# ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیک قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک و پلیمر EVA

**امیرحسین عامری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران**

**محمود عامری*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران**

**حمید شاکر، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران**

**محمود کرم‌رودی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران**

Email: ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰ – پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

## چکیده

**استفاده از مواد ضایعاتی برای بهبود خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی علاوه بر مزایای اقتصادی، مزایای زیست‌محیطی فراوانی دارد. پودر لاستیک از جمله این مواد ضایعاتی است که می‌تواند باعث بهبود بسیاری از خصوصیات مخلوط آسفالتی، بخصوص در دماهای کم شود. اما این افزودنی ضعف‌هایی نیز دارد که آنها را می‌توان با ساخت افزودنی دوگانه بر پایه پودر لاستیک جبران نمود. از همین رو، در این پژوهش، تأثیر پودر لاستیک و پلیمر EVA بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیک قیر خالص بررسی شده است. به همین منظور، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته دورانی و رئومتر برشی دینامیک با استفاده از دستگاه DSR روی قیر شاهد و قیر اصلاح‌شده با ترکیبی از ۱۰ و ۱۵ درصد پودر لاستیک و پلیمر EVA برحسب درصد وزنی قیر پایه (شاهد) با نسبت‌های مختلف انجام شده است. نتایج حاصل از ترکیب دوگانه این افزودنی‌ها با قیر شاهد نشان می‌دهد که نقطه نرمی و ویسکوزیته دورانی افزایش و درجه نفوذ کاهش می‌یابد که مؤید کاهش حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح‌شده است. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک DSR نیز نشان می‌دهد که کلیه قیرهای اصلاح‌شده دارای مدول برش دینامیک مختلط ($G^*$) بزرگ‌تر و زاویه فاز ($\delta$) کوچک‌تر و در نتیجه ضریب شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) بزرگ‌تری نسبت به قیر شاهد می‌باشند. ضمن آنکه ضریب خستگی ($G^*.\sin\delta$) ناشی از بارگذاری در دماهای میانی تمامی قیرهای اصلاح‌شده با ترکیبات دوگانه این افزودنی‌ها کوچک‌تر از حدود توصیه شده است. با توجه به یافته‌های این پژوهش، مناسب‌ترین ترکیب**

**دوگانه افزودنی‌های EVA و پودر لاستیک برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیک قیر پایه با درجه نفوذ ۶۰/۷۰، ترکیب دوگانه ۲۵٪ EVA و ۷۵٪ پودر لاستیک به میزان ۱۵٪ وزنی قیر پایه است.**

**واژه‌های کلیدی: اصلاح خواص رئولوژی قیر، پودر لاستیک، EVA، عملکرد قیر**

## ۱. مقدمه

شبکه راه‌ها بخش قابل توجهی از ثروت‌های ملی هر کشوری محسوب می‌شوند. راه‌ها نقش عمده‌ای در برقراری ارتباطات اقوام مختلف داشته و مهم‌ترین رکن توسعه اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی جوامع به‌حساب می‌آیند. روسازی، به‌عنوان محافظ جسم راه، یکی از عوامل اصلی تأمین‌کننده تردد راحت و ایمن استفاده‌کنندگان از راه است. از سوی دیگر، ساخت، نگهداری و ترمیم روسازی‌های آسفالتی عموماً اعتبارات مالی هنگفتی را به خود اختصاص می‌دهند. لذا، روسازی باید دوام و کیفیت بهره‌برداری مطلوبی را برای استفاده‌کنندگان از راه تأمین نماید. از این جهت، مواردی که منتهی به افزایش دوام، کیفیت و عمر روسازی آسفالتی و جلوگیری از خرابی‌های زودرس آن می‌گردد، همواره مورد توجه پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت راه‌سازی بوده است. از این حیث، قیر یکی از اصلی‌ترین اجزا در ساختار مخلوط‌های آسفالتی است و وظیفه چسباندن سنگ‌دانه‌ها را بر عهده دارد. از دیگر ویژگی‌های قیر، جلوگیری از نفوذ آب به بدنه و جسم راه است. تحقیقات نشان داده که قیر از نظر رفتاری یک ماده ویسکوالاستیک است، چرا که رفتاری متأثر از دما و زمان بارگذاری دارد (اندرسون و همکاران، ۱۹۹٤). تغییرات دما در فصول گرم و سرد سال بر رفتا قیر در دماهای زیاد و کم تأثیرگذار بوده به گونه‌ای که می‌تواند سبب بروز ترک‌خودرگی و خرابی‌های ماندگار در روسازی آسفالتی گردد (عامری و همکاران، ۲۰۱۹). آسیب‌پذیری دمایی قیر فقط به دماهای زیاد و کم محدود نیست، چرا که مخلوط آسفالتی در کوتاه مدت می‌تواند از دماهای مثبت به دماهای منفی و بالعکس نوسان داشته باشد و این نوسان باعث بروز ترک و خرابی در سطح روسازی آسفالتی می‌گردد (فرازمند و همکاران، ۲۰۲۰). در چنین شرایطی، رفتار مخلوط به مقاومت آن در برابر ترک‌های خستگی و کششی بستگی دارد که اهمیت اصلاح خصوصیات رئولوژیک قیر را دوچندان می‌کند (هوانگ، ۲۰۰٤). یکی از شیوه‌های رایج به‌منظور رسیدن به خواص مکانیکی بهتر، دوام بیشتر و اصلاح خواص رئولوژیک قیرهای پایه به‌منظور غلبه بر خرابی‌ها و به تأخیر انداختن آن‌ها استفاده از افزودنی‌های مختلف برای اصلاح خواص قیر یا مخلوط آسفالتی است. از میان این افزودنی‌ها می‌توان به پودر لاستیک تایرهای فرسوده اشاره کرد. در کشورهای مختلف جهان، سالانه میلیون‌ها حلقه تایر فرسوده خودروهای سواری و کامیون به‌عنوان زباله جمع‌آوری و انبار می‌گردد که هم از جنبه زیست‌محیطی و هم ازلحاظ کمبود فضای مورد نیاز برای انبار کردن آن‌ها باعث به وجود آمدن مشکلات عدیده‌ای شده است (شاکر، ۱۳۹۵).

