

بررسی رفتار خستگی و خصوصیات شیارشدگی قیرهای حاوی افزودنی نیمه گرم

حسن زیاری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر،
مازندران، ایران.

پیمان میرزابابایی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

Email: Rezvan_Babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۹ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۱

چکیده

به منظور کاهش مصرف سوخت و کاهش تولید گاز دی‌اکسید کربن در مرحله تولید و پخش آسفالت، فن‌آوری آسفالت نیمه گرم در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، سه افزودنی نیمه گرم (ساسویت، رئوفالت و زایکوترم) به منظور اصلاح خصوصیات رئولوژیک قیر خالص ۷۰-۶۰ مورد استفاده قرار گرفتند. رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها با انجام آزمایش‌های LAS^1 و $MSCR^2$ ارزیابی شدند. آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری ($MSCR$) به منظور به دست آوردن درصد بازگشت (R)^۳، مدول غیرقابل بازگشت (Jnr)^۴ و درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت ($Jnr-diff$)^۵ قیرهای اصلاح شده مختلف انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با ۳٪ ساسویت دارای مقادیر درصد بازگشت کرنش بیشتر و همچنین مدول غیرقابل بازگشت بیشتری می‌باشد، که در نتیجه، مقاومت آن در برابر شیارشدگی نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. نتایج آزمایش LAS نشان می‌دهد که برای سطوح کرنش کم، عمر خستگی آسفالت‌های اصلاح شده با ۱٪ ساسویت دارای بیشترین مقدار می‌باشد. در حالی که در سطوح کرنش بالاتر، قیرهای اصلاح شده با ۲٪ رئوفالت دارای عمر خستگی بهتری نسبت به دیگر قیرهای اصلاح شده می‌باشند. در قیر اصلاح شده با زایکوترم، مقدار پارامتر Jnr نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، دامنه کرنش خطی، تنش خزشی دوگانه و باربرداری، مخلوط آسفالتی نیمه گرم، شیارشدگی

^۱- Linear Amplitude Sweep

^۲- Multiple stress creep and recovery

^۳- Recoveries

^۴- Non-Recoverable compliances

^۵- Differences in non-recoverable compliances

۱. مقدمه

به منظور کاهش دمای تولید و در نتیجه، مصرف انرژی در تولید

بسیار پیچیده و بعضی اوقات غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد (ونگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ یو و بوتلار، ۲۰۰۴؛ شیائو و همکاران، ۲۰۰۹a,b).

مشخصه رده عملکردی جاری به منظور ارزیابی رفتار خستگی قیر براساس خصوصیات ویسکوالاستیک خطی مواد می‌باشد ($|G^*| \cdot \sin \delta$). این یافته فاقد توانایی شناسایی دقیق مقاومت خرابی می‌باشد. مطالعات مختلفی به منظور معرفی یک آزمایش جایگزین انجام گرفته است. در میان آنها، آزمایش زمان متغیر (TS)^۱، آزمایش انرژی عملکرد قیر (BYET)^۲ و آزمایش کرنش متغیر خطی (LAS) معرفی شدند (جانسون، ۲۰۱۰). آزمایش LAS نسبت به بقیه آزمایش‌ها موفق‌تر بوده و بهتر می‌تواند مقاومت خستگی قیرها را اندازه‌گیری نماید.

یکی از رایج‌ترین خرابی‌ها که در روسازی اتفاق می‌افتد، شیارشدگی می‌باشد. تحکیم مواد و حرکت جانبی به علت بارگذاری مکرر چرخ‌های سنگین وسیله نقلیه روی روسازی سبب این خرابی می‌شود. شیار ایجاد شده در طول مسیر چرخ روی مسیر جاده آشکار می‌شود.

از پارامترهای مشخصاتی سوپرپیو، $|G^*/\sin \delta|$ به عنوان پارامتری برای رده‌بندی عملکردی دمای زیاد قیر برای رده‌بندی مقاومت در برابر شیارشدگی آنها استفاده می‌شود. با وجود اینکه سال‌های زیادی به عنوان پارامتر شیارشدگی مورد استفاده قرار می‌گرفت، نشان داده شد که بین پارامتر $|G^*/\sin \delta|$ و شیارشدگی مخلوط آسفالتی رابطه ضعیفی وجود دارد.

در مطالعات بعدی، دی آنجلو و همکاران (۲۰۰۷) روش MSCR را جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی معرفی نمودند. آنها با

مخلوط آسفالت، یک مفهوم جدید در سال‌های گذشته توسعه و آزمایش شده و به اجرا درآمده است. این فن‌آوری آسفالت نیمه‌گرم است که با کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی، خصوصیات مکانیکی و رئولوژیک مخلوط آسفالت نیمه‌گرم را نزدیک به مخلوط آسفالتی گرم حفظ می‌کند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۲؛ سیلوا و همکاران، ۲۰۱۰a).

علاوه بر این، استفاده از این فن‌آوری منجر به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و گازهای سمی دیگر از کارخانه‌های آسفالت می‌شود و سبب بهبود کارایی کارگران نیز می‌گردد (هورلی و پروول، ۲۰۰۵). با توجه به انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطالعات، کاهش میزان ۳۰-۴۰ درصد در تولید گاز گلخانه‌ای CO_2 ، ۳۵٪ در گاز SO_2 ، ۵۰٪ در تولید گازهای آلی فرار، ۱۰-۳۰ درصد در تولید گاز CO ، ۱۰-۳۰ درصد در تولید گازهای NO_x و ۲۰-۲۵ درصد در تولید گاز گلخانه‌ای از گرد و غبار را نشان می‌دهند (پروول، ۲۰۰۷). از دیگر مزایای این فن‌آوری، امکان گسترش فصول ساخت و زمان در دسترس برای تراکم مخلوط می‌باشد (سیلوا، ۲۰۱۰b).

