

ارزیابی رفتار دمای متوسط و بالای قیر اصلاح شده توسط نانوکامپوزیت

اتیلن وینیل استات-مونتموریلونیت

مقاله علمی - پژوهشی

رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezvan_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

صفحه ۲۹۰-۲۷۷

چکیده

روسازی‌های آسفالتی یکی از پرکاربردترین اجزای مورد استفاده برای روسازی بزرگراه هستند که در طول عمر خود دچار خرابی‌های مختلفی مانند شیار شدگی، خستگی و ترک‌های حرارتی می‌شوند. بنابراین، باید برای بهبود عملکرد قیر با افزودن اصلاح‌کننده‌هایی مانند پلیمرها و نانورس‌ها (NC^1) استفاده شود. در میان مواد افزودنی پلیمری مختلف مورد استفاده برای بهبود عملکرد قیر، اتیلن وینیل استات (EVA^2) یکی از مفیدترین و موثرترین مواد برای روسازی است. در این مطالعه، رفتار رئولوژیکی قیر حاوی EVA/NC و پلیمر EVA مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی رفتار دمای متوسط و بالای قیر، آزمون جاروب دامنه خطی (LAS^3) و تست بازیابی خزش تنش چندگانه ($MSCR^4$) انجام شد. EVA/NC و EVA تولید شدند و با قیر مخلوط شدند. نتایج آزمون پایداری ذخیره سازی نشان داد که قیر اصلاح شده با EVA/NC نسبت به قیر اصلاح شده با EVA پایداری بیشتری دارد. نتایج آزمون $MSCR$ نشان داد که افزودن EVA/NC و EVA به قیر پایه منجر به افزایش درصد بازیابی کرنش و پارامتر Jnr شد. به طوریکه افزودن EVA/NC 6% سبب کاهش 71 درصدی در پارامتر Jnr می‌گردد. همچنین نتایج آزمون LAS نشان می‌دهد که افزودن EVA/NC و EVA به قیر پایه باعث افزایش عمر خستگی قیر می‌شود. بطوریکه افزایش EVA/NC 6% و EVA 6% سبب افزایش عمر خستگی به ترتیب برابر با 9 برابر و 2 برابر گردید. با توجه به مناطق آب و هوایی ایران و قیرهای PG مورد نیاز، می‌توان نتیجه گرفت که قیر اصلاح شده با EVA/NC 6% در تمامی مناطق آب و هوایی ایران و سپس قیر اصلاح شده EVA/NC 6% قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: اتیلن وینیل استات (EVA)، رئولوژی، جاروب دامنه خطی (LAS)، شیارشدگی، بازیابی خزش چند تنش (MSCR)، خستگی

۱-مقدمه

ترک‌خوردگی عمدتاً می‌تواند در سطح لایه/روکش آسفالت به دلیل بارهای خستگی حرارتی از جمله چرخه‌های انجماد/ذوب یا تغییرات دمایی روزانه یا فصلی شروع شود و سپس در آن لایه به سمت پایین منتشر شود. بنابراین، کنترل ترک‌خوردگی خستگی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متخصصان این حوزه است. شش عامل موثر بر عمر خستگی عبارتند از: نوع قیر آسفالت، سطح کرنش، دما، فرکانس بارگذاری، تعداد چرخه‌های بارگذاری و دوره‌های استراحت. هنگامی که روسازی تحت تنش دوره‌ای قرار می‌گیرد،

روسازی یکی از اجزای اصلی راه است که نقش مهمی در تامین ایمنی و آسایش رانندگان دارد. بارهای ترافیکی، شرایط محیطی و مصالح نامرغوب از جمله عواملی هستند که باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند خستگی، شیار و غیره به روسازی می‌شوند. ترک خوردگی خستگی یا ترک خوردگی تمساح یکی از آسیب‌های عمده‌ای است که عملکرد روسازی را کاهش می‌دهد. این نوع ترک از لایه‌های زیرین آسفالت که تنش یا کرنش بیشتری وجود دارد شروع می‌شود و با افزایش دفعات بارگذاری به آرامی به سمت بالا حرکت می‌کند. این

و سفت‌تر شدن قیر شد و در نتیجه مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد. در حالی که الاستومرها رفتار کشسانی دارند و در نتیجه عملکرد کشسانی قیر را بهبود می‌بخشند و در نتیجه توانایی قیر در بازیابی کرنش‌ها را افزایش می‌دهند. اتیلن وینیل استات (EVA) نوعی پلاستومر با کوپلیمر نیمه کریستالی است که برای اصلاح قیر پایه به منظور افزایش کارایی مخلوط برای عملکرد بهتر روسازی در پروژه و بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود (Gonzalez, 2004). در مطالعه ای که توسط عامری و همکاران مورد بررسی قرار گرفت، اثر EVA بر رفتار عملکرد قیر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن EVA به قیر پایه شبکه های سه بعدی را در داخل قیر تشکیل می‌دهد. در نتیجه خواص عملکرد قیر افزایش یافت (Ameri et al, 2013). گونزالس و همکاران رفتار عملکرد قیرهای حاوی EVA را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که رفتار رئولوژیکی و ویسکوالاستیک قیر پایه با افزودن هر دو EVA بکر یا یک کوپلیمر EVA بازیافت شده به قیر پایه افزایش یافت. مقاومت قیر در برابر دمای عملکرد پایین و بالا بهبود یافته است (Gonzalez, 2004).