استفاده از پودر لاستیک برای اصلاح خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی، ضمن داشتن مزایای ذکر شده، معایبی نیز دارد که این معایب بیشتر در دمای زیاد و در مناطق گرمسیری مشاهده می‌گردد و از همین رو پژوهشگران مختلفی روی افزودنی‌های دوگانه از جنس پودر لاستیک و ماده دومی که بتواند در دمای زیاد ویژگی‌های مثبتی به مخلوط اضافه کند، تحقیق کرده‌اند. از جمله این پژوهشگران، می‌توان به تحقیق نصر (۱۳۹۵)

اشاره کرد که افزودنی دوگانه‌ای از جنس پودر لاستیک و پلی‌اتیلن ترفتالات ارائه داده است.

در این پژوهش، از پودر لاستیک به‌عنوان ماده افزودنی اصلی در قیر پایه به‌منظور بررسی رفتار قیر اصلاح‌شده در برابر خرابی‌های رایج استفاده گردیده است. با توجه به اینکه این افزودنی به‌تنهایی برای ارتقای کیفیت مخلوط آسفالتی کافی نیست، پژوهشگران برای بهبود خصوصیات آسفالت، استفاده هم‌زمان از یک افزودنی ثانویه را نیز به همراه پودر لاستیک پیشنهاد نموده‌اند. در این پژوهش، از کوپلیمر اتیلن وینیل استات (EVA[1]) به‌عنوان افزودنی ثانویه با مزایای خاص آن استفاده شده است (فخری، ۱۳۸۵). EVA پلیمری از دسته پلاستومرها و اصلاح‌کننده‌ای سازگار با طیف گسترده‌ای از قیرها است. این پلیمر نه‌تنها از لحاظ دمایی پلیمری پایدار است، بلکه قابلیت خوبی در ترکیب و اختلاط با قیر دارد (استارک و جونیچ، ۲۰۱۱). ساختار این پلیمر متشکل از بلوک‌های پلی‌اتیلن (PE) و گروه‌های معلق وینیل استات می‌باشد. بخش اتیلن، غیرقطبی اما بلوری یا جامد است. در حالی که بخش VA (وینیل استات) قطبی اما غیربلوری (غیرجامد) است (آلاتاش و ییلماز، ۲۰۱۳). آسفالت‌های تولید شده با قیرهای حاوی افزودنی کوپلیمر وینیل استات دارای خاصیت الاستیسیته بسیار بیشتری نسبت به آسفالت‌های معمولی می‌باشند. قیرهای اصلاح‌شده با این پلیمر، در مقایسه با قیر پایه، باعث می‌شوند که آسفالت تولید شده با این قیرها دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل‌های دائمی بوده و در برابر ترک‌های خستگی مقاوم‌تر باشند (سائولا و همکاران، ۲۰۰۹).

## ۲. مطالعات پیشین

در اواخر دهه ۱۳۹۰ شمسی، قاسمی و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر پودر لاستیک بر عملکرد دمای زیاد قیر لاستیکی حاوی پلیمر SBS[2] و واکس پارافین را با استفاده از پودر لاستیک ضایعاتی در مقادیر صفر، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد و پلیمر SBS به میزان ٤٪ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای تسهیل فرایند اختلاط از واکس پارافین به میزان ۳٪ نسبت وزنی قیر نیز استفاده نمودند. آزمایش رئولوژی قیر با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک (DSR) در دمای زیاد، قبل و بعد از انجام آزمایش لعاب نازک چرخشی قیر (RTFO) شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت انجام گردید. نتایج این آزمایش حاکی از این بود که استفاده از پودر لاستیک در مقادیر ۱۲ و ۱۶ درصد در ترکیب‌های قیری مورد نظر باعث افزایش قابل توجه رده عملکردی دمای زیاد قیر پایه می‌شود که در این میان انتخاب نمونه ترکیب شده با ۱۲٪ پودر لاستیک به‌عنوان ترکیب بهینه از لحاظ دمای بالای عملکردی و اقتصادی پیشنهاد شده بود.

عربانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز عملکرد مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با پودر لاستیک به روش خشک را به همراه مواد نانو مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از پودر لاستیک خردشده (CR)، به‌ویژه در درصدهای زیاد، به روش فرایند اختلاط خشک نسبت به فرایند اختلاط تر، به دلیل اثرات نامطلوب این روش در چسبندگی قیر، از محبوبیت کمتری برخوردار است و به‌علاوه باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. در این مطالعه، برای بهبود چسبندگی قیر در فرایند ترکیب خشک از زایکوسل استفاده گردید. بدین منظور، مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با زایکوسل در سه نسبت ۱، ۲/۵ و ٤ درصد از وزن آن و CR در سه مقدار ۱، ۳ و ۵ درصد از وزن کل دانه‌ها ساخته شد. اثرات زایکوسل بر خواص چسبندگی به‌وسیله آزمایش‌های تنش، نقطه نرمی، درجه نفوذ، ویسکوزیته چرخشی و آزمایش برش رئومتر دینامیک بررسی گردید. نتایج نشان داد که اصلاح‌کننده زایکوسل باعث بهبود خواص رئولوژیک قیر می‌شود و

[1]- Ethylene-Vinyl Acetate

[2]- Styrene-Butadiene-Styrene

در نهایت موجب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی‌هایی همچون آسیب رطوبتی، شیارشدگی و ترک‌خوردگی می‌گردد.

