاح شده توسط Calprene ۵۰۱

نمونه	نقطه شکست فراس (°C)
Bitumen A+ ۰% polymer	-۱۶
Bitumen A+ ۳% polymer	-۱۷
Bitumen A+ ۴% polymer	-۱۷
Bitumen A+ ۵% polymer	-۱۷,۵
Bitumen A+ ۶% polymer	-۱۷,۵

جدول ۶-۲۴: نتایج آزمایش نقطه شکست فراس برای قیر A اصلاح شده توسط ۱۶ Solprene

نمونه	نقطه شکست فراس (°C)
Bitumen A+ ۰% polymer	-۱۶
Bitumen A+ ۳,۵% polymer	-۱۷
Bitumen A+ ۴,۵% polymer	-۱۷
Bitumen A+ ۵,۵% polymer	-۱۸



شکل ۶-۲۴: تاثیر افزایش پلیمر بر روی نقطه شکست فراس

همانطور که ملاحظه می شود نقطه شکست فراس برای تمامی نمونه ها نزدیک به یکدیگر می باشد و در نتیجه همان طور که گفته شده بود این آزمایش راهنمای خوبی در جهت نشان دادن خواص فیزیکی قیر نمی باشد.

۶-۳-۷- بررسی اثر پیرشدگی بر روی قیرهای اصلاح شده

به منظور بررسی اثر پیرشدگی ما آزمایش اثر همزمان حرارت و هوا بر روی یک فیلم دوار قیر (RTFO) را انجام دادیم. این آزمایش نوعی شبیه سازی از پیرشدگی قیر در عملیات ساخت مخلوط آسفالتی می باشد. ما این آزمایش را بر روی قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده پلیمری انجام می دهیم. درصد تغییر وزن قیر بعد از آزمایش، مطابق استاندارد باید کوچک تر از ۱٪ باشد. معمولاً بر روی نمونه پیر شده در RTFO آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی را انجام می دهند. البته اگر مقدار نمونه به حدی باشد که بتوان آزمایش های مختلف مثل بازیابی الاستیک و کشش پذیری را انجام داد، ارزیابی بهتری را انجام داده ایم. در جدول ۶-۲۶ نتایج آزمایش پیرشدگی بر روی قیر A اصلاح شده پلیمری ارائه شده است.

جدول ۶-۲۵: نتایج آزمایش پیرشدگی برای قیر A اصلاح شده

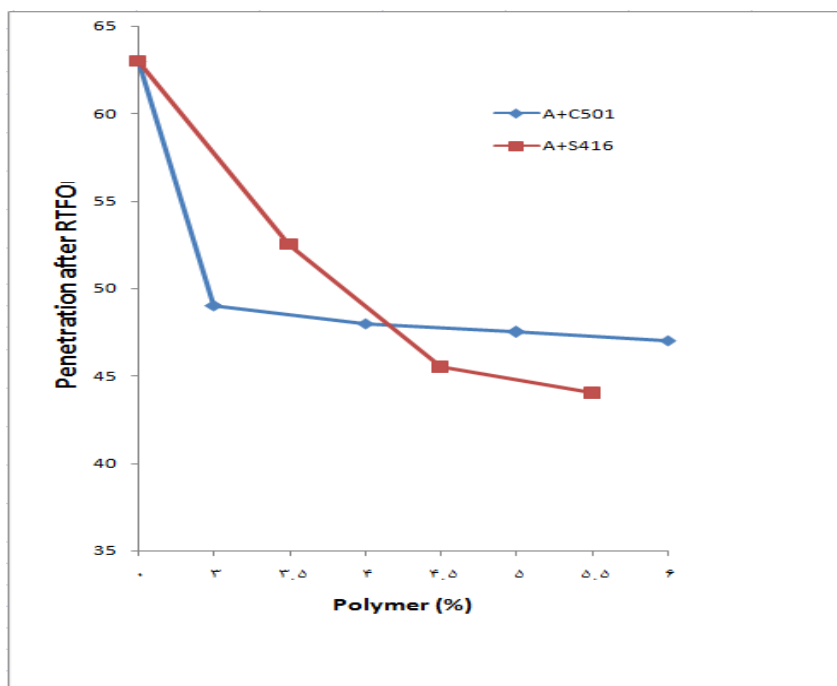
نوع پلیمر	درصد پلیمر	کاهش وزن (%)	درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی (°C)
Calprene ۵۰۱	۰	۰,۱	۶۳	۵۵
	۳	۰,۰۵	۴۹	۵۸,۵
	۴	۰,۰۶	۴۸	۶۰
	۵	۰,۰۶	۴۷,۵	۶۶
	۶	۰,۰۶	۴۷	۹۳,۵
Solprene ۴۱۶	۳,۵	۰,۰۶	۵۲,۵	۶۰,۵
	۴,۵	۰,۰۵	۴۵,۵	۸۲
	۵,۵	۰,۰۶	۴۴	۸۷,۳

در تئوریهای مربوط به پیر شدن قیرها مسئله واکنش آروماتیک های غیراشباع موجود در قیر مثل آروماتیک های قطبی و آروماتیک های نفتنی با اکسیژن هوا مطرح می شود. در واقع اکسیژن، باندهای دوگانه ترکیبات غیراشباع را هدف قرار داده و موجب سخت تر شدن قیرها می شود. اما در مورد پلیمرها و خصوصاً پلیمری مانند SBS قضیه اندکی متفاوت است. SBS از طرفی به دلیل غیراشباع بودن و حضور پیوند پای سست در بوتادین در معرض اکسیژن هوا و پیر شدگی قرار می گیرد که این مورد به سخت تر شدن پلیمرها منجر می شود و از طرف دیگر به دلیل مدت زمان نسبتاً طولانی که قیر در معرض جریان هوا در دمای بالا قرار می گیرد، احتمال تخریب (Degradation) در آن زیاد است و البته این قضیه باعث تخریب ساختار پلیمری و کاهش نقطه نرمی می شود. بنابراین از اینجا متوجه می شویم که در زمان اختلاط نیز مسئله اکسیداسیون و تخریب وجود دارد که به نحوی (مثلاً اختلاط تحت گاز خنثی) باید جلوی آن را گرفت. در مورد قیرهای پلیمری معمولاً دو پدیده اکسیداسیون قیر و تنزل پلیمر از اهمیت بالاتری برخوردار هستند [۸۲].