صبوری و همکاران (Saboori et al, 2017) تحقیقی را جهت تعیین ترکیب بهینه کوپلیمر EVA انجام دادند. قیر با درصدهای مختلف EVA از ۱ تا ۷ درصد ترکیب شد. روند اصلاح قیر در دمای اختلاط، زمان اختلاط، و سرعت برش مختلف انجام شد. خواص فیزیکی و رئولوژیکی بایندر اصلاح شده نیز ارزیابی و با بایندر پایه مقایسه شد. مشخص شد که دما، حیاتی‌ترین پارامتر برای اصلاح EVA است. نرخ برش کمترین تأثیر را بر به دست آوردن یک ترکیب با پایداری ذخیره سازی داشت. میکروسکوپ فلورسانس تغییر در مورفولوژی را با افزایش درصد اصلاح‌کننده نشان داد که می‌توان از آن برای ارزیابی درصد اصلاح‌کننده بهینه برای اصلاح استفاده کرد. پاسخ رئولوژیکی قیر اصلاح شده به طور قابل توجهی بهبود یافته است. اصلاح EVA به بهترین وجه در دماهای بالا مناسب است و می‌تواند برای مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌ها بسیار موثر باشد. با توجه به مروری بر ادبیات می‌توان دریافت که تحقیقات متعددی در استفاده مجزای پلیمر و نانورس در بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی انجام پذیرفته است و تاکنون اثر همزمان این دو افزودنی بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی مورد مطالعه قرار نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی رفتار دمای متوسط و بالا قیرهای اصلاح شده توسط EVA/NC و پلیمر EVA از طریق آزمون MSCR

واکنش مصالح به تنش و کشش از سه جزء اصلی کرنش تشکیل می‌شود: الاستیک، ویسکوالاستیک و پلاستیک. کرنش‌های پلاستیکی کششی باعث خستگی و در نتیجه آسیب به روسازی می‌شود. مخلوط‌های آسفالتی که برای آسفالت راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند از دو جزء اصلی به نام‌های سنگدانه و قیر تشکیل شده‌اند. روسازی‌ها نقش کلیدی در کشورهای در حال توسعه دارند. بنابراین، لازم است در مورد خواص و ساخت آنها بیشتر بررسی شود. در سال‌های اخیر با توجه به ویژگی‌های عملکردی بالای نانومواد، محققان روسازی ترجیح می‌دهند از این مواد به عنوان اصلاح آسفالت در صنعت روسازی استفاده کنند. (Aghapour & Babagoli, 2018; Ziari et al, 2016). از جمله از کلسیم، سیلیس، منیزیم، دی اکسید تیتانیوم (TiO₂)، نانولوله‌های کربنی، آلومینا و نانورس استفاده شد. از میان افزودنی‌های ذکر شده، نانورس‌ها به دلیل بهبود رفتارشان از جمله مدول مختلط بالاتر و رفتار الاستیک بهتر، بیشتر مورد توجه کارشناسان روسازی قرار گرفتند (Babagoli et al, 2017). تحقیقات متعددی بر روی استفاده از مونت موریلونیت (MMT⁵) با سیلیکات‌های لایه‌ای و ساختار لایه‌ای ۲:۱ آن انجام شد. نتایج تحقیق انجام شده توسط حسین و همکاران (Ahmadnia et al, 2011) نشان دادند که افزودن نانورس به قیر، اثر قابل توجهی بر رفتار عملکرد پلیمرهای ترموپلاستیک دارد. این امر تا حدودی به نفوذ پلیمرها بین لایه‌های نانورس نسبت داده می‌شود و در نتیجه فضای بین لایه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به تغییر ساختار به ساختاری درهم می‌شود.

افزودنی‌های پلیمری نتایج موفقیت آمیزی را به عنوان اصلاح‌کننده قیر و مخلوط آسفالت نشان داده‌اند. عملکرد اصلی آنها بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیکی قیر است.

از رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در فناوری راهسازی می‌توان به استایرن-بوتادین تایر، استایرن-بوتادین-لاستیک، اتیلن وینیل استات و پلی اتیلن اشاره کرد. اکثر پلیمرها می‌توانند مقاومت در برابر خستگی، شیار شدن، ترک‌های حرارتی و حساسیت به رطوبت را در مخلوط‌های آسفالتی افزایش دهند. عملکرد مواد افزودنی در بایندر آسفالت به میزان پراکندگی آنها در بایندر آسفالت بستگی دارد. دو نوع پلیمر برای اصلاح قیرها وجود دارد، از جمله: پلاستومرها و الاستومرها (Airey, 2004) افزودن پلاستومر به قیر پایه منجر به ایجاد شبکه سه بعدی در داخل قیر و سخت‌تر شدن

(RV)^۸، رئومتر برشی دینامیکی (DSR)^۹ برای بررسی عملکرد قیرهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت. پایداری قیرها از طریق پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به منظور اعتبارسنجی آزمون خستگی قیر، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای روی مخلوط‌ها انجام شد.

و LAS است. در مروری بر ادبیات گذشته، توجه بسیار کمی به شرایط ترافیکی به منظور طبقه‌بندی قیرها شده است. تحقیقات ذکر شده بیشتر بر شرایط اقلیمی متمرکز است تا شرایط ترافیکی. بنابراین، در این تحقیق مقایسه روش MSCR و PG^۶ در درجه‌بندی قیرهای اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های برنامه تحقیقاتی استراتژیک بزرگراه (SHRP^۷) شامل تست‌های ویسکوزیته چرخشی

۲- مصالح و روش تحقیق

۱-۲- قیر

قیر با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ به عنوان قیر پایه استفاده شد که از پالایشگاه تهران، تهران، ایران تهیه شد. خواص قیر پایه در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- افزودنی‌ها

در این مطالعه نانو رس مونتموریلونیت (MMT) از شرکت سیگما آلد ریچ تامین شده و خواص آن در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور اصلاح قیر پایه از پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) استفاده شد. بر اساس ادبیات (Sidigg et al, 2018) درصد معمول مورد استفاده EVA ۱٪-۷٪ وزنی قیر پایه بود. بنابراین، در این مطالعه از ۲٪، ۴٪ و ۶٪ EVA وزنی قیر پایه استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات قیر

آزمایش	استاندارد	واحد	نتیجه
درجه نفوذ	ASTM D5	(0.1mm)	68
نقطه نرمی	ASTM D36	°C	48
شکل پذیری	ASTM D113	(cm)	+100
نقطه اشتعال	ASTM D92	°C	305
نقطه شعله وری	ASTM D70	°C	318
وزن مخصوص	ASTM D70	gr/cm ³	1.046

۲-۲- افزودنی

در این مطالعه نانو رس مونتموریلونیت (MMT) از شرکت سیگما آلد ریچ تامین شده و خواص آن در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور اصلاح قیر پایه از پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) استفاده شد. بر اساس ادبیات (Sidigg et al, 2018) درصد معمول مورد استفاده EVA ۱٪-۷٪ وزنی قیر پایه بود. بنابراین، در این مطالعه از ۲٪، ۴٪ و ۶٪ EVA وزنی قیر پایه استفاده شد. به منظور تهیه قیرهای اصلاح شده، ابتدا درصد مشخص شده از EVA (۲٪، ۴٪ و ۶٪) با قیر پایه گرم شده (۱۸۰)

۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها

درجه سانتیگراد) در مخلوط‌کن با دور ۱۲۵ به مدت ۲ ساعت به هم زده شد تا یک قیر اصلاح شده همگن تهیه شود. سپس نانورس مونت موریلونیت به قیر پایه و قیر اصلاح شده اضافه شد و سپس از میکسر اولتراسونیک برای مخلوط کردن مواد افزودنی و قیرها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد استفاده شد (Sidigg et al, 2018).

جدول ۲. خصوصیات نانورس

اندازه	رنگ	چگالی	درصد رطوبت	سطح مخصوص
1-2 nm	سفید متمایل به کرم	0.5 – 0.7 gr/cm3	1-2%	220-270 m2/gr

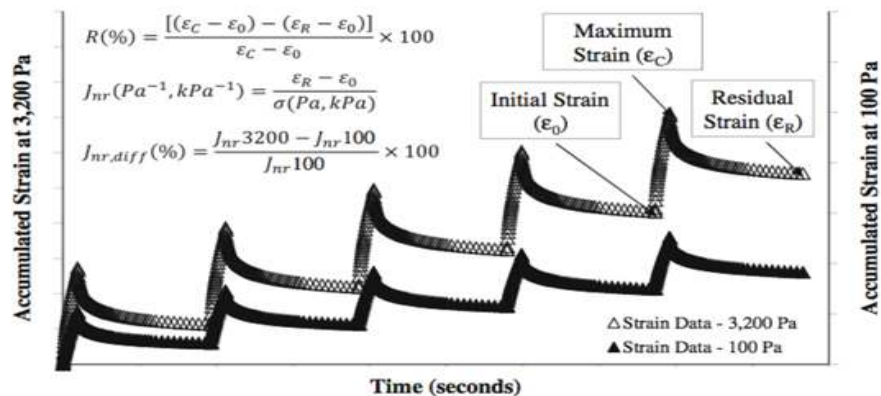
۳- برنامه آزمایشی

۳-۱- آزمایشات رئولوژیکی و فیزیکی قیر

برای ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیرها، آزمون RV و DSR انجام شد. رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها با استفاده از آزمون رئومتر برشی دینامیکی که در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه (۱/۵۹ هرتز) به ترتیب در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و ۶۴ درجه سانتی گراد اجرا شد، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۲- تست پایداری ذخیره سازی

برای اطمینان و بررسی اینکه آیا نمونه‌ها مستعد جداسازی اصلاح‌کننده هستند، آزمایش پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا طبق ASTM-D5892-96a انجام شد.