قائم‌پور و توکلی (۲۰۱۳) نیز به بررسی خواص رئولوژیک قیر اصلاح‌شده با پلیمر EVA پرداختند. در این تحقیق، قیرهای اصلاح‌شده پلیمری از اختلاط قیر ۸۵/۱۰۰ با پلیمر EVA ساخته شدند. نمونه‌های قیر از اختلاط ۳، ٤، ٥ و ٦ درصد وزنی از پلیمر با قیر و به کمک مخلوط‌کننده مکانیکی با دور زیاد تهیه شدند. نتایج آزمایش‌های DSR نشان داد که قیر اصلاح‌شده با پلیمر EVA نسبت به قیر پایه دارای خواص رئولوژیک مناسب‌تری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن پلیمر EVA باعث افزایش مدول برش دینامیک مختلط (G*) و کاهش زاویه فاز (δ) قیر اصلاح‌شده در مقایسه با قیر شاهد می‌شود.

نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی آقاجانی و مقدس-نژاد (۱۳۹۰) در خصوص اصلاح مشخصات قیر پایه ٦۰/۷۰ با استفاده از افزودنی پودر لاستیک نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک در قیر، درجه نفوذ قیرهای اصلاح‌شده کاهش و نقطه نرمی و بازگشت‌پذیری الاستیک آن‌ها در مقایسه با قیر شاهد افزایش یافته است. بازگشت‌پذیری الاستیک قیر باعث کاهش تغییرشکل‌های ماندگار در ماده می‌شود. جذب روغن‌های سبک قیر توسط پودر لاستیک منجر به افزایش میزان آسفالتن قیر و در نهایت سفت‌تر شدن قیر می‌شود. ضمناً، پودر لاستیک به‌خودی‌خود سفت‌تر از قیر است و به این دلیل نقطه نرمی و بازگشت‌پذیری الاستیک قیر اصلاح‌شده افزایش و درجه نفوذ آن کاهش می‌یابد.

دارپرنیان و همکاران (۱۳۹٦) ضمن بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و زایکوترم، درصد مناسب زایکوترم در ترکیب با پودر لاستیک را تعیین کردند. این محققان برای تعیین درصد بهینه زایکوترم در آسفالت لاستیکی از آزمایش-های حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی و خزش دینامیک بهره گرفته و درصد بهینه‌ای برای آسفالت لاستیکی حاوی زایکوترم ارائه دادند

حدادی (۱۳۹۸) اثر درصد و اندازه ذرات پودر لاستیک در قیر را بررسی کرد. نتایج تحقیق او نشان داد که افزایش بیش از ۷ درصدی مقدار پودر لاستیک در قیر، گرانروی را افزایش می‌دهد. همچنین، اندازه بیش از ۰/۱ میلی‌متر برای استفاده در قیر مناسب نیست.

صولتی‌فر و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی پارامترهای مؤثر بر شیارشدگی قیر حاوی پودر لاستیک پرداختند. این تحقیق، چهار عامل دما، زمان، سرعت اختلاط و همچنین مقدار درصد پودر لاستیک در قیر را به عنوان پارامترهای مؤثر بر شیارشدگی قیر لاستیکی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مقدار پودر لاستیک از سایر پارامترها دارای اهمیت بسیار بیشتری است.

لیانگ و همکاران (۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های زیادی که روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر EVA و با درصدهای مختلف وینیل استات انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که استفاده از پلیمر EVA به نسبت ۱۸٪ وزنی وینیل استات و ۸۲٪ وزنی پلی‌اتیلن منجر به تولید مخلوطی می‌شود که می‌تواند خصوصیات آسفالت را هم در دمای عملکردی زیاد و هم در دمای عملکردی کم بهبود بخشد. آن‌ها دریافتند که بهبود خواص آسفالت اصلاح‌شده با این افزودنی‌ها به دلیل شبکه نسبتاً قوی‌ای است که بین مولکول‌های قیر و پلیمر در این درصدهای افزودنی به وجود می‌آید. آسفالت تولید شده با این درصدها مناسب‌ترین ویسکوزیته در هنگام پخش آسفالت، کمترین شیارشدگی در دماهای زیاد و بیشترین مقاومت کششی را در دماهای کم و در هنگام بهره‌برداری از روسازی دارد.

جبرئیل و فنگ (۲۰۱۷) تحقیقی در باره اثرات پلی‌اتیلن با چگالی زیاد و پودر لاستیک خردشده به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ها بر خواص مخلوط آسفالتی گرم انجام دادند. اثرات پلی‌اتیلن (HDPE) و پودر لاستیک (CRP)

بر خواص مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت. خواص فیزیکی، درجه نفوذ، نقطه نرمی و روانی قیر اصلاح‌شده برای نمونه‌های HDPE و CRP مختلف اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های مقاومت مارشال و روانی، نسبت مقاومت مارشال، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی نیز انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از HDPE و CRP به‌عنوان اصلاح‌کننده باعث بهبود خواص فیزیکی آسفالت شده و مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی و همچنین مقاومت آن در برابر آسیب‌های رطوبتی را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

پدهان و گوپتا (۲۰۱۸) تأثیر افزودنی پلیمری BHETA-PU و SBS را روی خواص قیر مورد مقایسه قرار دادند. جهت انجام این مقایسه، آزمایش‌های متداول قیر (شامل آزمایش‌های نفوذ، نقطه نرمی، عریان‌شدگی، پیرشدگی کوتاه‌مدت) و آزمایش‌های سوپرپیو (شامل ویسکوزیته دورانی، DSR، BBR) انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودنی BHETA-PU به مقدار قابل توجهی باعث کاهش پدیده عریان‌شدگی و بهبود سایر خواص فیزیکی- شیمیایی قیر شده است. همچنین، نتایج آزمایش DSR در حالت پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت نشان داد که مقدار $G^*/Sin(\delta)$ برای قیرهای اصلاح‌شده با BHETA-PU از قیر اصلاح نشده یا حتی قیر اصلاح‌شده با SBS بیشتر است. همچنین، نتایج روبش دورانی[۱] نشان داد که قیر اصلاح‌شده با BHETA-PU مقاومت شیارشدگی و خاصیت الاستیک مناسب‌تری نسبت به قیر اصلاح نشده دارد. علاوه بر این، آزمایش BBR برای تعیین سختی خزشی[۲] در دماهای کم نشان داد که سختی خزشی قیر اصلاح‌شده کاهش یافته و مقدار m-value افزایش یافته است. بر اساس نتایج آزمایش BBR، تمامی قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر، مقادیر کم سختی در دمای ۱۲- را موجب می‌شوند.