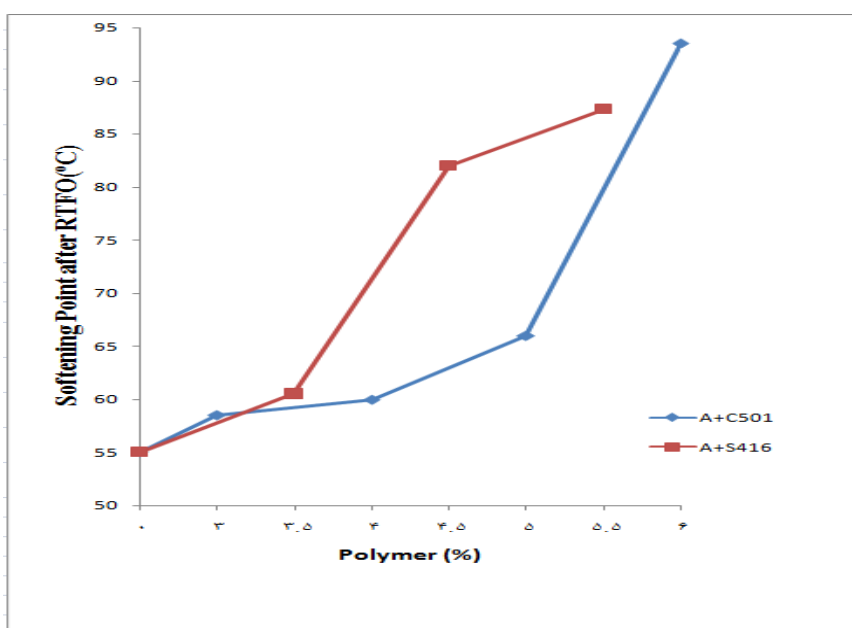
در مورد قیرهای پیر شده در RTFO به دلیل کوتاه بودن زمان پیرشدگی (۸۵ min) بیان می شود که اکسیداسیون قیر بر تخریب پلیمر غالب است لذا بعد از RTFO نقطه نرمی مخلوط بالا می رود. در مورد قیرهای پیر شده در PAV به دلیل زمان طولانی تر پیرشدگی (۲۰hr)، پدیده تخریب پلیمر بر اکسیداسیون قیر معمولاً غالب بوده و در بسیاری از موارد نقطه نرمی کاهش می یابد. بنابراین افزایش نقطه نرمی برای نمونه های ارائه شده در جدول ۶-۲۶ به همین دلایل می باشد.

در اثر پیر شدن و سخت تر شدن، طبیعتاً نقطه نرمی نیز افزایش می یابد که نتایج نیز این مطلب را تأیید می کنند. همچنین ملاحظه می شود که اثر پیرشدگی بر روی قیر پایه شدیدتر از قیرهای اصلاح شده پلیمری بوده است که این موضوع به جلوگیری ورود اکسیژن به مخلوط توسط پلیمر، اشاره دارد. پلیمرها از نفوذ اکسیژن هوا به ترکیب قیر تا اندازه ای جلوگیری می کنند. این جلوگیری در مورد C501 شدیدتر از S416 است زیرا ساختار خطی گونه پلیمر اول، در نفوذ ناپذیری مؤثرتر از نوع شاخه ای عمل میکند.

در شکل های صفحه بعد تاثیر RTFO بر روی نقطه نرمی و درجه نفوذ آورده شده است. مشاهده می شود که درجه نفوذ نمونه های قیری، با افزایش پلیمر SBS کاهش یافته و به تناسب آن قیر سفت تر شده است که این امر نشان دهنده بهبود رفتار قیر در مقابل تغییرات دمایی محیط می باشد، لذا می توان آنها را در منطقه ای با شرایط آب و هوای گرم و میزان ترافیک سنگین استفاده نمود. کاهش درجه نفوذ به معنی کاهش روانی و افزایش قوام در دماهای بالا و متوسط است. این گونه قیرهای پلیمری در دماهای بالا از شیار شدن آسفالت جلوگیری می کنند.



شکل ۶-۷: تاثیر RTFO بر روی درجه نفوذ



شکل ۶-۸: تاثیر RTFO بر روی نقطه نرمی

۶-۴- بررسی رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری

۶-۴-۱- نتایج آزمایش ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی

آزمایش ویسکوزیته چرخشی تحت شرایط استاندارد ASTM:D4402 بر روی تمام نمونه های ساخته شده، انجام گردید. مقادیر ویسکوزیته ای که از این روش آزمایش بدست می آید برای دو هدف زیر استفاده می شود:

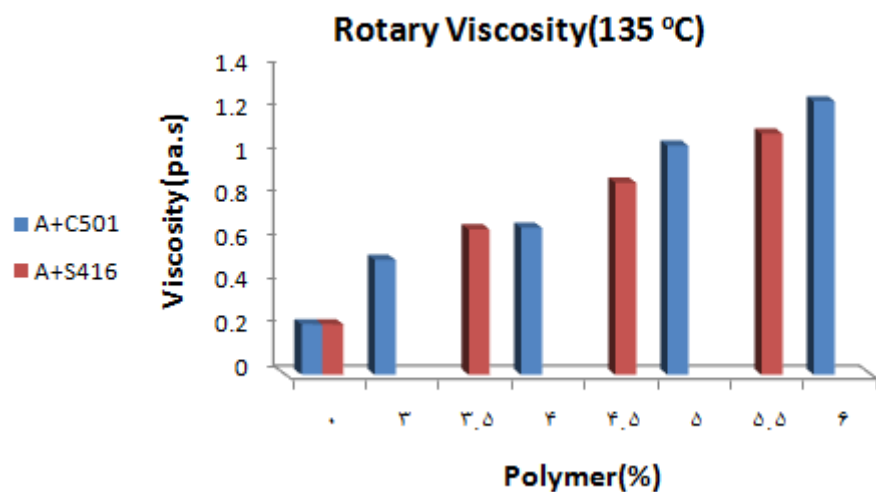
الف) تعیین ویسکوزیته قیرها در دمای پمپاژ و جابجایی^۱

ب) تعیین دمای اختلاط و تراکم آسفالت

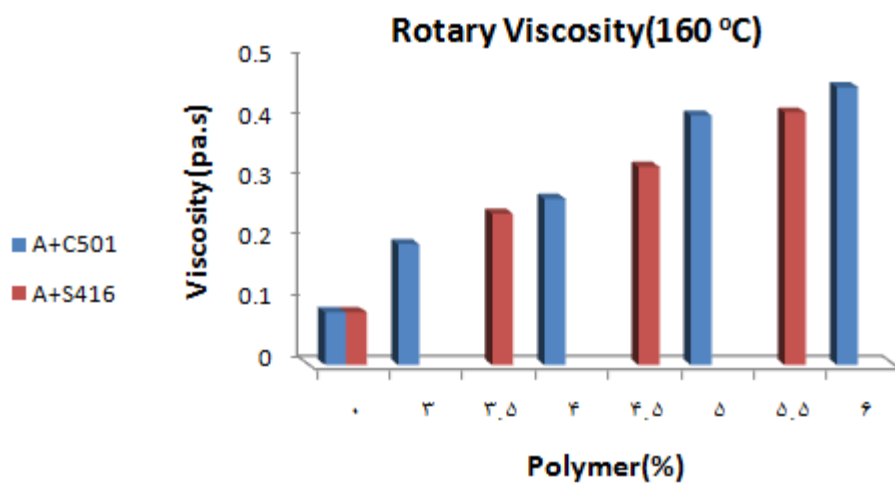
آزمایش ویسکوزیته چرخشی مطابق استاندارد شارپ در دمای 135°C باید صورت گیرد. ویسکوزیته در این دما، نوعی شبیه سازی از عملکرد قیر در هنگام اختلاط با مصالح می باشد. البته این آزمایش در دماهای بالاتر مثل 160°C نیز صورت می گیرد که در این پروژه برای درک بهتر رفتار قیر انجام شده است. مطابق استاندارد شارپ، ویسکوزیته در 135°C باید کوچکتر از $3\text{Pa}\cdot\text{s}$ باشد. معمولاً سرعت چرخش برابر 20RPM انتخاب می شود و شرایط به گونه ای کنترل می شود که گشتاور حدوداً بین $50-80\%$ قرار گیرد. بنابراین قیرها باید به اندازه کافی در دمای ارزیابی شده سیال باشند به گونه ای که قیر قابل پمپاژ و جابجایی (handling) باشد. با بررسی ویسکوزیته قیرها که نتایج آن در ذیل آمده، شرایط استاندارد مذکور را تامین می نماید.