ترک خستگی، یک ترک ناشی از بار است که در اثر تکرار بار ترافیکی ایجاد می‌شود. این نوع ترک یکی از مهم‌ترین نوع خرابی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد. عمر خستگی مخلوط آسفالتی به طور مستقیم به بسیاری از خصوصیات مهندسی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. ریزساختار پیچیده مخلوط آسفالتی به دانه‌بندی مصالح سنگی، خصوصیات برهمکنشی قیر- مصالح سنگی، توزیع فضای خالی و ارتباط بین فضاهای خالی بستگی دارد. در نتیجه، خستگی مخلوط‌های آسفالتی

^۱- Time Sweep

^۲- Binder Yield Energy Test

- ارزیابی حساسیت قیرهای اصلاح شده با افزودنی نیمه گرم در برابر تغییر شکل دائمی (شیارشدهگی) در دمای زیاد (۶۴ درجه سلسیوس) به کمک جدیدترین آزمایش‌های آشتو و سوپر پیو
- ارزیابی توانایی قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه گرم برای مقاومت در برابر خرابی خستگی در دمای میانی (۲۵ درجه سلسیوس) به کمک جدیدترین آزمایش‌های آشتو و سوپر پیو.

استفاده از نتایج آزمایش ALF^۱ نشان دادند که پارامتر پیشنهاد شده، Jnr، نسبت به پارامتر $G^*/\sin \delta$ جهت مشخص نمودن مقاومت قیر به تغییر شکل دائمی بسیار مناسب‌تر است. با استفاده از آزمایش ویل تراک هامبورگ نشان داده شد که پارامتر Jnr در سطوح تنش بالا جهت شناسایی قیرها در برابر حساسیت در برابر شیارشدهگی مؤثر می‌باشد.

۲. اهمیت موضوع و اهداف تحقیق

دمای مورد نیاز جهت تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم حدود ۱۷۰-۱۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. با معرفی آسفالت نیمه گرم، انتظار می‌رود که دمای تولید کاهش یابد. در حالی که کیفیت مشابهی از مخلوط را تولید می‌کند. مخلوط آسفالتی نیمه گرم یک فن‌آوری جدید می‌باشد و تأثیر افزودنی‌های نیمه گرم مورد مطالعه در این تحقیق که رایج‌ترین افزودنی‌های تولید آسفالت نیمه گرم می‌باشند، بر خصوصیات رئولوژیک تا به حال براساس استانداردهای جدید شارپ مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است. در این پژوهش، سعی شد اثر افزودنی‌های نیمه گرم (ساسویت، رئوفالت و زایکوترم) بر برخی خواص رئولوژی قیر براساس استانداردهای جدید تعیین رئولوژی قیر بررسی شود. به طور کلی، اهداف اصلی این تحقیق را می‌توان اینگونه خلاصه نمود:

- بررسی مقدماتی اثر مواد افزودنی نیمه گرم با استفاده از آزمایش‌های سنتی و کلاسیک قیر جهت بررسی ارتباط آنها با آزمایش‌های جدید سوپر پیو

۳. روش تحقیق

این تحقیق، خصوصیات رئولوژیک قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه گرم را مورد بررسی قرار می‌دهد. سه نوع افزودنی نیمه گرم (ساسویت، رئوفالت و زایکوترم) برای اصلاح قیر خالص مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات شیارشدهگی و خستگی قیرها با استفاده از آزمایش‌های LAS و MSCR مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۳-۱. قیر

قیر به کار گرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آمده است. افزودنی‌های به کار رفته نیز ساسویت، رئوفالت و زایکوترم هستند که مشخصات آنها براساس اطلاعات شرکت سازنده در جدول ۲ آمده است. نمایی از این افزودنی‌ها در شکل ۱ آورده شده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱. افزودنی‌های نیمه گرم: الف) رئوفالت، ب) ساسویت و ج) زایکوترم

^۱- Accelerated Loading Facility

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	حدود مورد قبول آیین نامه	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۵۶-۴۹	۴۷ درجه سلسیوس
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۷۰-۶۰	۶۷ دسی میلی متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۲۳۲<	۳۰۴ درجه سلسیوس
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	۱۰۰<	بیش از ۱۰۰ سانتی متر
چگالی	ASTM D70	-	۱/۰۴۵ gr/cm ³
افت حرارتی	ASTM D6	-	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	-	۹۹/۵ درصد

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی افزودنی های نیمه گرم

خصوصیات	ساسویت	رئوفالت	زایکوترم
مواد تشکیل دهنده	هیدروکربن های اشباع جامد	واکس های هیدروکربنی و پارافینی	اتیلن گلیکول و بنزین الکل
حالت فیزیکی	قرص جامد	جامد	مایع
رنگ	قهوه ای مایل به سفید	سفید	زرد کم رنگ
بو	بدون بو	بدون بو	بدون بو
وزن مولکولی	۱۰۰۰ گرم بر مول	-	-
وزن مخصوص	گرم بر مول ۰/۹	۷۷۰ kg/m ³	گرم بر مول ۱/۰۱
pH	خنثی	-	کمی اسیدی
نقطه جوش	-	۳۷۰ درجه سلسیوس	-
نقطه اشتعال	۲۸۵ °C	۲۱۰ °C	غیر قابل اشتعال
حلالیت در آب	غیر قابل حل	غیر قابل حل	قابل حل در آب

(MSCR)

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییر شکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR معرفی شده است. روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی زیاد (دمای ۶۴ درجه سلسیوس) با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک قرار می گیرد. قبل از انجام آزمایش نمونه قیر، پیرشده کوتاه مدت (RTFO) می شود. درصد بازگشت کرنش و مدول غیر قابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد. (آشتو، ۲۰۱۰).