پایداری حرارتی و خواص رئولوژیک قیر اصلاح‌شده با PET و خرده لاستیک، با استفاده از میکروسکوپ اُپتیکال، توسط حبیبی کرهرودی و همکاران (۲۰۱۷) مورد مطالعه قرار گرفت. خواص مورفولوژیک قیر نشان داد که مقدار زیاد خرده لاستیک در قیر اصلاح‌شده با این ماده و PET باعث بهبود پایداری قیر می‌گردد. آزمایش‌های TGA و DSR روی قیرهای اصلاح‌شده نشان داد که قیر اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه دارای ویسکوزیته، پایداری و مقاومت بیشتر در برابر تغییرشکل در دماهای زیاد است. در نهایت، این محققین استفاده از قیر اصلاح‌شده را به‌صرفه‌تر و همسو با ملاحظات زیست‌محیطی دانستند. همچنین، نتایج آزمایش DSR روی نمونه‌های اصلاح‌شده با این افزودنی‌ها نشان داده که استفاده از ۷٪ وزنی قیر (شامل ۷۵٪ PET و ۲۵٪ خرده لاستیک) مناسب‌ترین درصد این افزودنی‌ها به‌منظور افزایش الاستیسیته قیر است.

## ۳. شرح آزمایش

در این پژوهش، از قیر پایه با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد تهران استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده روی این قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده عبارتند از: درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی (RV) و رئومتر برش دینامیک (DSR). آزمایش درجه نفوذ به‌منظور تعیین رده قیر و آزمایش نقطه نرمی به‌منظور بررسی و مقایسه حساسیت حرارتی قیر انجام شده است. از نتایج حاصل از این دو آزمایش می‌توان درجه سختی و حساسیت حرارتی قیر را نسبت به تغییرات دما و مدت‌زمان بارگذاری مورد بررسی قرار داد (آیین‌نامه ASTM، ۲۰۰۶). در این پژوهش، برای ارزیابی میزان کندروانی قیر در دمای اختلاط ۱۶۵ °C و دمای تراکم ۱۳۵ °C از روش آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV) استفاده شده است. همچنین، برای سنجش

[۱]- Frequency sweep

[۲]- Creep stiffness

و مقایسه خصوصیات قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی پودر لاستیک، خصوصیات قیر شاهد ۶۰/۷۰ با درجه عملکردی PG52-28 نیز مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

در نهایت، به‌منظور ارتقای کیفیت قیر و ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده، از پودر لاستیک به همراه یک افزودنی ثانویه موسوم به EVA استفاده شده است. ساختار این پلیمر متشکل از بلوک‌های پلی‌اتیلن (PE) و گروه های معلق وینیل استات است. بخش اتیلن غیرقطبی، اما بلوری یا جامد است. در حالی که بخش VA (وینیل استات) قطبی، اما غیربلوری (غیرجامد) است. به‌طور کلی، قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر EVA نسبت به قیرهای پایه دارای درجه نفوذ کمتر و نقطه نرمی بیشتر ( قیر سفت‌تر) هستند. پودر لاستیک مورد استفاده بر پایه تیوب بوده و خصوصیات EVA در جدول ۲ بیان شده است.

**جدول ۱ . مشخصات فنی قیر مصرفی**

| خصوصیات | روش آزمایش | حدود استاندارد | | قیر ۷۰-۶۰ |
|---|---|---|---|---|
| | | حد پایین | حد بالا | |
| وزن مخصوص در ۲۵ °C | ASTM D70 | ۱/۰۱ | ۱/۰۶ | ۱/۰۴۸ |
| درجه نفوذ در ۲۵ °C | ASTM D5 | ۶۰ | ۷۰ | ۶۸ |
| نقطه نرمی (°C) | ASTM D36 | ۴۵ | ۵۴ | ۴۸ |
| انگمی در ۲۵ °C | ASTM D113 | ۱۰۰ | -- | ۱۰۰ |
| نقطه اشتعال (°C) | ASTM D92 | ۲۵۰ | -- | ۳۱۵ |
| ویسکوزیته کینماتیک در ۱۲۰ °C (سانتی استوک) | ASTM D217 | | | ۸۱۵ |
| ویسکوزیته کینماتیک در ۱۳۵ °C (سانتی استوک) | ASTM D217 | | | ۴۲۵ |
| ویسکوزیته کینماتیک در ۱۵۰ °C (سانتی استوک) | ASTM D2170 | | | ۲۳۵ |

**جدول ۲ . مشخصات EVA**

| مشخصات ظاهری | گرانول شفاف |
|---|---|
| **چگالی ($g/cm^3$)** | ۰/۹۳۹ |
| **تنش کششی ($kg/cm^2$)** | ۱۴۰ |
| **کرنش کششی (٪)** | ۶۷۰ |
| **نقطه ذوب (°C)** | ۸۴ |
| **مدول الاستیک (MPa)** | ۱۸۰ |

در جدول ۳، درصدهای ترکیب دوگانه این دو ماده برحسب درصد وزنی قیر پایه و نحوه کدگذاری آن‌ها ارائه شده است. مقدار اصلاح‌کننده در قیر (اعداد ۱۰یا ۱۵) نشان‌دهنده میزان افزودنی (مجموع پودر لاستیک و EVA) استفاده شده در قیر پایه است. CR نشانگر درصد پودر لاستیک و P درصد پلیمر EVA در هر یک از قیرهای اصلاح‌شده می‌باشند. پلیمر EVA با ۱۸٪ وینیل استات (طبق توصیه شرکت تولیدکننده این ماده) و پودر

لاستیک تهیه شده از لاستیک ضایعاتی عبوری از الک ۵۰ به‌عنوان افزودنی‌های لازم تهیه شده‌اند.