در شکل های ۶-۹ الی ۶-۱۳ نمودار ویسکوزیته چرخشی برحسب درصدهای مختلف SBS با دو رده از پلیمر آورده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش درصد SBS ویسکوزیته چرخشی افزایش یافته است. با توجه به نمودارها هر دو نوع قیر در برابر پلیمرها از روند افزایشی تقریباً برابری برخوردار بودند. همانطور که انتظار می رفت بدلیل آنکه بایندر پایه B نسبت به A از ابتدا ویسکوز تر بوده این خاصیت را بعد از اصلاح شدن با پلیمر نیز در خود حفظ کرده است.

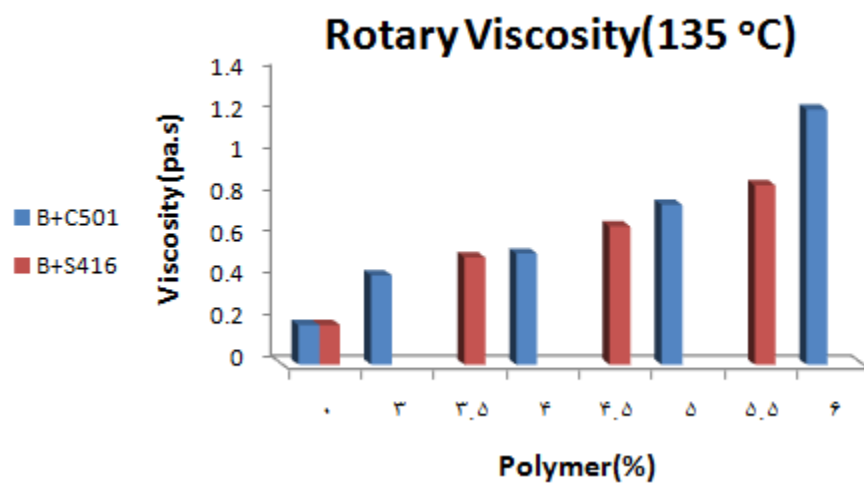
^۱ -handling



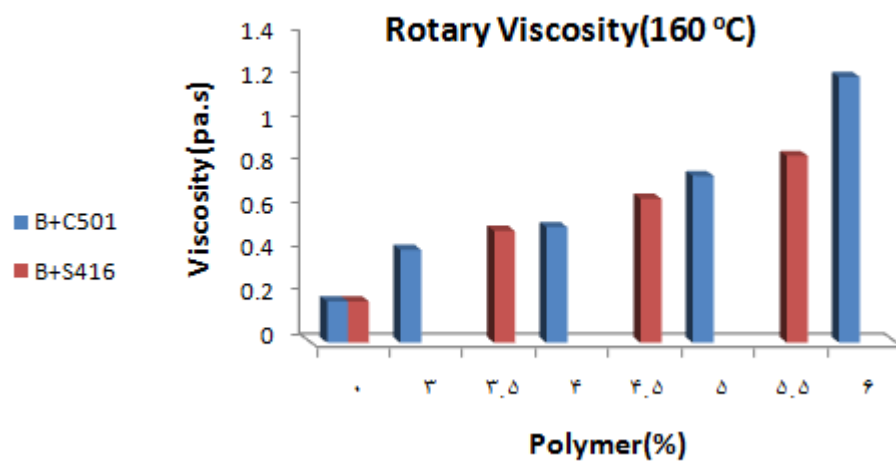
شکل ۹-۶: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A (دمای ۱۳۵°C)



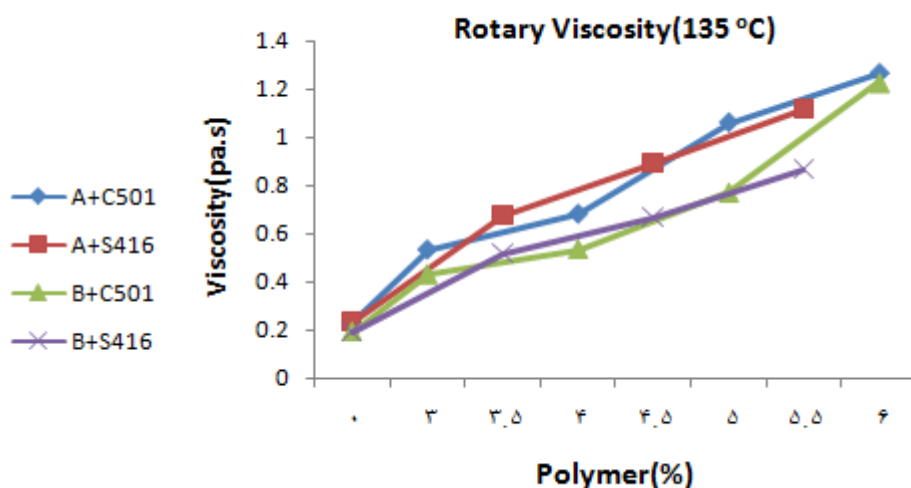
شکل ۱۰-۶: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A (دمای ۱۶۰ °C)



شکل ۶-۱۱: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده B (دمای ۱۳۵°C)



شکل ۶-۱۲: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده B (دمای ۱۶۰°C)



شکل ۶-۱۳: تاثیر افزایش پلیمر بر روی ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح شده A,B (دمای ۱۳۵°C)

۶-۴-۲- نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR)

بهترین راه جهت بررسی رئولوژیکی رفتار قیر در دماهای متوسط و بالا استفاده از رئومتر برش دینامیکی می باشد. آزمایش بر روی نمونه اولیه (Original)، نمونه پیر شده در RTFO و نمونه پیر شده در PAV می تواند صورت گیرد. این آزمایش در هر دو حالت کنترل کرنش (Strain Controlled) و کنترل تنش (Stress Controlled) می تواند صورت گیرد اما استاندارد شارپ بر روی کنترل کرنش، بیشتر تأکید دارد لذا ما نیز در این حالت با دستگاه کار کرده ایم.