شکل ۱. خروجی آزمایش MSCR

۳-۳- تست بازیابی خزش چند تنش (MSCR)

دو نمونه ساخته شد. شماتیک انجام تست MSCR در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل نتایج از معادلات زیر استفاده شد.

آزمون MSCR برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش بر رفتار دمای بالا قیرهای پیر شده از طریق روش RTFO^{۱۱} بر اساس AASHTO TP 70 اجرا شد. برای هر نوع متغیر،

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

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

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

۳-۴- تست LAS

معادلات (۴) - (۶) برای ارزیابی تجمع خرابی استفاده شد. حداکثر مقدار تنش برشی توسط AASHTO TP101-14 به‌عنوان نقطه شکست پیشنهاد شد.

مقاومت در برابر خستگی قیر با آزمون LAS ارزیابی شد. آزمایش بر اساس AASHTO TP101-14 انجام شد.

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\alpha/1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\alpha/1+\alpha} \quad (4)$$

$D(t)$ = خسارت انباشته شده را نشان می‌دهد

t = زمان- ثانیه

γ 0 = (%). کرنش اعمال شده

$C_t = G^*(t)/G^*$ (اولیه) = پارامتر قابلیت اطمینان،

G^* = مراجعه کنید (MPa) به مدول پیچیده

معادله زیر می‌تواند رابطه بین آسیب قیر و پارامتر قابلیت اطمینان را نشان دهد:

$$C_t = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (5)$$

C_0 , C_1 و C_2 ضرایب منحنی هستند که بر روی نتایج منطبق می‌شوند.

همچنین مقدار آسیب در نقطه شکست (D_f) محاسبه شد:

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_{peak\ stress}}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (6)$$

عمر خستگی قیرها از طریق رابطه زیر ارزیابی شد:

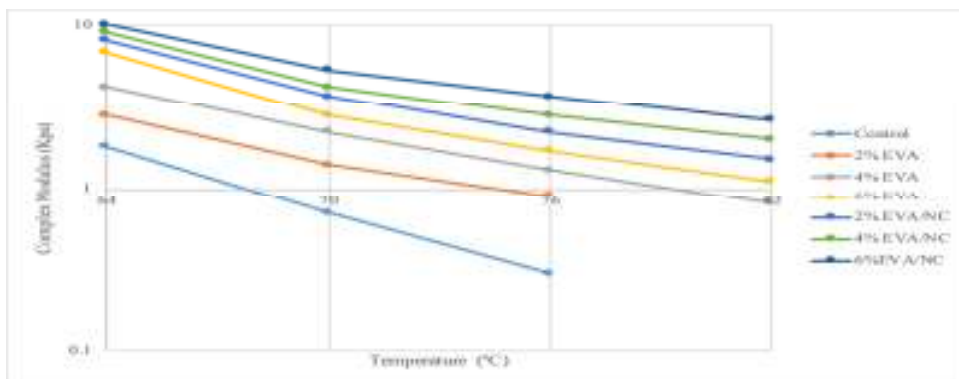
$$N_f = A \times (\gamma_{max})^{-B}, \quad (7)$$