**جدول ۳. نام‌گذاری نمونه‌های آزمایش‌شده بر اساس میزان ترکیب قیر و افزودنی‌ها**

| نام مخلوط | مقدار اصلاح‌کننده در قیر | درصد پودر لاستیک در اصلاح‌کننده | درصد EVA در اصلاح‌کننده |
|---|---|---|---|
| 10CR100P0 | ۱۰ | ۱۰۰ | ۰ |
| 15CR100P0 | ۱۵ | ۱۰۰ | ۰ |
| 10CR75P25 | ۱۰ | ۷۵ | ۲۵ |
| 15CR75P25 | ۱۵ | ۷۵ | ۲۵ |
| 10CR50P50 | ۱۰ | ۵۰ | ۵۰ |
| 15CR50P50 | ۱۵ | ۵۰ | ۵۰ |
| 10CR25P75 | ۱۰ | ۲۵ | ۷۵ |
| 15CR25P75 | ۱۵ | ۲۵ | ۷۵ |
| 10CR0P100 | ۱۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| 15CR0P100 | ۱۵ | ۰ | ۱۰۰ |

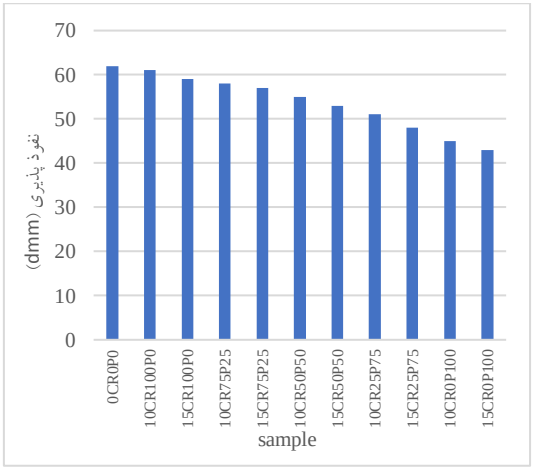
با توجه به محدودیت‌های پژوهش و ضرورت یافتن درصدی از ترکیب دو ماده که بتواند حالت بهینه ترکیب را مشخص کند، از درصد ترکیب دو ماده به‌صورت (صفر و ۱۰۰)، (۲۵ و ۷۵)، (۵۰ و ۵۰)، (۷۵ و ۲۵) و (۱۰۰ و صفر) برای ترکیب دو ماده استفاده شده است.

در این پژوهش، به علت استفاده از دو نوع افزودنی و برای رسیدن به خاصیت ویسکوالاستیک لازم، از روش تر برای اختلاط پودر لاستیک استفاده گردید. برای این منظور، ابتدا افزودنی دوگانه با ترکیبات در نظر گرفته شده با هم مخلوط شده و سپس ماده به‌دست آمده با قیر ترکیب می‌گردد. با توجه به تجربیات قبلی، برای اختلاط افزودنی با قیر پایه از مخلوط‌کن سریع (۵۰۰۰ دور در دقیقه) استفاده شده است. دما و زمان اختلاط با توجه به ضرورت اختلاط کامل، در نظر گرفتن دمای ذوب افزودنی‌ها، بهره‌گیری از راهنمای دستگاه و در نهایت تجربه محققان پژوهش و سایر محققان، به ترتیب برابر با ۱۷۰ °C و ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شده است (ابراهیم‌زاده، ۱۳۹۸؛ افلاکی، ۱۳۸۷؛ افلاکی و طباطبایی، ۲۰۰۹).

## ٤. بحث و تحلیل نتایج

### ٤-١. آزمایش درجه نفوذ

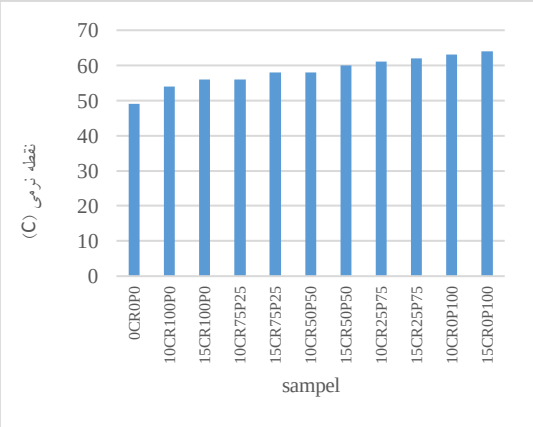
در شکل ۱، نتایج آزمایش درجه نفوذ روی نمونه قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های پودر لاستیک و EVA ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، افزودنی‌ها باعث کاهش درجه نفوذ قیرهای اصلاح‌شده می‌شوند. به‌طوری که این کاهش در درجه نفوذ برای نمونه حاوی 15CR0P100، که بیشترین مقدار کاهش را نسبت به نمونه قیر پایه دارد، در حدود ۳۰٪ است. همچنین، لازم به ذکر است که با افزایش درصد افزودنی (ترکیب دوگانه پودر لاستیک و پلیمر EVA) از ۱۰٪ به ۱۵٪، درجه نفوذ قیر کاهش بیشتری پیدا می‌کند.




**شکل ۱. آزمایش درجه نفوذ نمونه‌های اصلاح‌شده و قیر پایه**

### ٤-۲. آزمایش نقطه نرمی

در شکل ۲، نتایج آزمایش نقطه نرمی ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تمامی افزودنی‌ها باعث افزایش نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با نقطه نرمی قیر پایه شده‌اند و این افزایش برای قیر حاوی افزودنی با درصد بیشتر EVA در ترکیب افزودنی، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. به‌طوری که برای نمونه 15CR0P100 این افزایش در حدود ۳۰٪ است.