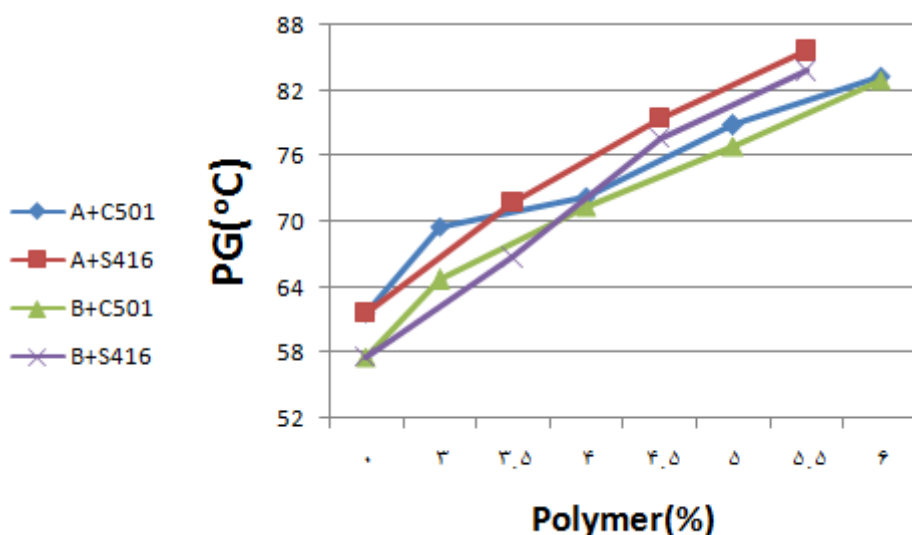
دستگاه در فرکانس ثابت ۱۰ rad/s و کرنش حدود ۱۲٪ کار می کند. محدوده دمایی آزمایش به طور دلخواه انتخاب می شود اما مطابق استاندارد شارپ دمای ۵۸°C به عنوان دمای آغازین انتخاب و متناسب با نتایج حاصله، دما را کاهش یا افزایش می دهیم که این تغییرات دما با فواصل ۶°C انجام می گیرد. برای

نمونه اولیه، بالاترین دمایی که در آن $\frac{G^*}{\sin \delta} > 1KPa$ باشد را ثبت و گزارش میکنند. این آزمایش بر روی

نمونه پیر شده در RTFO نیز باید انجام شود و بالاترین دمایی که در آن $\frac{G^*}{\sin \delta} > 2.2KPa$ گردد، ثبت و

گزارش می شود. از بین دو دمای بدست آمده از بایندر اولیه و پیر شده، آن دمایی که کوچکتر باشد را به عنوان حد بالای دمایی گرید عملکردی گزارش می نمایند. در نمونه پیر شده در RTFO، کرنش برابر حدوداً ۱۰٪ انتخاب می شود. در هر دو حالت، از صفحات ۲۵ میلیمتری با فاصله بین صفحه ای ۱mm استفاده می شود. دستگاه حتماً باید در محدوده ویسکوالاستیسیته خطی که شبیه سازی از عملکرد قیر در آسفالت می باشد کار کند. بنابراین ابتدا باید ناحیه ویسکوالاستیسیته خطی بررسی شود.

ناحیه ویسکوالاستیسیته خطی ناحیه ای است که تغییرات G^* برحسب کرنش در آن کمتر از ۱۰٪ باشد. در شکل ۶-۱۴ نتایج حاصله ارائه شده اند.



شکل ۶-۱۴: تاثیر افزایش پلیمر بر روی DSR قیرهای اصلاح شده A,B

همانطور که ملاحظه می گردد با افزایش درصد پلیمر (مطابق روند اجرا شده) افزایش به اندازه یک گرید را شاهد هستیم. که در نهایت با درصد ۶ در پلیمر C501 و 5/5 در S416 تمامی نمونه ها به گرید ۸۲ که تمامی مناطق ایران را پوشش می دهد رسیده ایم.



شکل ۶-۱۵: نقشه ایران با PGهای مربوط به هر شهر

۶-۴-۱- نتایج آزمایش پایداری در ذخیره سازی (Storage Stability)

قیرهای اصلاح شده با SBS عملکرد بسیار مناسبی را در تمامی محدوده دمایی سرویس دارند. این قیرها ترک های ناشی از خستگی در دماهای پایین و شیارافتادگی را به طرز مؤثری بهبود می دهند، اما مهمترین مشکل قیرهای پلیمری را می توان نداشتن پایداری انبارداری مناسب ذکر کرد.

قیر اصلاح شده توسط SBS به صورت سیستم سوسپانسیونی می باشد. ذرات پلیمر به صورت سوسپانسیون داخل مالتن قیر متورم می گردند. می دانیم که نیروهای وزنی، بویانسی و دراگ، نیروهای موجود در این گونه سیستم ها هستند و سرعت صعود ذرات پلیمر را می توان از قانون استوک محاسبه نمود. این قانون به صورت زیر است:

$$V = \frac{2(\rho_s - \rho_l)gr^2}{9\eta}$$

که پارامترهای این رابطه عبارتند از:

ρ : دانسیته قیر، ρ_1 : دانسیته SBS، g : شتاب ثقل، r : متوسط شعاع ذرات SBS، η : ویسکوزیته

قیر اصلاح شده [۸۷].

همانطور که می دانیم دانسیته پلیمرها کمتر از دانسیته قیر می باشد. با افزایش پلیمر به قیر، پلیمرها مالتن قیر را جذب می کنند و متورم می شوند. میزان تورم بعضاً تا ۹ برابر مقدار اولیه گزارش شده است. این تورم باعث کاهش دانسیته پلیمرها می شود و جدا شدن فازها را تسریع می نماید.

قیر به صورت یک سیستم کلئیدی، مرکب از آسفالتنهایی با جرم مولکولی بالاست که در هیدروکربورهای با جرم مولکولی پایین به نام مالتن، توزیع شده اند و از لحاظ شیمیایی بسیار متفاوتند. نقش این مالتن ها و اجزای رزینی همراه قیر، پایدار نگهداشتن توزیع آسفالتن هاست. اما آنها همچنین وظیفه حل کردن هرگونه ترموپلاستیک الاستومر افزوده شده به قیر را نیز بر عهده دارند. حلالیت ناکافی و یا بیش از اندازه بودن مقدار آسفالتن، دیر یا زود، در حین اختلاط یا در شرایط سرویس، موجب جدایش آسفالتن (و یا ترموپلاستیک الاستومر) خواهد شد.