۴- نتایج و بحث

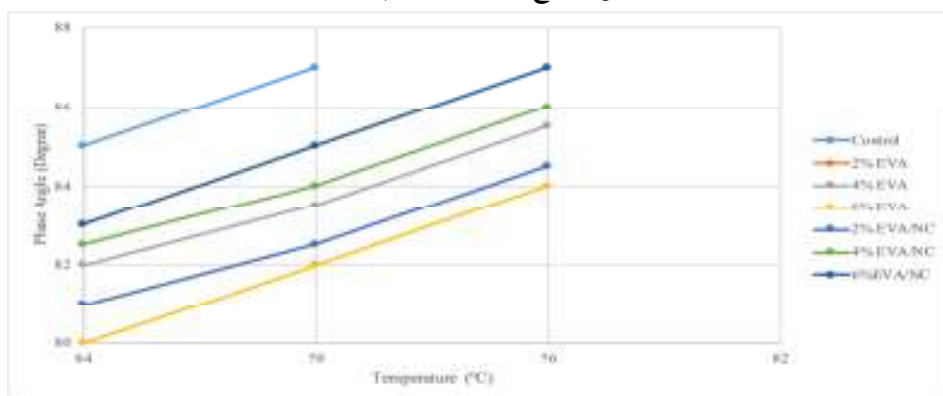
۴-۱- نتایج تست RV, DSR

به کاهش زوایای فاز قیر شد. نتایج نشان داد که در دماهای بالا خاصیت ارتجاعی قیرهای اصلاح شده افزایش می‌یابد. این واقعیت می‌تواند به دلیل ویسکوزیته بالاتر قیرهای اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه باشد. در دماهای بالا، خواص عملکرد قیرهای اصلاح شده تحت تأثیر کشش EVA/NC است. شکل ۴ و ۵ به ترتیب G^* و δ قیرهای اصلاح شده قدیمی را نشان می‌دهد. فرآیند پیری از طریق تغییرات شیمیایی و فیزیکی در طول عمر ساخت و ساز رخ می‌دهد و باعث سخت شدن قیر می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که G^* با افزایش درصد اصلاح کننده افزایش می‌یابد. قیرهای اصلاح شده با EVA/NC با ۴ و ۶ درصد افزودنی، دارای بالاترین G^* بودند که نشان دهنده مقاومت کل بیشتر در برابر تغییر شکل است. با پیر شدن قیرها، پارامتر G^* افزایش می‌یابد و در نتیجه سفتی قیرها افزایش می‌یابد.

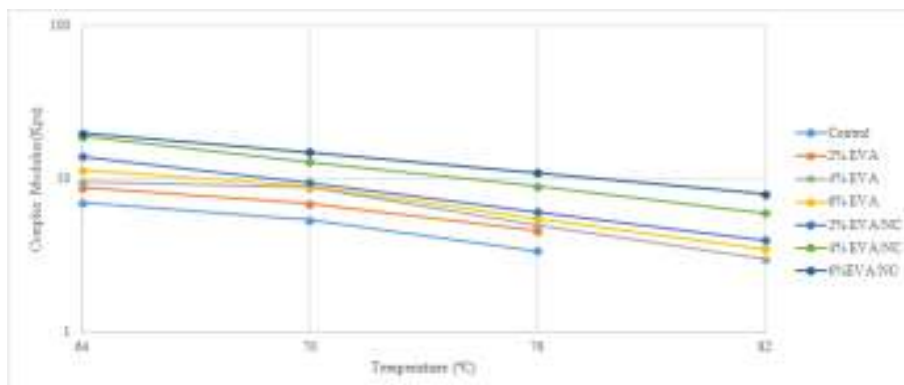
شکل ۲ و ۳ نتایج G^* و δ را در برابر دما برای قیرهای پایه و اصلاح شده به ترتیب نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار G^* برای قیرهای اصلاح شده بالاتر از قیر پایه است. زیرا مواد افزودنی قیر را سفت تر می‌کنند. مدول پیچیده با افزایش دما برای تمام قیرهای اصلاح شده به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. مدول مختلط با افزایش درصد اصلاح کننده افزایش می‌یابد. برای درصد معین، قیرهای اصلاح شده توسط نانوکامپوزیت‌ها مدول مختلط بالاتری دارند. این بدان معناست که انتظار می‌رود قیرهای اصلاح شده با EVA/NC مقاومت در برابر تغییر شکل را بهبود دهند. زاویه فاز به صورت فاصله زمانی بین تنش اعمال شده و کرنش حاصل بیان می‌شود. زاویه فاز بیشتر به ساختار فیزیکی و شیمیایی بستگی دارد تا مدول مختلط. نتایج نشان داد که افزودن مواد افزودنی مختلف منجر