افزودنی های نیمه گرم به صورت دستی و آرام به منظور تولید یک مخلوط همگن به قیر خالص اضافه شدند و توسط همزن با دور کم به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط گردیدند. همزن مورد استفاده دارای چهار پره موازی می باشد که یک مخلوط همگن را تولید می نماید. جهت اختلاط زایکوترم با قیر خالص، از یک همزن برقی استفاده شد و سرعت آن به نحوی تنظیم گردید که در قیر با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس، گردابی به عمق ۲ الی ۳ سانتی متر ایجاد کند. سپس، زایکوترم با یک سرنگ انسولین به آرامی با نرخ ۱۰ قطره در دقیقه به قیر اضافه شد

۳-۲. آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری

شماتیک دستگاه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. شماتیک دستگاه رئومتر برش دینامیک

غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری می‌باشد. پارامتر τ ، تنش برشی اعمالی می‌باشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفاتی را دارد (واساژ و همکاران، ۲۰۱۱؛ حافظ و کمال، ۲۰۱۴).

حساسیت نسبت به تنش خزشی نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می‌باشد. (Jnr, diff). این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر Jnr را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر مقدار حساسیت قیر به شیارشدگی زمانی که بارهای ترافیکی مختلف به ساختار مخلوط یا دمای غیرمنتظره در سطح روسازی اعمال شود، نشان می‌دهد (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۰؛ دی‌آنجلو، ۲۰۱۰).

۲-۳. آزمایش دامنه کرنش خطی (LAS)

این آزمایش جهت ارزیابی توانایی قیر برای مقاومت در برابر خرابی خستگی با اعمال بارگذاری سیکلی با افزایش دامنه می‌باشد. آزمایش LAS شامل دو مرحله است: در مرحله اول، خصوصیات رئولوژیک غیر مخرب قیر اندازه‌گیری می‌شود. در حالی که خصوصیات مخرب قیر در مرحله دوم اندازه‌گیری می‌شود. خصوصیات غیر مخرب قیر با پارامتر α نمایش داده می‌شود و به طور غیرمستقیم از آزمایش فرکانس محاسبه می‌گردد. پارامتر α از فرمول $1/(1+m)$ محاسبه می‌گردد که در آن m حداکثر شیب نمودار مدول مختلط به زمان در مقیاس لگاریتمی می‌باشد (پارک و همکاران، ۱۹۹۶؛ لی و کیم، ۱۹۹۸؛ جانسون، ۲۰۱۰).

در مرحله دوم، با اعمال آزمایش کرنش دامنه متغیر انجام می‌شود. آزمایش در حالت کرنش ثابت با اعمال کرنش برشی نوسانی و در فرکانس ۱۰ هرتز می‌باشد. زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه می‌باشد که در یک کرنش ثابت انجام می‌شود و سیکل‌های بعدی با کرنش‌های بیشتر

مقدار کرنش اعمالی، درصد بازگشت کرنش، و مقدار مدول غیر قابل بازگشت برای هر ۱۰ سیکل در هر سطح تنش براساس فرمول‌های ارائه شده در زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$PR = \frac{(\varepsilon_{10} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (2)$$

$$J_{nr} = ave \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (3)$$

مقدار کرنش اولیه (ε_0) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل (ε_c) تعیین می‌گردد. اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است (ε_1). به طور مشابه، مقدار کرنش (ε_f) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری (ε_{10}) در انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه می‌شود. معادله (۲) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می‌دهد.

مقدار مدول غیرقابل بازگشت (J_{nr}) (k/Pa) همان طور که در معادله (۳) آمده است، نسبت مقدار کرنش باقی‌مانده در نمونه بعد از بارگذاری و باربرداری به تنش اعمالی است که مقدار مقاومت نمونه را در برابر تغییرشکل دائمی نشان می‌دهد. پارامتر γ_u مقدار کرنش

نیز حاکی از آن است که نقطه نرمی قیر با افزایش درصد افزودنی از ۴۷ درجه سلسیوس برای نمونه قیر خالص تا ۷۸ درجه برای قیر حاوی ۳٪ افزودنی افزایش می‌یابد.

مقدار انگمی (شکل‌پذیری) برای همه‌ی انواع قیر، بجز قیر حاوی ۳٪ افزودنی ساسوبیت، بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر بوده و در مورد نمونه حاوی ۳٪، این عدد به ۸۰ کاهش یافت که حاکی از کاهش قابلیت شکل‌پذیری (افزایش تردی) نمونه قیر با افزایش مقدار افزودنی می‌باشد. جمع‌بندی نتایج حاصل از آزمایش‌های مقدماتی مشخص می‌کند که حضور افزودنی و افزایش مقدار آن به میزان قابل توجهی بر عملکرد قیر تأثیرگذار می‌باشد. به نحوی که در دمای زیاد (که قیر به حالت روان در می‌آید) باعث کاهش ویسکوزیته و افزایش کارایی قیر می‌گردد. در دمای محیط، قیر حاوی افزودنی دارای درجه نفوذ کمتر و نقطه نرمی بیشتر از نمونه قیر خالص است. با افزایش میزان افزودنی از ۱٪ به ۳٪، از میزان شکل‌پذیری نمونه قیر به میزان قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود که بر اساس خروجی انجام این آزمایش، که در ارزیابی کیفیت چسبندگی قیر به مصالح استفاده می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش چسبندگی مناسب قیر به مصالح سنگی گردد.