مخلوطهای ساده دو جزئی قیر- پلیمر، در درجه حرارت سرویس، عموماً مرکب از دو فاز هستند، ویژگیهای این دو فاز، که یکی غنی از آسفالتن و دیگری غنی از پلیمر می باشد، بسیار متفاوت از یکدیگر بوده و هر کدام که فاز پیوسته مخلوط را تشکیل دهند، خواص مخلوط را تعیین خواهند کرد. در آمیزه های قیر/SBS، در درصدهای پلیمر ۵-۸٪، بسته به نوع قیر، پلیمر فاز پیوسته را تشکیل می دهد. فاز غنی از پلیمر که در مالتن قیر گسترش یافته است، بخش اعظم پلیمر را در بر دارد و پلیمر یک شبکه را در آن تشکیل داده

است، لذا چنانچه این فاز پیوسته باشد، شبکه پلیمری در کل قیر تشکیل شده است. با افزودن پلیمرهای ترموپلاستیک الاستومر که دارای جرم مولکولی معادل یا بیشتر از آسفالتن‌ها هستند، تعادل فازها بهم خورده و به عبارت عامیانه‌تر، می‌توان گفت که دو گروه پلیمرها و آسفالتن‌ها برای توان حلالیت فاز مالتن رقابت می‌کنند. بسته به توان حلالیت موجود و مورد نیاز، جدایش فاز ممکن است رخ دهد.

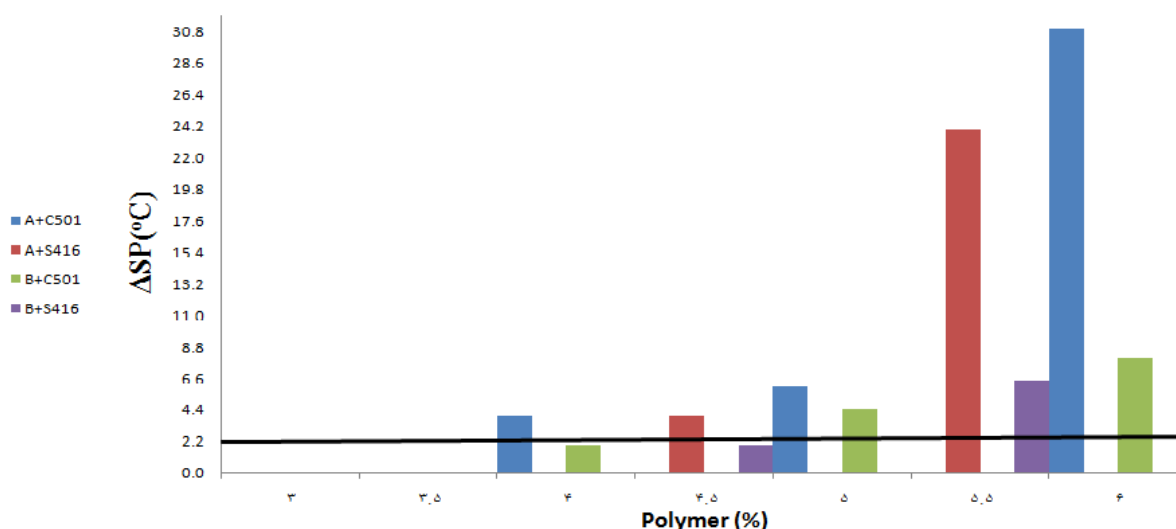
ما آزمایش پایداری انبارداری را انجام دادیم و سپس آزمایش نقطه نرمی را بر روی قسمت بالایی و پایینی قیر درون تیوب آلومینیومی انجام دادیم. نتایج در جداول ۶-۲۷ و ۶-۲۸ ارائه شده است.

جدول ۶-۲۶: نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی بر روی قیر A اصلاح شده

نمونه	Bitumen A + C501					Bitumen A + S416		
	۰	۳	۴	۵	۶	۳,۵	۴,۵	۵,۵
SP _{top}	-	۵۷	۶۳	۶۹	۹۶	۵۷	۶۶	۹۴
SP _{bot} tom	-	۵۷	۵۹	۶۳	۶۵	۵۷	۶۲	۷۰
ΔSP	-	۰	۴	۶	۳۱	۰	۴	۲۴

جدول ۶-۲۷: نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی بر روی قیر B اصلاح شده

نمونه	Bitumen B + C501					Bitumen B + S416		
	۰	۳	۴	۵	۶	۳,۵	۴,۵	۵,۵
SP _{top}	-	۵۳,۵	۵۵	۶۹,۵	۸۳	۵۵	۵۶	۷۴,۵
SP _{bot} tom	-	۵۳,۵	۵۷	۶۵	۷۵	۵۵	۵۴	۶۸
ΔSP	-	۰	۲	۴,۵	۸	۰	۲	۶,۵



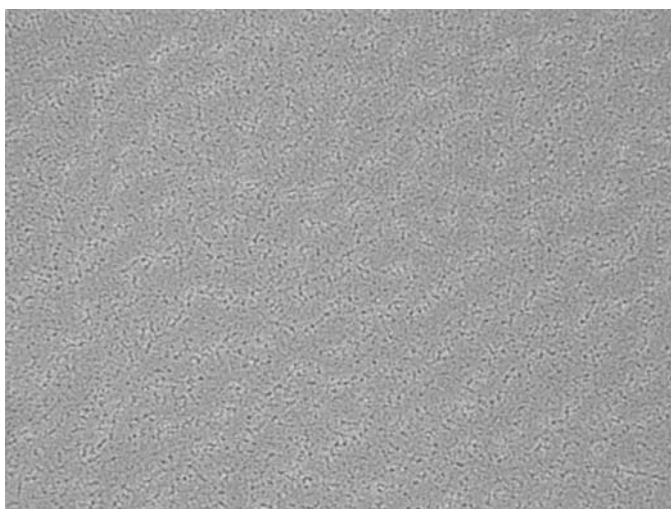
شکل ۶-۱۵: تاثیر افزایش پلیمر بر نقطه نرمی در آزمایش Storage Stability

مطابق استاندارد ASTM، حداکثر اختلاف نقطه نرمی بین بالا و پایین تیوب باید $2,2^{\circ}\text{C}$ باشد. همانطور که ملاحظه می شود هیچیک از نمونه ها تا ۳,۵ درصد مشکلی نداشتند و بالاتر از این درصد سایر نمونه ها در محدوده استاندارد نیستند. باید به این نکته توجه داشت که در میان پلیمرهایی که به عنوان اصلاح کننده استفاده می شوند، SBS از سازگاری و پایداری ذخیره سازی بالاتری با قیر برخوردار است. چنانچه ما مثلاً با PE کار می کردیم نتایج به مراتب بدتر بود. با افزایش درصد پلیمر به دلیل جذب مالتن بیشتر و رقابت شدیدتر میان فاز غنی از آسفالتن و فاز غنی از پلیمر، پایداری کاهش می یابد. در مورد S416 به دلیل جرم مولکولی بالاتر و نیاز به جذب مالتن بیشتر، پایداری کمتر است و برای قیر B اصلاح شده، به دلیل آسفالتن بیشتر و تشکیل شبکه پلیمری در آن، پایداری بیشتر از قیر A می باشد.