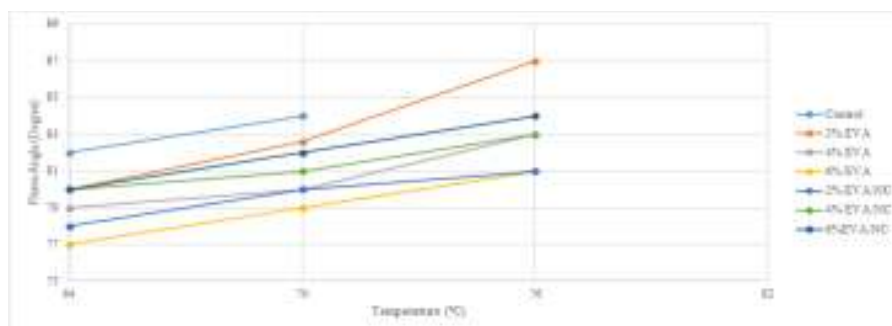
شکل ۲. نتایج سختی نمونه‌های پیر نشده



شکل ۳. نتایج زاویه فاز نمونه‌های پیر نشده



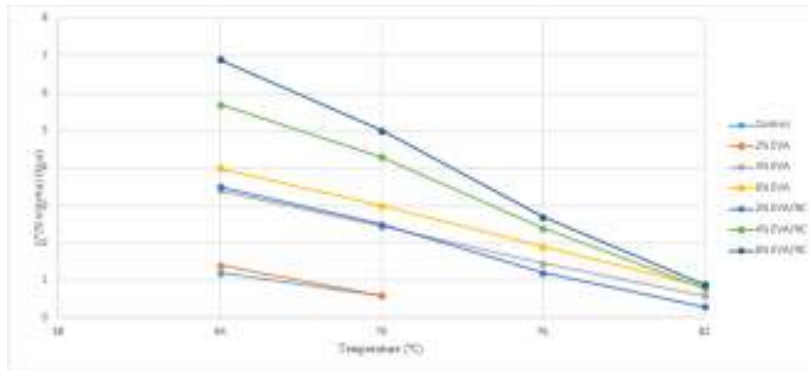
شکل ۴. نتایج مدول مختلط نمونه‌های پیر شده



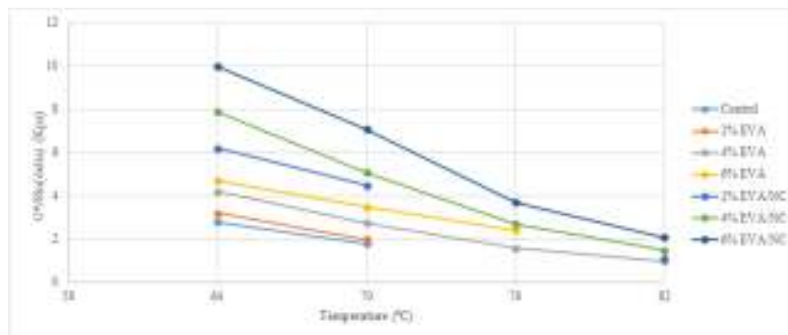
شکل ۵. نتایج زاویه فاز نمونه‌های پیر شده

قیر اصلاح شده با EVA/NC ۶٪ دارای بالاترین مقدار $G^*/\sin \delta$ در هر دو شرایط پیرشده و پیرنشده بود، در نتیجه قیر اصلاح شده با EVA/NC ۶٪ مقاومت بهتری در برابر شیار شدگی دارد. آزمایش در دماهایی که از محدودیت‌های مشخصات Superpave فراتر رفته بود ($G^*/\sin \delta > 2.2$ کیلو پاسکال برای پیری RTFO و $G^*/\sin \delta > 1$ کیلو پاسکال برای قیر پایه) متوقف شد. بنابراین، آزمایش تا دمای ۷۶ درجه سانتیگراد برای قیرهای با مقاومت بالاتر در برابر شیارشدگی ادامه یافت.

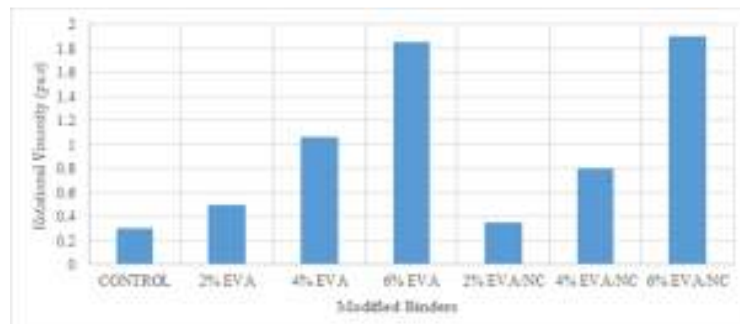
همانطور که قبلاً ذکر شد، سیستم PG یک پارامتر G^* را به عنوان پارامتر شیار پیشنهاد کرد. شکل ۶ G^* را برای قیرهای پیر نشده نشان می‌دهد. مقاومت شیارشدگی قیر با افزودن اصلاح کننده‌ها افزایش می‌یابد. با این حال، تفاوت کمی بین قیرهای اصلاح شده با درصد کم پلیمر EVA و قیر پایه وجود دارد. شکل ۷ مقادیر $G^*/\sin \delta$ را پس از پیری نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت، مشخص شد که مقاومت شیارشدگی با افزایش اصلاح کننده پس از پیری RTFO افزایش می‌یابد.