۲-۴. رئولوژی قیر خالص و قیر حاوی افزودنی

رئولوژی به زیرمجموعه‌ای از مکانیک محیط‌های پیوسته گفته می‌شود که به مطالعه جریان مواد در مایعات، جامدات نرم و جامدات در حالت موم‌سان می‌پردازد. مطالعات فراوانی مؤید رابطه بین خواص رئولوژیک قیر و عملکرد میدانی آن است که این مطلب خود بیانگر اهمیت درک رفتار رئولوژیک قیر است. قیر در دماهای زیاد یک سیال نیوتنی است که با شن و ماسه به آسانی مخلوط می‌شود. اما در دماهای کم، سیالی ویسکوالاستیک است که ناحیه ویسکوالاستیک خطی آن، مقاومت قیر نسبت به بار ترافیکی را نشان می‌دهد.

انجام می‌شود. دامنه تغییرات کرنش از ۰/۱ تا ۳۰ درصد می‌باشد. حداکثر تنش برشی، کرنش برشی، مدول مختلط و زاویه فاز در هر سیکل ثبت می‌شود. عمر خستگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_f = A (\gamma_{max})^B \quad (4)$$

که A و B ضرایبی هستند که بستگی به خصوصیات مواد دارند که با استفاده از خرابی محیط پیوسته (VECD) قابل محاسبه می‌باشند. آزمایش در دمای میانی (۲۵ درجه سلسیوس) بر اساس آئین‌نامه AASHTO TP101-14 (۲۰۱۴) انجام می‌شود.

۴. تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱. آزمایش فیزیکی قیر

به‌منظور بررسی مقدماتی اثرات ماده افزودنی بر قیر، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و خاصیت انگمی در آزمایشگاه صورت گرفت. نتایج مقدماتی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش فیزیکی قیر

نوع افزودنی	آزمایش	
	درجه	نقطه نرمی
قیر خالص	۶۷	۴۷
۱٪ ساسوبیت	۴۸	۵۴
۳٪ ساسوبیت	۳۵	۷۸
۲٪ رئوفالت	۵۲	۵۷
۴٪ رئوفالت	۴۲	۶۹
زایکوترم	۵۴	۵۲

نمونه‌های قیر با درصدهای مختلف افزودنی ساسوبیت (۱ و ۳ درصد)، رئوفالت (۲ و ۴ درصد) و زایکوترم برای انجام آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ و انگمی تهیه شدند. با توجه به جدول ۳، مشخص می‌شود که استفاده از ساسوبیت باعث کاهش قابل توجه درجه نفوذ قیر می‌شود. نتایج آزمایش تعیین نقطه نرمی

مقدار پارامتر $|G^*/\sin \delta|$ برای قیر حاوی زایکوترم کمترین مقدار است.

در حالت پیرشده کوتاهمدت، با اصلاح قیر با افزودنی‌های نیمه‌گرم، مقادیر پارامتر $|G^*/\sin \delta|$ افزایش می‌یابد. به طوری که قیر حاوی ۳٪ ساسویت بیشترین مقدار را دارد. شارپ (1993) حداکثر پارامتر $G^*/\sin \delta$ را به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال محدود نموده است. با توجه به جدول ۴، اضافه نمودن افزودنی نیمه‌گرم سبب افزایش $|G^*/\sin \delta|$ می‌گردد.

نتایج آزمایش رئولوژی قیر در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ساسویت، ویسکوزیته قیر کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش مقادیر بیشتر ساسویت، مقدار ویسکوزیته روند کاهشی دارد. با افزودن رئوفالت و زایکوترم، ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. شارپ (1993) حداقل مقدار ۱ کیلوپاسکال را قیرهای بدون افزودنی و مقدار ۲/۲ را برای قیرهای حاوی افزودنی در نظر گرفته است. با توجه به نتایج، در حالت پیر نشده، پارامتر $|G^*/\sin \delta|$ با افزودن مقادیر ساسویت افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار آن برای قیر حاوی ۳٪ ساسویت از ۱/۲۴۳ به ۳/۹۴ می‌رسد.

جدول ۴: نتایج آزمایش رئولوژی قیر

نوع قیر	قیر پیر نشده	پیرشده کوتاهمدت (RTFO)	پیرشده بلندمدت (PAV)	
			Stiffness (MPa) at -12°C	m-values at -12°C
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ °C	$G^*/\sin \delta$ at 64 °C (kPa)	$G^*/\sin \delta$ at 64 °C (kPa)	$G^* \cdot \sin \delta$ at 25 °C	$G^*/\sin \delta$ at -12°C
قیر خالص	۲۶۰	۲/۴۳	۲۹۷۰	۰/۳۱۱
۱٪ ساسویت	۲۴۰	۲/۲۵	۳۱۷۰	۰/۳۱۰
۳٪ ساسویت	۲۲۰	۳/۹۴	۳۱۶۰	۰/۳۰۹
۲٪ رئوفالت	۲۴۹	۲/۱	۳۰۱۰	۰/۳۰۵
۴٪ رئوفالت	۲۵۱	۲/۷	۳۲۱۰	۰/۳۰۴
زایکوترم	۲۵۵	۱/۷۳	۲۷۸۰	۰/۳۰۹