۶-۴-۳- مورفولوژی

یکی دیگر از راههای بررسی پایداری ذخیره سازی، بررسی مورفولوژیکی قیرهای اصلاح شده می باشد. به کمک مورفولوژی و بررسی ساختارهای مشاهده شده بوسیله آن، می توان حتی درصد مناسب پلیمر را نیز بدست آورد. در درصدهای پایین پلیمر، دانه های سفید SBS درون ماتریکس قیری پراکنده می شوند. با افزایش درصد پلیمر، شبکه پیوسته پلیمری شروع به تشکیل شدن می کند. چنانچه درصد پلیمر

بیش از حد بالا رود، جای فاز پیوسته و پراکنده عوض شده و ناحیه های روشن در تصویر بیشتر از نواحی تیره می شود. در درصد مناسب پلیمر، دو فاز به صورت در هم گره خورده (Interlock) دیده می شود ما چند عکس از قیرهای پلیمری بلافاصله بعد از اختلاط و پس از یک ساعت ذخیره سازی گرفته و تصاویر در شکل های ۱۶-۶ و ۱۷-۶ ارائه شده است. در تصاویر ارائه شده فاز قیری تیره تر و دانه های پلیمر اندکی روشن تر به نظر می رسند.

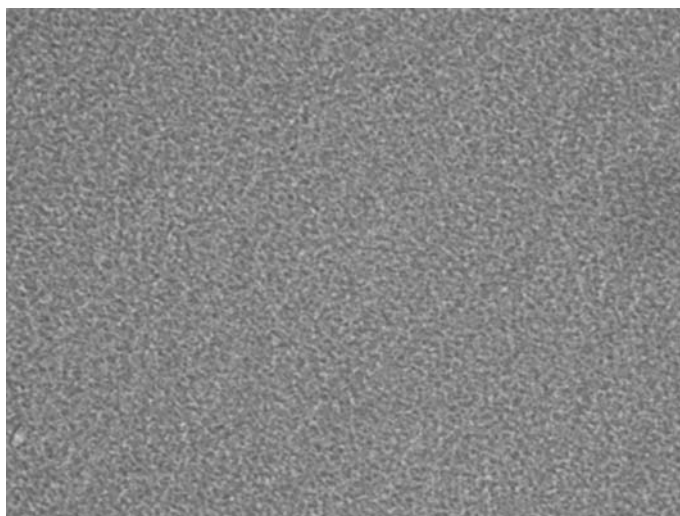


الف



ب

شکل ۱۶-۶: تصاویر مورفولوژی برای قیر A اصلاح شده توسط ۵٪ C₅₀₁ (الف) بلافاصله بعد از اختلاط (ب) پس از یک ساعت ذخیره سازی در ۱۶۳°C



الف



ب

شکل ۶-۱۷: تصاویر مورفولوژی برای قیر B اصلاح شده توسط ۰۱٪ C_{۵۰} (الف) بلافاصله بعد از اختلاط (ب) پس از یک ساعت ذخیره سازی در ۱۶۳°C

همانطور که در این شکل ها ملاحظه می شود اختلاط ما مناسب بوده است و تصاویر مورفولوژی، پخش شدن مناسب پلیمر درون قیر را تأیید می نماید. بنابراین زمان اختلاط مناسب بوده است. تنها بعد از یک ساعت ذخیره سازی ملاحظه می شود که ذرات پلیمر تمایل دارند تجمع پیدا کنند و تشکیل ناحیه (Domain) پلیمری را بدهند.

با توجه به مطالب ارائه شده، قیرهای پلیمری از پایداری ذخیره سازی برخوردار نبوده و اصلاح آنها امری ضروری به نظر می رسد. این امر مبنای استفاده از نانو ذرات در قیرهای پلیمری می باشد. اصولاً در حال حاضر قیرهای پلیمری را چندان به صورت داغ ذخیره سازی نمی نمایند و معمولاً توصیه شده که در کارگاههای راهسازی پس از ساخت، بلافاصله به مصرف برسند.

نتیجه گیری:

- ۱- نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی قیرهای پایه و آلیاژ قیر/SBS نشان داد که در قیرهای پایه، فقدان بازیابی الاستیک، نقطه نرمی پایین تر و اندیس نفوذ کمتر، به محدود بودن دمای سرویس دهی آنها منجر می شود. درحالی که قیرهای پلیمری دارای نقطه نرمی بالاتر، درجه نفوذ کمتر و بازیابی الاستیک بسیار مطلوبی بودند. بنابراین محدوده دمایی سرویس دهی در حضور پلیمر، وسیع تر می شود.
- ۲- نتایج آزمایشات رئولوژیکی صورت گرفته نشان دادند که قیرهای پایه رفتاری کاملاً ویسکوز را در دماهای بالا نشان می دهند و از الاستیسیته مناسبی نیز بهره مند نیستند. در حالی که در قیرهای اصلاح شده با درصد مناسب SBS، رفتار الاستیک غالب می باشد و دمای بالای رده عملکردی برای این قیرها بالاتر از قیرهای پایه می باشد.
- ۳- نتایج نقطه شکست فراس و کشش پذیری در 4°C نشان دادند که قیرهای پلیمری در دماهای پایین سرویس دهی از الاستیسیته بهتری نسبت به قیر پایه بهره مند هستند.
- ۴- درصد مناسب پلیمر، با توجه به تمامی آزمایشات انجام شده، به نوع قیر پایه، ساختار شیمیایی قیر پایه و نوع پلیمر وابسته است. برای قیر ۸۵/۱۰۰ و ۱۲۰/۱۵۰، ۶٪ پلیمر Calprene ۵۰۱ و ۵/۵٪ پلیمر Solprene ۴۱۶ مناسب می باشد. (این انتخاب پوشش دهنده تمامی مناطق ایران می باشد)
- ۵- نتایج آزمایش پایداری در انبارداری و تصاویر مورفولوژی نشان دادند که قیرهای پلیمری از پایداری مناسبی در انبارداری برخوردار نیستند و جدایش فازها امری اجتناب ناپذیر است.
- ۶- کامپوزیت سه گانه قیر/پلیمر و نانوذرات به روش اختلاط مذاب تهیه شد. بهترین ترتیب خوراک دهی، افزودن نانوذرات به آلیاژ قیر/پلیمر می باشد زیرا در این روش امکان نفوذ همزمان قیر و پلیمر در فضای بین صفحات نانوکلی، وجود دارد.
- ۷- نانوذرات بسته به درصد وزنی آنها نسبت به پلیمر در قیر رفتار متفاوتی را باعث می شوند. بر اساس آزمایشات در صورت افزودن درصد وزنی نانو کلی به پلیمر تا سقف ۲۰ درصد، درجه نفوذ افزایش، نقطه نرمی تقریباً ثابت و کشش پذیری تا حد جزئی کاهش می یابد و در صورت استفاده از درصد وزنی پلیمر بیش از ۳۵ درصد، علی رغم کنترل پایداری در ذخیره سازی باعث تخریب شبکه پلیمری ساخته شده در قیر می شود. کما اینکه این مطلب در دمای پایین مدول الاستیک آسفالت خود را نشان داده است. بازیابی الاستیک در کامپوزیت های سه گانه بیشتر از مخلوط قیر/پلیمر می باشد و همچنین کشش پذیری در 4°C نیز برای کامپوزیتها بیش از آلیاژ قیر/پلیمر می باشد. با توجه

به تمامی این تفاسیر، عملکرد قیرها در محدوده دمایی بالا و پایین سرویس، در حضور نانوذرات، بهبود یافته است. در ضمن نتایج پیر شدگی کوتاه مدت در RTFO نشان دادند که نانوذرات از پیری قیرها تا اندازه ای ممانعت به عمل می آورند.