شکل ۶. نتایج آزمایش شیارشدگی نمونه‌های پیر نشده



شکل ۷. نتایج آزمایش شیارشدگی نمونه پیر شده



شکل ۸. نتایج آزمایش ویسکوزیته

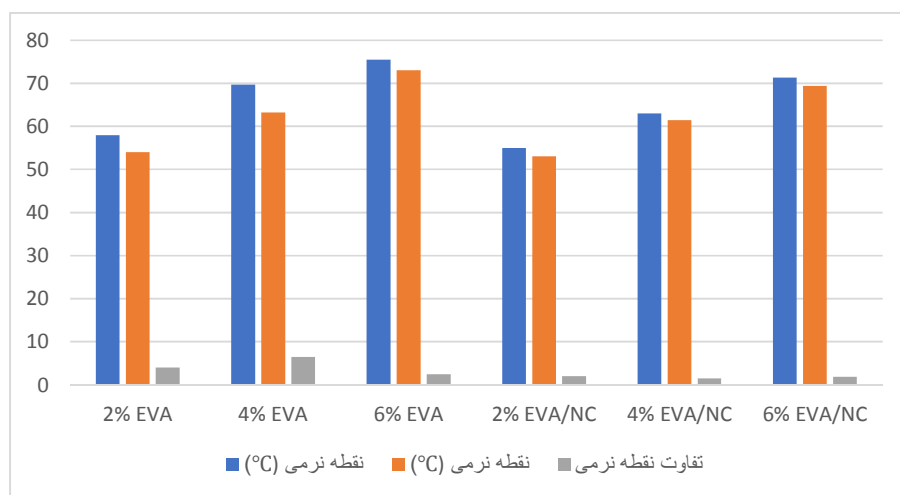
۴-۲- پایداری ذخیره سازی در دمای بالا

EVA و قیر پایه دارای چگالی متفاوتی هستند، بنابراین زمانی که قیرهای اصلاح شده در یک مخزن ذخیره می‌شوند یا در حین پمپاژ و استفاده در روسازی، ممکن است بین فازهای مختلف جدایی رخ دهد. طبق قانون استوکس در دماهای بالا و شرایط استاتیک، قطرات EVA بالا می‌آیند و روی قیر شناور می‌شوند. تست پایداری ذخیره سازی مقاومت قیرها را در دماهای بالا در برابر جداسازی فاز اندازه‌گیری می‌کند. نتیجه آزمایش پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده در شکل ۹ نشان داده شده است. اگر تغییر در نقاط نرمی نمونه تهیه شده از بخش پایین و بالای نمونه‌ها بیشتر از ۲/۵ درجه سانتیگراد برای قیر اصلاح شده با EVA باشد، نشان دهنده جداسازی فاز در قیر اصلاح شده است. قیر با این حال، با افزودن نانورس و

تشکیل متعاقب آن EVA/NC، جداسازی فاز بهبود یافت و نتایج نقطه نرم شدن از بخش پایین و بالای نمونه کمتر از ۲/۵ درجه سانتیگراد بود. این امر بر اساس دو واقعیت قابل توجیه است:

- افزودن نانورس به EVA منجر به یکسان شدن اختلاف چگالی بین EVA و قیر می‌شود که یکی از دلایل جداسازی فاز در دماهای بالا می‌باشد.

- ساختار و وزن مولکولی فاز قیر از دیگر عواملی است که بر پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده تأثیر می‌گذارد. استفاده از NC به قیر منجر به سفت شدن قیر شد، بنابراین پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با EVA/NC افزایش یافت.



شکل ۹. نتایج پایداری ذخیره سازی قیرها

۴-۳- تست MSCR

آزمون MSCR بر روی سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال اجرا شد. جدول ۷ نتایج خروجی تست MSCR را نشان می‌دهد. درصد بازیابی قیر پایه با افزودن EVA و EVA/NC افزایش می‌یابد. هر چه درصد بازیابی بیشتر باشد، مخلوط آسفالتی مقاومت بیشتری در برابر خرابی شیارشدگی دارد. همانطور که از نتایج نشان داده شده است، درصد بازیابی قیر پایه کمترین مقدار را در بین نمونه‌ها دارد.

دلیل اصلی آن، کشش کمتر قیر پایه بود. همچنین، از جدول ۷ می‌توان دریافت که استفاده از ۶٪ EVA/NC برای اصلاح قیر پایه منجر به افزایش بازیابی در هر دو سطح تنش شد. نتایج نشان داد که استفاده از EVA و نانورس با قیر پایه باعث افزایش استحکام قیرها در برابر شیارشدگی می‌شود. از نتایج می‌توان مشاهده کرد که درصد بازیابی قیرها با اصلاح قیر پایه با ۶ درصد EVA حدود ۹/۶۲ و ۱۱/۱۸

(Jnr) کاهش یافت. بنابراین قیر حاوی ۶ درصد EVA کمترین مقدار Jnr را دارد. هر چه مقدار Jnr شدن هستند. پارامتر دیگری (Jnr-diff) توسط AASHTO پیشنهاد شد که نشان دهنده حساسیت قیر در برابر تغییر تنش از ۱۰۰ به ۳۲۰۰ پاسکال است. هرچه پارامتر (Jnr-diff) کمتر باشد، حساسیت ماده در برابر افزایش تنش کمتر است.