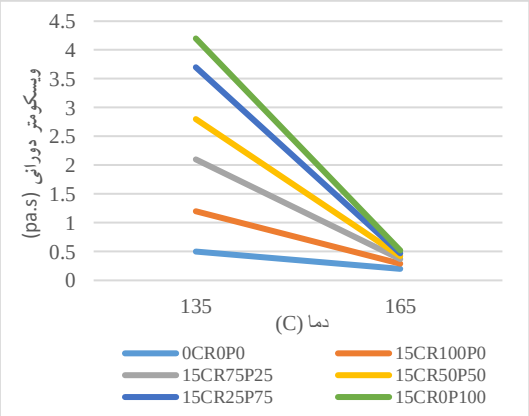

**شکل ۲. نتایج آزمایش نقطه نرمی نمونه‌های اصلاح‌شده قیر**

افزایش ویسکوزیته قیر نیاز به دمای بیشتری برای روان‌تر شدن قیر اصلاح‌شده دارد. بنابراین، استنباط می‌شود که افزایش نقطه نرمی باعث افزایش ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده نیز شده باشد. لازم به ذکر است که با افزایش میزان افزودنی (افزایش مقدار افزودنی از ۱۰٪ به ۱۵٪) نقطه نرمی نیز افزایش بیشتری پیدا می‌کند.

### ٤-۳. آزمایش ویسکومتر دورانی

ویسکوزیته پارامتری است که میزان مقاومت یک ماده سیال را در برابر جاری شدن اندازه‌گیری و توصیف می‌کند. ویسکوزیته قیرها تابع دما، سرعت بارگذاری و ترکیبات آن‌ها است. در آزمایش ویسکومتر دورانی، نسبت تنش برشی به کرنش برشی قیر را ویسکوزیته آن قیر می‌نامند که مقاومت آن قیر را در برابر تغییرشکل و روانی نشان می‌دهد. شکل ۳، تغییرات ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده با EVA و پودر لاستیک را در دماهای ۱۳۵ و ۱٦٥ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزودن اصلاح‌کننده به قیر پایه باعث افزایش ویسکوزیته آن می‌شود. به عبارتی، تمامی قیرهای اصلاح‌شده دارای ویسکوزیته بیشتری نسبت به قیر پایه در دماهای آزمایش ۱۳۵ °C و ۱٦٥ °C می‌باشند. ضمن آنکه EVA سهم بیشتری نسبت به پودر لاستیک در افزایش ویسکوزیته قیر پایه دارد. به‌عبارت دیگر، قیرهای اصلاح‌شده با درصد بیشتر EVA کُندروانی بیشتری دارند. در توجیه روند مشاهده شده می‌توان چنین استدلال کرد که با توجه به اینکه ساخت قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر نیاز به دمای بیشتر و زمان اختلاط طولانی‌تری دارند، لذا، پیرشدگی کوتاه‌مدت شدیدتری در آن‌ها رخ می‌دهد که می‌توان آن را به‌عنوان یکی از عوامل افزایش ویسکوزیته قیر در نظر گرفت. از عوامل دیگر این افزایش ویسکوزیته می‌توان به جذب مواد روغنی موجود در قیر توسط پودر لاستیک و ایجاد ساختار شبکه‌ای EVA در ترکیب قیر- پلیمر اشاره کرد که باعث به وجود آمدن موادی با وزن مولکولی بیشتر در قیر پلیمری نسبت به قیر پایه شده که ویسکوزیته قیر پلیمری را افزایش می‌دهد. نکته قابل توجه آخر در خصوص نتایج ارائه شده در شکل ۳ را می‌توان در

مخلوط اصلاح‌شده با ۵۰٪ پودر لاستیک و ۵۰٪ EVA مشاهده کرد که بیشترین ویسکوزیته را در محدوده مجاز آیین‌نامه به خود اختصاص داده است. برای این نتیجه می‌توان چنین بیان کرد که درصد بیشتر EVA باعث افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده به مقدار بیشتر از ۳ Pa.s شده است و این افزایش مغایر توصیه پژوهشگران تحقیقات راهبردی راه‌های آمریکا (SHRP) است.

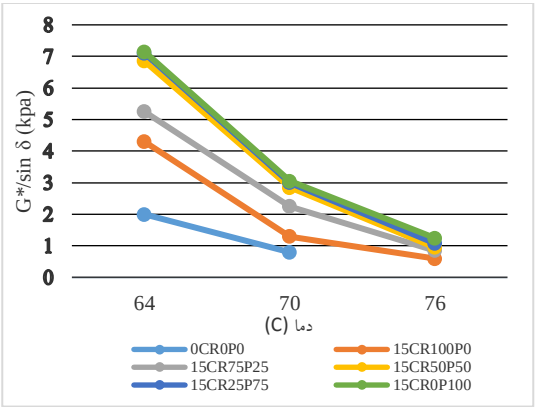



**شکل ۳. ویسکوزیته دورانی قیرهای اصلاح‌شده**

### ٤-٤. آزمایش رئومتر برش دینامیک

شکل ٤، نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک (DSR) در قیرهای اصلاح‌شده با درصدهای مختلف پودر لاستیک و EVA را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ٤، ضریب شیارشدگی G*/sin δ در قیرهای حاوی افزودنی EVA و پودر لاستیک در مقایسه با قیر پایه بزرگ‌تر است. در این نمونه‌ها، با افزایش میزان افزودنی EVA، در ترکیب دوگانه پودر لاستیک با EVA مشاهده می‌شود که کمیت ضریب شیارشدگی G*/sin δ نیز بزرگ‌تر می‌شود. با توجه به اینکه در شرایط محیطی با دمای زیاد، قیر با کاهش ویسکوزیته مواجه می‌شود، اثر افزودنی در افزایش ویسکوزیته قیر نیز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. لذا، کاهش زاویه اختلاف فاز (δ) نشان‌دهنده افزایش الاستیسیته قیر و افزایش مدول مختلط برشی (G*) نشان از مقاومت بیشتر قیر در برابر تغییرشکل‌های برشی است.