۸- نتایج آزمایشات رئولوژی نیز نشان دادند که دمای بالای عملکردی، در حضور نانوذرات بیشتری شود و همچنین مدول الاستیک نیز افزایش میابد.

۹- نتایج مورفولوژی و پایداری در ذخیره سازی نشان دادند که اختلاف نقطه نرمی بین بالا و پایین تیوب آلومینیومی، صفر شد و لذا مخلوط کامپوزیت سه گانه از پایداری مناسبی در ذخیره سازی بهره مند است.

پیشنهادات:

۱- پیشنهاد می گردد تا در مطالعات بعدی تأثیر پیر شدگی طولانی مدت (PAV) و از آن مهم تر، آزمایش BBR به منظور نشان دادن تأثیر پلیمر و نانوذرات بر روی خواص در دمای پایین و طبقه بندی عملکردی، بررسی گردد.

۲- پیشنهاد می گردد تا از تصاویر SEM جهت نشان دادن پخش شدن نانوذرات درون قیر و ساختار حاصله، استفاده گردد.

۳- پیشنهاد می گردد تا تأثیر نانوکلی بر روی پلیمرهایی که مسئله جدایش فازها در آنها بسیار شدیدتر است، مثل PE، بررسی گردد.

۴- نوع نانوکلی و ساختارهای بوجود آمده به ازای مقادیر مختلف آنها، بهتر است تحقیق شود.

۵- همانطور که در شکل ها ملاحظه شد اختلاط ما مناسب بوده و تصاویر مورفولوژی، پخش شدن مناسب پلیمر درون قیر را تأیید می نماید. بنابراین زمان اختلاط مناسب بوده است. تنها بعد از یک ساعت ذخیره سازی ملاحظه می شود که ذرات پلیمر تمایل دارند تجمع پیدا کنند و تشکیل ناحیه (Domain) پلیمری را بدهند.

۶- با توجه به مطالب ارائه شده، قیرهای پلیمری از پایداری ذخیره سازی برخوردار نبوده و اصلاح آنها امری ضروری به نظر می رسد. این امر مبنای استفاده از نانو ذرات در قیرهای پلیمری می باشد. اصولاً در حال حاضر قیرهای پلیمری را چندان به صورت داغ ذخیره سازی نمی نمایند و معمولاً توصیه شده که در کارگاههای راهسازی پس از ساخت، بلافاصله به مصرف برسند.

مراجع:

- [۱] بهرام نژاد داریوش، ریاضی محمدرضا، دبیر بهرام، نظریه‌ی علی احسان، "امکان اختلاط قیرهای پایه ایران با پلیمرهای خانواده SBS و بررسی خواص فیزیکی-مکانیکی و رئولوژیکی آنها جهت مصارف راهسازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، اسفند ۱۳۷۲
- [۲] فخری، منصور، (۱۳۸۵)، "کاربرد پلیمر در بهبود خواص قیرها و مخلوط های آسفالتی"، چاپ اول، یک جلد، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری پژوهشکده حمل و نقل.
- [۳] محمد سرائی پور، "آسفالت"، اسفند ۱۳۸۰
- [۴] محمد رضایی، عباس، (۱۳۷۷)، "مجموعه کاربردی راه و آسفالت"، انتشارات آدانا.
- [۵] "The asphalt handbook", second edition, march ۱۹۶۶ The asphalt institute.
- [۶] Whiteoak CD, "The shell bitumen handbook". Surrey, UK: Shell Bitumen; ۲۰۰۳.
- [۷] Philadelphia. PA, "Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials", vol. ۰۴,۰۳, (۲۰۰۴).
- [۸] Philadelphia. PA, "Annual Book of ASTM Standards", vol. ۰۴,۰۴, (۲۰۰۴).
- [۹] Anderson, D.A, Christensen, D.W., Bahia, H.U., "Binder Characterization and Evaluation", Volume ۳, Report SHRP-A-۳۶۹, Strategic Highway Research Program (۱۹۹۴).
- [۱۰] "AASHTO Provisional Standard", American Association of State Highway and Transportation Officials, (۱۹۹۳).
- [۱۱] Superpave, "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing", Superpave Series No. ۱ (SP-۱), Asphalt Institute, (۱۹۹۴).
- [۱۲] Kennedy, T.W., Solaimanian, M., "Superpave Asphalt Binder Tests and Specification", A Product of SHRP, The University of Texas at Austin.
- [۱۳] P. Partal, "Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumen's", FUEL ۲۰۰۴.
- [۱۴] P. Partal, "Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumen's", Chemical engineering journal ۲۰۰۲.

- [١٥] Y.Yildirim, “*Polymer modified asphalt binders*”, Construction and building materials, ٢٠٠٥.
- [١٦] P. Partal, “*Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen*”, FUEL ٢٠٠٥
- [١٧] A. Santamaria, “*Rheology and stability of bitumen/EVA blends*”, European polymer journal, ٢٠٠٤
- [١٨] G.Polacco, “*Asphalt modification with different polyethylene-based polymer*”, European polymer journal, ٢٠٠٥
- [١٩] “*Block Copolymers*”, Marcel Dekker, ٢٠٠٠
- [٢٠] Folkes, M J ED, “*Processing, structure & properties of block copolymers*”, ١٩٨٥
- [٢١] K. Stangl, “*The Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Modification on the Characteristics and Performance of Bitumen*”, Monatshefte for Chemie Chemical Monthly, ٢٠٠٧
- [٢٢] Ulf Isacson, “*Low-temperature properties of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen’s*”, Construction and building materials, ١٩٩٨
- [٢٣] G.D.Airey, “*Properties of Polymer Modified Bitumen after Rubber-Bitumen Interaction*”, Journal of materials in Civil Engineering, ٢٠٠٢
- [٢٤] P.Ahmedzade, “*Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS*”, Construction and building materials, ٢٠٠٥
- [٢٥] Y.Zhang, “*Improved properties of SBS-modified asphalt with dynamic vulcanization*”, polymer engineering and science, ٢٠٠٢
- [٢٦] Y.Zhang, “*Vulcanization Characteristics of Asphalt/SBS Blends in the presence of sulfur*”, Journal of applied polymer science, ٢٠٠١
- [٢٧] Hilde Soenen, “*Influence of thermal history on rheological properties of various bitumen*”, Rheol acta, ٢٠٠٥
- [٢٨] Constantinides, G., “*Mixtures of bitumen with SBS polymers*”, RIVISTA DEICOMBUSTIBLL, ١٩٨٧
- [٢٩] Junisbekov, T.M. , “*Stress Relaxation in Viscoelastic Materials*”, Science

Pub., 2003

[30] M.Garcia, Process, "rheology and storage stability of recycled EVA/LDPE modified bitumen", J. polymer engineering and science, v 47, n 2, February, 2007, p 181-191

[31] Y.Ruan, "The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts", J.FUEL, 2003

[32] X. Lu, U. Isacson, "Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens", FUEL, 1997

[33] Xiaohu Lu, "Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance", J. Construction and Building MATERIALS, 2006.