۳-۴. نتایج آزمایش MSCR

نتایج آزمایش MSCR برای قیرهای مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. درصد بازگشت کرنش برای قیرهای مختلف در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در جدول ۵ نشان داده شده است. در کل، اضافه نمودن افزودنی‌های نیمه‌گرم، به غیر از زایکوترم، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می‌گردد. درصد بیشتر بازگشت کرنش نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که قیر توانایی بازگشت نسبت بیشتری از کرنش خود بعد از بارگذاری را دارد. هرچه درصد بازگشت کرنش بیشتر

باشد، قیر توانایی بیشتری جهت مقابله با شیارشدگی را دارد. همانطور که از نتایج پیداست، قیر خالص دارای مقدار بازگشت کرنش کمتری در دو سطح تنش می‌باشد که نشان‌دهنده مقاومت کمتر در برابر شیارشدگی می‌باشد. قیرهای اصلاح شده با زایکوترم، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده در دو سطح تنش می‌باشند. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک کمتر این نوع نمونه می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، قیر اصلاح شده با ۳٪ ساسویت بیشترین درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که

نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که قیرهای اصلاح شده می‌باشند. با ساسوبیت دارای مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی

جدول ۵. پارامترهای خروجی آزمایش MSCR

γ_{acc}	پارامتر					نوع قیر
	Jnrdiff	Jnr3200	Jnr100	R3200	R100	
۱۱/۱۰	۸/۲۰	۱/۹۶	۱/۷۹	۹/۸۷	۱۹/۵۷	قیر خالص
۷/۹۲	۱۵/۱۰	۱/۴۱	۱/۱۹	۱۶/۸۲	۳۲/۲۷	۱٪ ساسوبیت
۳/۹۰	۵۵/۳۰	۰/۷۰	۰/۳۱	۳۵/۲۵	۷۹/۶۶	۳٪ ساسوبیت
۱۱/۸۰	۱۰/۱۰	۲/۰۷	۱/۸۶	۹/۶۶	۲۱/۴۸	۲٪ رئوفالت
۹/۶۱	۱۰/۰۰	۱/۶۹	۱/۵۲	۱۲/۸۳	۲۴/۹۴	۴٪ رئوفالت
۱۳/۰۰	۹/۶۰	۲/۲۸	۲/۰۶	۷/۲۰	۱۹/۲۱	زایکوترم

کمتر کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای بارگذاری در یک سطح تنش به دست می‌آید. اگر سطوح تنش در آزمایش MSCR یکسان باشد، می‌توان نتیجه گرفت که کرنش دائمی برای قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای خالص کمتر می‌باشد.

حساسیت قیرها نسبت به تنش‌های اعمالی با استفاده از پارامتر Jnr-diff. به دست می‌آید که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۵)

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200Pa} - J_{nr@100Pa}}{J_{nr@3200Pa}} \cdot 100$$

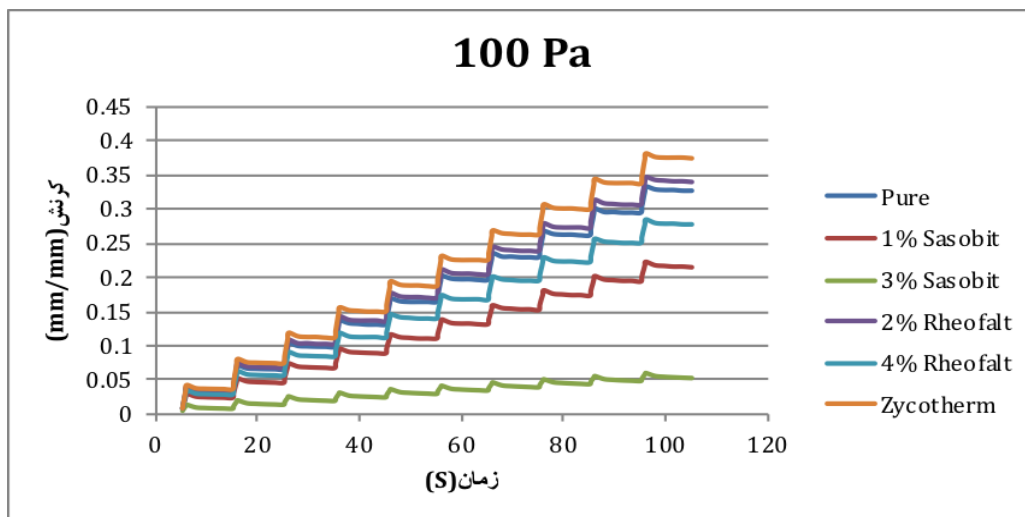
همچنین جدول ۵ نتایج درصد اختلاف بین مدول غیرقابل بازگشت را در آزمایش بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد. درصد اختلاف نشان‌دهنده حساسیت قیر به افزایش در سطح تنش می‌باشد. بنابراین، مقادیر کمتر نشان‌دهنده حساسیت کمتر مواد به تنش می‌باشد. آیین-نامه آشتو، مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل بازگشت (Jnr-diff) را به ۷۵٪ محدود کرده است. این معیار می‌تواند استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدگی بالایی دارند را اگرچه الزامات درجه عملکردی را ارضا نمایند، محدود نماید.

جدول ۵ مقادیر مدول غیر قابل بازگشت (Jnr) را در سطوح کرنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر Jnr با افزودن ساسوبیت کاهش می‌یابد. به طوری که قیر حاوی ۳٪ ساسوبیت دارای کمترین مقدار Jnr می‌باشد. مقادیر کمتر Jnr نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می‌باشد. نتایج، مقادیر بهتری را برای افزودنی ساسوبیت نسبت به رئوفالت نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، قیر اصلاح شده با زایکوترم بیشترین مقدار پارامتر Jnr را دارا می‌باشد. این مورد نشان‌دهنده این است که افزودنی زایکوترم منجر به حساسیت قیر به شیارشدگی می‌گردد. همچنین، افزودن ۲٪ رئوفالت به قیر سبب افزایش پارامتر Jnr و افزودن ۴٪ رئوفالت سبب کاهش آن می‌گردد.