وجود این دو عامل، شرایط بهتری را برای استفاده از قیر اصلاح‌شده در دماهای زیاد ایجاد می‌کند و باعث افزایش دمای عملکرد بهتر قیر اصلاح‌شده می‌شود.

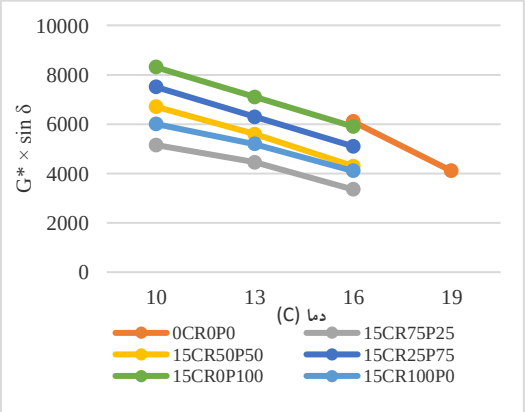



**شکل ٤. نتایج آزمایش DSR**

شکل ٥، نتایج آزمایش خستگی را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به آزمایش خستگی بر اساس پارامتر G*×sinδ بیان می‌گردد. آیین‌نامه AASHTO T315 برای مقدار مجاز پارامتر G*×sinδ عدد ٥٠٠٠ را بیان کرده است. از طرفی، آیین‌نامه AASHTO M332 برای این پارامتر با استناد به آیین‌نامه AASHTO T315 عددی بین ٥٠٠٠ و ٦٠٠٠ کیلوپاسکال را بر اساس میزان ترافیک تعیین کرده است.

در این تحقیق، همانگونه که در بخش قبل بیان گردید، از قیر با درجه عملکردی PG52-28 استفاده شده است. بر طبق این درجه عملکردی قیر، سطح ترافیک در نظر گرفته شده در این پژوهش (سطح ترافیک سنگین، H) و مفاد مندرج در آیین‌نامه AASHTO M332، مقدار دمای میانی برای بررسی خستگی ١٦ درجه سلسیوس و کمیت مجاز پارامتر G*×sinδ به ٦٠٠٠ کیلوپاسکال محدود شده است. با در نظر گرفتن این ضوابط (محدود شدن کمیت پارامتر G*×sinδ برای قیر خالص در دمای عملکردی میانی به ٦٠٠٠ کیلوپاسکال (طبق توصیه آیین-نامه AASHTO T315 ))، بنابراین، چون شاخص خستگی G*×sinδ قیر پایه در دمای عملکردی میانی (١٦ درجه سلسیوس) بر اساس یافته‌های مندرج در شکل ٥

بیشتر از ۶۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد، انجام آزمایش خستگی در دماهای کمتر از ۱۶ درجه سلسیوس برای قیر خالص ضرورت ندارد. به همین دلیل، دمای عملکردی بعدی، یعنی ۱۹ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، کمیت شاخص خستگی ($G^*\times\sin\delta$) در دمای میانی تحقیق (دمای ۱۶ درجه سلسیوس) برای نمونه‌های قیر اصلاح شده در مقایسه با همین شاخص برای نمونه قیر شاهد کاهش داشته و تمامی نمونه‌ها در این دما دارای پارامتر $G^*\times\sin\delta$ کمتر از ۶۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشند. به همین دلیل، دمای کمتر یعنی دمای ۱۳ درجه سلسیوس نیز برای این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه در تنظیمات دستگاه DSR از یک الگوی ثابت برای آزمایش نمونه‌های قیر اصلاح‌شده استفاده شده است و برخی از نمونه‌های اصلاح‌شده در دمای ۱۳ درجه سلسیوس نیز دارای پارامتر $G^*\times\sin\delta$ کمتر از ۶۰۰۰ کیلوپاسکال هستند. آزمایش تعیین پارامتر خستگی برای مقایسه عملکرد تمامی نمونه‌های اصلاح شده در دمای ۱۰ درجه نیز انجام شده است.




**شکل ۵. نتایج آزمایش DSR- خستگی**

در این تحقیق، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پارامتر $G^*\times\sin\delta$ قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه کاهش‌یافته است. از طرفی، برای نمونه‌های اصلاح‌شده ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد EVA در افزودنی دوگانه تا ۲۵٪، مقاومت قیر در برابر ترک‌های خستگی بهبود می‌یابد. اما با افزایش بیشتر سهم EVA در افزودنی دوگانه، نتیجه عکس می‌گردد. در واقع، در بین افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق، بهترین ترکیب را نمونه حاوی ۱۵٪ قیر اصلاح شده با افزودنی دوگانه‌ای با ۲۵٪ EVA و ۷۵٪ پودر لاستیک کسب کرده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر دوگانه پودر لاستیک و EVA بر خصوصیات فیزیکی و رئولوژیک قیر پایه اصلاح‌شده با ترکیب دوگانه از این پلیمرها و یافتن مناسب‌ترین درصد ترکیب دو ماده در قالب یک افزودنی واحد بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با قیر پایه به شرح زیر به‌دست‌آمده است:

- کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده و در نتیجه حصول قیر سفت‌تر نسبت به قیر پایه و حساسیت حرارتی کمتر که قیر اصلاح‌شده را مناسب برای استفاده در مناطق با دمای بیشتر می‌کند.
- ترکیب دوگانه پودر لاستیک و EVA با قیر پایه باعث افزایش نقطه نرمی و افزایش کُندروانی قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با قیر پایه می‌شود و سیر صعودی افزایش کُندروانی قیرهای اصلاح‌شده با افزایش میزان EVA افزایش می‌یابد. لیکن ترکیب دوگانه پودر لاستیک و EVA به نسبت ۷۵٪ پودر لاستیک و ۲۵٪ EVA مناسب‌ترین درصد برای بهبود خصوصیات فیزیکی قیر پایه است.
- ترکیب دوگانه پودر لاستیک با EVA با قیر پایه باعث بهبود ضریب شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با قیر پایه است.
- اصلاح قیر پایه با ترکیب دوگانه پودر لاستیک و EVA باعث افزایش یک رده عملکردی قیر پایه شده