[34] D. Valtorta et al., "Rheological properties of polymer modified bitumen from long-term field tests", FUEL, 2006

[35] Aklonis, John J. "Introduction to Polymer Viscoelasticity", Wiley Interscience, 2000

[36] S.S.Ray, M. Okamoto, "polymer/layered silicate. Nano composites; a review from preparation to processing", progress in polymer science, 28(2003) 1539-1641.

[37] Utracki LA, "Clay-containing polymeric nanocomposites", Shawburi: Rapra Technology; 2004

[38] N. Fedullo, J. Devaux; "polymer – based nanocomposites: overview, applications and perspectives", Progress in organic coatings (2006).

[39] Messersmith PB, Giannelis EP. "Synthesis and characterization of layered silicate-epoxy nanocomposites". Chem Mater 1994;6:1791-20.

[40] Ian T, Pinnavaia TJ. "Clay –reinforced epoxy nanocomposites". Chem Mater 1994;6:2216-9.

[41] Bahia, H.U., Anderson, D.A., (1994), " Binder Rheological Parameters : Background and Comparison With Conventional Properties", Strategic Highway Research Program, Washington, D.C.

[42] Krishnamoorti, Vaia RA, Giannelis EP. "Structure and dynamics of polymer-

layered silicate nanocomposites". Chem Mater 1996;8:1728-34.

[43] Jun-Ting Xu, Q. Wang; "Nanothermal crystallization kinetics of exfoliated and intercalated polyethylene/montmorillonite nanocomposites prepared by in situ polymerization", European Polymer Journal (2000).

[44] W. Dang, J. Qiao; "Preparation of High Barrier and Exfoliated Type Nylon - 7/ultrafine full-reclanized powered Rubber/clay Nanocomposites", Mactomolecules 2000, 38, 4001-4003.

[45] M.Okamoto, Ph. H. Nam; "Biaxial Flow - induced alignment of silicate layers in polypropylene / clay Nano composites Foam", Nano letters, 2001, Vol. 1, No.9, 503

[46] W.Gianelli, G.Carnino; "Effect of matrix features on polypropylene layered silicate nanocomposites", Poymer 36(2000)7037-7046.

[47] R.A.Vaia, R. Krishnamoort; "Isothermal crystallization of Nylon- 7/Montmorillonete Nanocomposites", Macromolecules 2004, 37, 4004-4011.

[48] M.Okamoto. Ph.M.Nam; "A house of cards structure in polypropylene/clay nanocomposites under Elongational flow", Nano litters, 2001, Vol.1, No.6, 290-298.

[49] J.L.Yang, Zh. Zhang, "on the characterization of tensile creep resistance of polyanide 77 nanocomposites. Part I. Experimental results and general discussions", Polymer 47 (2006) 2791-2801.

[50] P.K. Mallick, Y. Zhou; "Yield and fatigue behavior of polypropylene and polyamide nanocomposites", Journal of materials science 38 (2003) 3183- 3190.

[51] Kojima Y, Usuki A, Kawasumi M, Okada A, Kurauchi T, Kamigaito O. "One -pot synthesis of nylon 7-clay hybrid". J Polym Sci, Part A: Polym Chem 1993;31:1700-8.

[52] Bahia, H.U., Anderson, D.A.,(1994)," Binder Rheological Parameters : Background and Comparison With Conventional Properties", Strategic Highway Research Program, Washington, D.C.

[53] Garces JM, Moll DJ, Bicerano J, Fibiger R, McLeod DG. "Polymeric nanocomposites for automotive applications". Adv Mater 2000;12:1830-9.

[54] Yetkin Yildirim, "Polymer modified asphalt binders", Construction and Building MATERIALS, 2000

- [٥٥] Sengoz B., Isikyakar G., “*Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods*”, Journal of Hazardous Materials, ٢٠٠٨, ١٥٠, ٤٢٤–٤٣٢.
- [٥٦] Sengoz B., Isikyakar G., “*Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen*”, Construction and Building MATERIALS, ٢٠٠٨
- [٥٧] Sengoz B., Isikyakar G., “*Morphology and image analysis of polymer modified bitumens*”, Construction and Building MATERIALS, ٢٠٠٨
- [٥٨] Gordon D. Airey, “*Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified Bitumens*”, Construction and Building MATERIALS, ٢٠٠٢
- [٥٩] Gordon D. Airey, “*Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens*”, FUEL, ٢٠٠٣
- [٦٠] Gordon D. Airey, “*Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens*”, Journal of Materials Science, ٢٠٠٤
- [٦١] Chen J S, Liao M C, Lin C H, “*Determination of polymer content in modified bitumen*”, Materials and Structures, ٢٠٠٣, ٥٩٤–٥٩٨.
- [٦٢] Stroup-Gardiner M A., “*Relationships between Rheological properties and Morphology for Polymer Modified Asphalts*”, PhD Dissertation, University of Minnesota, ١٩٩٧.
- [٦٣] Ghile D B., “*Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures*”, MSc Dissertation, Delft University of Technology, ٢٠٠٦.
- [٦٤] Aflaki, S., Tabatabaee, N.,(٢٠٠٩),”Proposals for Modification of Iranian Bitumen to meet the climatic Requirements of Iran”, Construction and Building Materials, pp. ٢١٤١-٢١٥٠.
- [٦٤] Annual Book of ASTM Standard,(١٩٩٧),” American Society for Testing and Materials”,Part ١٥.
- [٦٥] Virginie Mouillet et al., “*Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers*”, FUEL, ٢٠٠٧
- [٦٦] X. Lu, U. Isacson, “*Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens*”, Materials and Structures, ١٩٩٦

Abstract

In this paper the effect of two grades of Styrene-Butadiene-Styrene on bitumens ۸۵/۱۰۰ & ۱۲۰/۱۵۰ was studied. Physical, mechanical and the most important, rheological properties of polymer modified bitumens and the original binders are studied and compared with each other. Modification of bitumen with polymer nanocomposites was done for the first time in Iran. Also hysical,mechanical and rheological properties of bitumen/polymer/nanoclay composites were compared with bitumen/polymer too. Rheological experiments were done according to the SHRP method.

Keywords: Bitumen, SBS, Nanoclay, rheological properties, SHRP experiments.