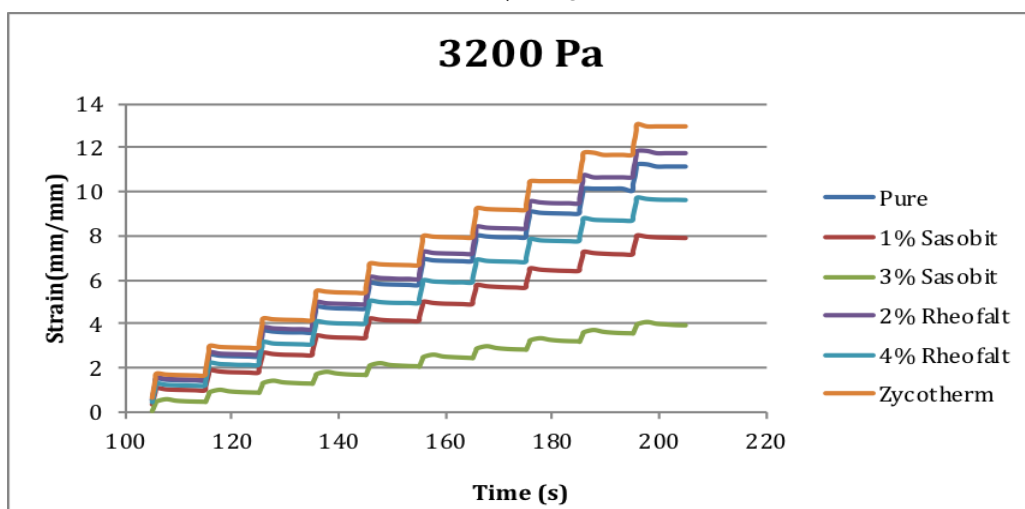
با توجه به مواردی که در قبل ذکر شد، مقادیر کمتر مدول غیرقابل بازگشت نشان‌دهنده مقاومت بیشتر قیر در برابر شیارشدگی بعد از اعمال بارگذاری می‌باشد. از لحاظ مخلوط آسفالتی، قیرهای دارای مقادیر کمتر Jnr و یا مقادیر بیشتر درصد بازگشت کرنش، نشان‌دهنده نقش کمتر قیر در کرنش غیرقابل بازگشت می‌باشد. از نقطه نظر رئولوژی قیر، مقادیر کمتر Jnr ممکن است از مقادیر

تجمعی برای قیرهای اصلاح شده در ۱۰ سیکل اول و ۱۰ سیکل انتهایی نشان داده شده است. در حالت کلی، حضور اصلاح‌کننده‌ها نسبت به حساسیت قیرها به شیارشدگی در شرایط دمایی غیرقابل پیش‌بینی و یا شرایط بارگذاری مختلف بسیار مضر می‌باشد.

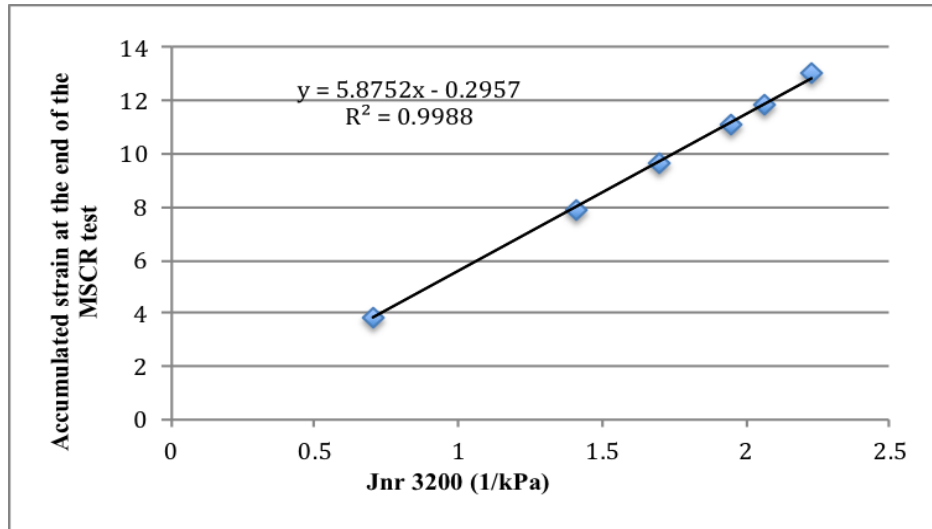
با توجه به جدول ۵ می‌توان دریافت که مقدار پارامتر Jnr-diff برای قیر حاوی ۳٪ ساسوبیت بیشترین مقدار می‌باشد. بنابراین، این نوع قیر اصلاح شده می‌تواند در زمره قیرهای با حساسیت بالا نسبت به تنش قرار گیرد. حساسیت قیرهای حاوی ساسوبیت نسبت به تنش در شکل‌های ۳ و ۴ نیز نشان داده شده است. کرنش



شکل ۳. روند تغییرات کرنش برای قیرهای با افزودنی‌های مختلف در ۱۰ سیکل اول بارگذاری در آزمایش MSCR در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال



شکل ۴. روند تغییرات کرنش برای قیرهای با افزودنی‌های مختلف در ۱۰ سیکل پایانی بارگذاری در آزمایش MSCR در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال



شکل ۵. رابطه همبستگی بین Jnr_{3200} و G_{acc}

هرحال، اگر قیر تحت تأثیر کاهش سریع در مقدار G'' قرار گیرد، مقدار پارامتر A نیز کم خواهد بود. مقدار پارامتر B مربوط به حساسیت قیر به افزایش سطح کرنش می‌باشد. شیب بیشتر (مقدار پارامتر B بیشتر) نشان‌دهنده این است که عمر خستگی قیر با افزایش دامنه کرنش با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین، شیب کمتر (مقدار پارامتر B کمتر) نشان‌دهنده این است که عمر خستگی قیر با نرخ کمتری کاهش می‌یابد (نونز و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۶. نتایج آزمایش LAS

قیر پیرشده کوتاه‌مدت (RTFO)		
پارامترهای آنالیز VECD		قیر
B	A	
-2.72	1.65E+04	قیر خالص
		۱٪
-2.92	1.49E+05	ساسوبیت
		۳٪
-3	6.91E+04	ساسوبیت
		۲٪ رئوفالت
-2.71	1.06E+05	۴٪ رئوفالت
-2.79	4.64E+04	زایکوترم
-2.7	3.21E+04	

روند تغییرات عمر خستگی نمونه‌های مختلف قیر در

مقادیر کرنش جمعی در انتهای آزمایش MSCR (G_{acc}) در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد، مقادیر Jnr_{3200} و G_{acc} همبستگی بالایی دارند. این موضوع به این دلیل است که کرنش جمعی در انتهای آزمایش اصولاً در ۱۰ سیکل انتهایی آزمایش بارگذاری- باربرداری به وجود می‌آید. این موضوع به نوبه خود به این دلیل است که تنش خزشی اعمالی و همچنین تغییر شکل خزشی، در نیمه دوم آزمایش بیشتر از نیمه اول آزمایش می‌باشد (لوکانن، 2015).

۴-۴. نتایج آزمایش LAS

همانطور که قبلاً گفته شد، عمر خستگی در آزمایش LAS (مقادیر عددی در جدول ۶) براساس خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک با نتایج آزمایشگاهی پارامتر A و B می‌باشد.

در آنالیز VECD، پارامتر A نشان‌دهنده تغییرات در ثبات و استحکام ماده به علت تجمع خرابی می‌باشد. مطلوب‌ست که مواد ثبات و استحکام خود را در طول سیکل‌های بارگذاری تحت عنوان مدول تلف شده (G'') حفظ کنند. در این صورت، مقدار پارامتر A بیشینه خواهد بود. به

تنها زمانی پیشنهاد می‌شود که مخلوط آسفالتی تحت تأثیر سطوح کرنش کم قرار می‌گیرند؛ زمانی که ضخامت مخلوط آسفالتی بیشتر است. در حالی که استفاده از قیر اصلاح شده با ۲٪ رئوفالت نسبت به بقیه قیرهای اصلاح شده مزیت بیشتری در مقابله با پدیده خستگی از خود نشان می‌دهد، زمانی که سطح کرنش بالا می‌باشد (آسفالت با ضخامت کمتر).

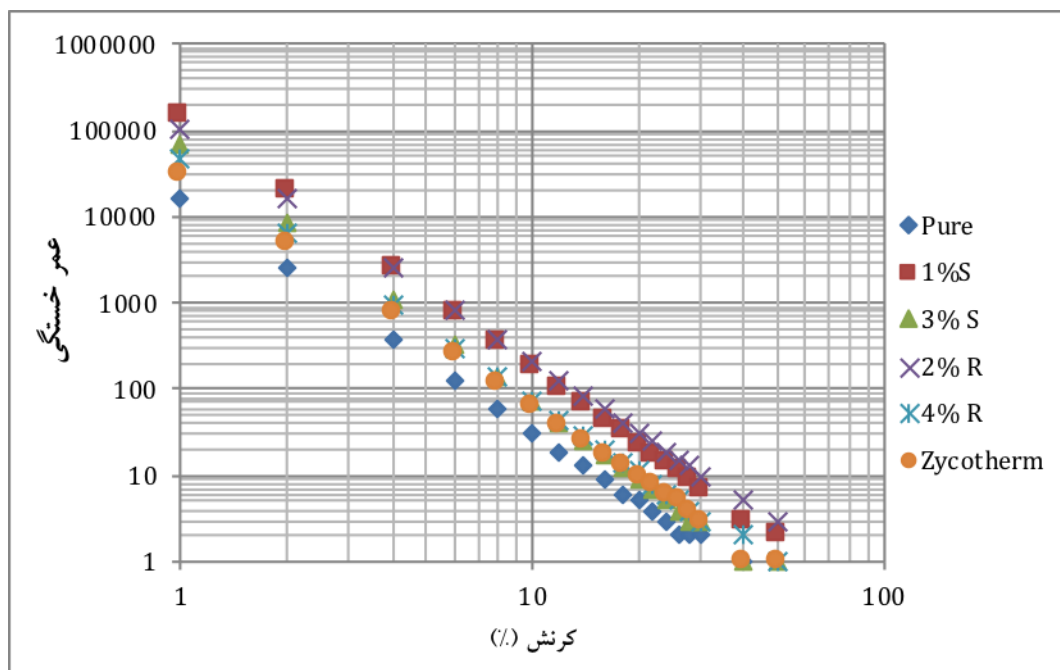
۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق، نتایج خصوصیات رئولوژیک قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه‌گرم را نشان می‌دهد. رفتار رئولوژیک قیرها در دمای میانی (خرابی خستگی) و دمای زیاد (حساسیت در برابر شیارشدگی) و دمای کم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر براساس خروجی‌های آزمون LAS، تنش خزشی دو گانه باربرداری (MSCR) و دمای متغیر به‌دست آمده است:

شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار تعداد سیکل‌ها تا شکست نمونه (Nf) که نشان‌دهنده تعداد قابل تحمل عبور وسایل نقلیه توسط ماده است را نسبت به کرنش برشی نشان می‌دهد. این موضوع شرایطی را که قیر در روسازی می‌تواند داشته باشد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، قیری که عمر خستگی بهتری را در سطوح کرنش کمتر نشان می‌دهد، به ترتیب شامل قیر حاوی ۱٪ ساسویت، ۲٪ رئوفالت، ۳٪ ساسویت، ۴٪ رئوفالت و زایکوترم می‌باشد.