و همچنین باعث افزایش مدول برشی مختلط (G*) و کاهش زاویه فاز (δ) قیر اصلاح‌شده می‌شود. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک با در نظر گرفتن همزمان نتایج پارامترهای G*/sin δ و G*×sinδ برای قیرهای اصلاح‌شده حاکی از آن است که ترکیب دوگانه و بهینه پودر لاستیک و کوپلیمر EVA با قیر اصلاح‌شده (۲۵٪ EVA و ۷۵ درصد پودر لاستیک) نسبت به وزن قیر پایه است. چرا که در این ترکیب، قیر اصلاح شده مقاومت بهتری در برابر ترک‌های خستگی داشته و از طرفی در آزمایش شیارشدگی نیز نتایج معقول‌تری را کسب کرده است.

## ٦. مراجع


آقاجانی, پ. و مقدس نژاد، ف. ۱۳۹۰. "اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

ابراهیم‌زاده, م. ۱۳۹۸. "ارزیابی روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی داغ، حاوی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

افلاکی, س. ۱۳۸۷. "بررسی انطباق‌پذیری قیرهای ایران با روش دسته‌بندی بر اساس عملکرد (PG) و تولید قیرهای راه‌سازی مورد نیاز". رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

حدادی, و. ۱۳۹۸. "اثر غلظت و اندازه پودر لاستیک بر خواص رئولوژیک و انعطاف‌پذیری قیر". علوم و تکنولوژی پلیمر، ۳۲(٦): ٤٧٥-٤٨٣.

دارپرنیان, پ.، عبدی کردانی، ع. و گلچین، ب. ۱۳۹٦. "ارزیابی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم حاوی افزودنی ضد عریان‌شدگی با بکارگیری قیر لاستیکی". پژوهشنامه حمل و نقل، ١٤(٣): ١٨٣-١٦٩.

شاکر، ح. ۱۳۹۵. "بررسی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و پلی‌اتیلن ترفتالات". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

صولتی‌فر, ن.، آزاده دل، ر.، خلیلی، م. و رهبرنیا، م. ۱۳۹۸. "بهینه‌سازی پارامتر شیارشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)". پژوهشنامه حمل و نقل، ١٦(١): ٢٤٥-٢٥٨ .

فخری، م. ۱۳۸۵. "کاربرد پلیمر در بهبود خواص قیرها و مخلوط‌های آسفالتی". پژوهشکده حمل‌ونقل، تهران.

قاسمی, م.، شعبانی، ش. و حیاتی، پ. ۱۳۹۸. "تأثیر پلیمر SBS بر عملکرد دمای بالای قیر لاستیکی حاوی پلیمر SBS و واکس پارافین". ششمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

نصر، د. ۱۳۹۵. "بررسی اثرات پلیمر ترموپلاستیک- الاستومری بر رفتار شیارشدگی و خستگی قیر". رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

ASTM D5. 2006. “Standard test method for penetration of bituminous materials”. ASTM International, West Conshohocken. USA.

Aflaki, S. and Tabatabaee, N. 2009. “Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran”. Constr. Build. Mater., 23(6): 2141-2150.

Alataş, T. and Yilmaz, M. 2013. “Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures”. Constr. Build. Mater., 42: 161-167.

Ameri, M., Nemati, M., Shaker, H. and Jafari, F. 2019. “Experimental and numerical investigation of the properties of the hot mix asphalt concrete with basalt and glass fiber”. Frattura ed Integrità Strutturale, 50:

149-162.
Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E. and Button, J. 1994. "Binder characterization and evaluation". Volume 3: Physical characterization, Report No. SHRP-A-369, Strategic Highway Research Program, National Research Council.
Arabani, M., Tahami, S. A. and Hamedi, G. H. 2018. "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial". Road Mater. Pavement Design, 19(5): 1241-1258.
Farazmand, P., Hayati, P., Shaker, H. and Rezaei, S. 2020. "Relationship between microscopic analysis and quantitative and qualitative indicators of moisture susceptibility evaluation of warm-mix asphalt mixtures containing modifiers". Frattura ed Integrità Strutturale, 51: 215-224.
Ghaempoor, A. and Tavakoli, A. 2013. "Study of rheological properties of EVA polymer modified bitumen". First National Conference on New Technologies in Chemistry and Chemical Engineering, Tehran, Vista Scientific and Research Cooperative. (In Persian)
Gibreil, H. A. and Feng, C. P. 2017. "Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt". Constr. Build. Mater., 142: 101-108.
Habibi Karahrodi, M., Moini Jazani, O., Paran, S. M. R., Formela, K. and Saeb, M. R. 2017. "Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends". Constr. Build. Mater., 134: 157-166.
Huang, Y. H. 2004. "Pavement analysis and design". 2nd Edition, Pearson Publisher.
Liang, M., Ren, S., Fan, W., Xin, X., Shi, J. and Luo, H. 2017. "Rheological property and stability of polymer modified asphalt: Effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers". Constr. Build. Mater., 137: 367-380.
Padhan, R. K. and Gupta, A. A. 2018. "Preparation and evaluation of waste PET derived polyurethane polymer modified bitumen through in situ polymerization reaction". Constr. Build. Mater., 158: 337-345.
Saoula, S., Mokhtar, K. A., Haddadi, S. and Ghorbel, E. 2009. "Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste". Phys. Proced., 2(3): 1319-1326.
Stark, W. and Jaunich, M. 2011. "Investigation of ethylene/vinyl acetate copolymer (EVA) by thermal analysis DSC and DMA". Polym. Testing, 30(2): 236-242.