برای سطوح کرنش کمتر، رفتار خستگی قیرهای حاوی ۳٪ ساسویت، ۴٪ رئوفالت و زایکوترم بسیار مشابه است. در حالی که قیرهای حاوی ۲٪ رئوفالت، رفتار خستگی بهتری نسبت به بقیه قیرهای اصلاح شده دارند.

روش آنالیز VECD به روشنی نشان می‌دهد که رفتار خستگی قیرها به مقدار زیادی وابسته به وجود افزودنی، نوع و درصد آن می‌باشد. استفاده از قیرهای اصلاح شده



شکل ۶. نتایج عمر خستگی قیرها

کرنش در دماهای زیاد می‌شود. قیر اصلاح شده با زایکوترم دارای کمترین مقدار بازگشت کرنش در تمامی

براساس نتایج آزمایش MSCR، اضافه نمودن افزودنی نیمه‌گرم به قیر ۷۰-۶۰ سبب افزایش درصد بازگشت

- سطوح تنش می‌باشد. قیر اصلاح شده با ۳٪ ساسوبیت میزان بازگشت کرنش بیشتری را در هر دو سطح تنش نشان می‌دهد و قیر اصلاح شده با ساسوبیت مقدار مقاومت شیارشدگی بیشتری را نسبت به دیگر افزودنی‌ها دارد.
- پارامتر J_{nr} برای قیرهای اصلاح شده با ۳٪ ساسوبیت در هر سطح تنش بیشتر می‌باشد، ساسوبیت به تنش برای این نوع افزودنی نسبت به بقیه افزودنی‌ها بیشتر است.
- عمر خستگی قیر اصلاح شده با ۱٪ ساسوبیت در سطوح کرنش کم نسبت به دیگر افزودنی‌های نیمه گرم بیشتر می‌باشد.
- در قیر اصلاح شده با زایکوترم، مقدار پارامتر J_{nr} نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر می‌باشد.
- با وجود اینکه در صد بازگشت کرنش بیشتر و مقدار

۷. مراجع

- AASHTO TP70. 2010. "Standard Practice for Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO TP101-14. 2014. "Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Anderson, M., D'Angelo, J. and Walker, D. 2010. "MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties". Asphalt, The Magazine of the Asphalt Institute, Lexington, KY, <http://www.asphaltmagazine.com/news/detail.dot?id=d90e7ce8-f127-4617-ac1d-7d788e2df710> (Jul. 28, 2013).
- D'Angelo, J. 2010. "The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure". Federal Highway Administration, Washington, <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf>.
- D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R., Stephens, K. and Zanzotto, L. 2007. "Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test". Asphalt Paving Technol., 76: 123-162.
- Hurley, G.C. and Prowell, B.D. 2005. "Evaluation of Asphamin Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt". NCAT Report 05-04, Auburn University, Auburn, USA.
- HAFEEZ I, KAMAL M A. Creep compliance: A parameter to predict rut performance of asphalt binders and mixtures [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(8): 5971-5978.
- Johnson, C. 2010. "Evaluation of accelerated procedures for fatigue characterization of asphalt binders". PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Lee, H.J. and Kim, Y.R. 1998. "Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading". ASCE, J. Eng. Mech., 124: 32-40.
- LAUKKANEN O V, SOENEN H, PELLINEN T, HEYRMAN S, LEMOINE G. Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting [J]. Materials and Structures, 2015, 48(12): 4039-4053.
- Nuñez, J.Y.M., Domingos, M.D.I. and Faxina, A.L. 2014. "Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking". Constr. Build. Mater., 73: 509-514.
- Park, S.W., Kim, Y.R. and Schapery, R.A. 1996. "A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete". Mech. Mater., 24: 241-255.
- Prowell, B.D. 2007. "Warm Mix Asphalt". The International Technology Scanning Program Summary Report, American Trade Initiatives, Alexandria, USA.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J. and Zoorob, S.E. 2010a. "Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents". Constr. Build. Mater., 24(9): 1621-1631.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Ferreira, C.I.G. and Pereira, P.A.A. 2010b. "Assessment of the performance of warm mix asphalt in road pavements". Int. J. Pav. Res. Technol., 3(3): 119-127.
- Wang, L.B., Wang, X., Mohammad, L. and Wang, Y.P. 2004. "Application of mixture theory in the evaluation of mechanical properties of asphalt concrete". J. Mater. Civ. Eng., 16: 167-174.
- WASAGE T L, STASTNA J, ZANZOTTO L. Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2011, 12(6): 561-568.

- Xiao, F., Zhao, W. and Amirkhanian, S.N. 2009a. "Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives". *Constr. Build. Mater.*, 23(10): 3144–3151.
- Xiao, F., Amirkhanian, S.N. and Juang, H.C. 2009b. "Prediction of fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks". *J. Mater. Civ. Eng.*, 21(6): 253-261.
- You, A. and Buttlar, W.G. 2004. "Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 16:140-146.
- Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S.N. and Putman, B.J. 2012. "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 31: 265-272.