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200pa} - J_{nr@100pa}}{J_{nr@3200pa}} \times 100 \quad (14)$$

نتایج پارامتر (Jnr-diff) در جدول ۷ نشان داده شده است. از EVA/NC٪۶ دارای بالاترین مقدار (Jnr-diff) است. از این حقایق می‌توان استنباط کرد که حساسیت این قیر اصلاح شده بیشتر از سایر قیرها است. اما این قیر اصلاح شده الزامات استاندارد را برآورده می‌کند.

درصد در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ pa افزایش می‌یابد. نتایج جدول ۷ نشان داد که با افزودن محتوای EVA پارامتر کمتر باشد، استحکام قیر در برابر تغییر شکل دائمی بیشتر است. همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود پارامتر Jnr برای قیرهای اصلاح شده با EVA/NC کمتر از قیرهای اصلاح شده EVA است. این بدان معناست که قیرهای EVA نسبت به قیرهای EVA/NC بیشتر مستعد شیار

نتایج پارامتر (Jnr-diff) در جدول ۷ نشان داده شده است. Superpave مشخصه (Jnr-diff) را به ۷۵ درصد در درجه حرارت بالا قیر محدود می‌کند. همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است، قیر اصلاح شده

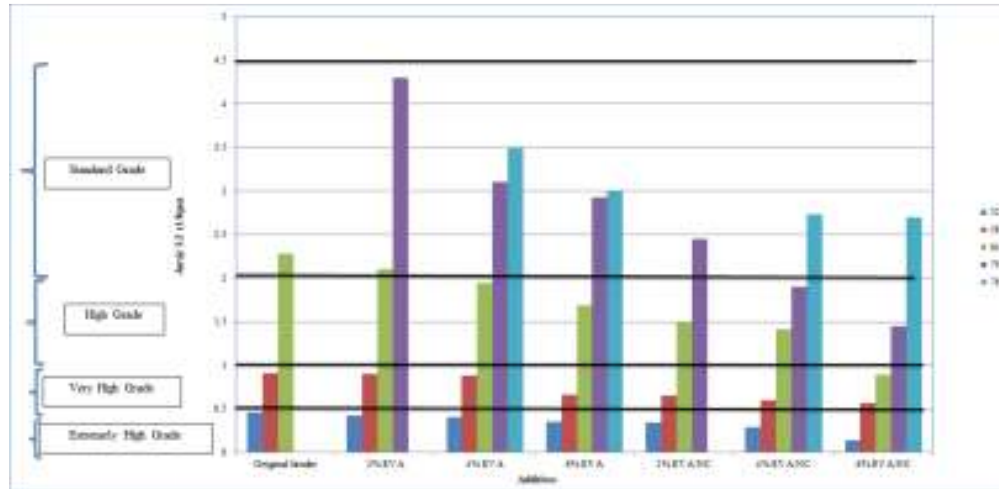
جدول ۷. نتایج تست MSCR

قیر	R100 %	R3200 %	Jnr100 kPa-1	Jnr3200 kPa-1	Jnr-diff %	γ_{acc} کرنش تجمعی
قیر پایه	19.21	9.87	2.06	2.28	10	13.10
2% EVA	19.27	16.82	1.86	2.1	13.10	11.80
4% EVA	21.48	20.25	1.79	1.94	8.37	9.61
6% EVA	24.94	27.34	1.52	1.69	11.18	7.92
2% EVA/NC	28.65	31.23	1.37	1.5	9.51	6.23
4% EVA/NC	31.89	33.20	1.04	1.41	35.58	5.10
6% EVA/NC	39.5	35.25	0.6	0.89	48.33	3.90

۴-۴- درجه بندی قیر اصلاح شده بر اساس روش MSCR

داده شده است. برای درجه بندی قیر غیر پیرنشده از معیار $G^*/\sin \delta = 1$ کیلو پاسکال استفاده شده است، در حالی که برای قیر پیرشده RTFO از روش MSCR در ترافیک استاندارد. (J nr. -3.2kPa = 4.5kPa-1) برای ارزیابی دمای پایین و درجه بندی قیرها معیارها مانند سیستم PG است.

در این مطالعه از دو روش در درجه بندی قیرهای پایه و اصلاح شده EVA/NC استفاده شد. سیستم PG و MSCR اثر محتویات افزودنی گرم بر پارامترهای Jnr در ۳/۲ کیلو پاسکال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سپس نتایج مقایسه دو روش در درجه بندی قیرها به دست آمد. نتایج درجه بندی قیرها بر اساس دو روش در جدول ۸ نشان



شکل ۱۰. نتایج آزمایش MSCR

با توجه به مناطق آب و هوایی ایران و قیرهای PG مورد نیاز از PG (76-10)، ۲۸-۷۰، ۱۶-۷۰، ۱۰-۷۰، ۲۸-۶۴، ۱۶-۶۴، ۲۲-۵۸، ۲۲-۵۸، ۲۸-۵۸، ۳۴-۵۸، ۱۰-۶۴، ۱۶-۶۴، ۲۲-۵۲، می‌توان نتیجه گرفت که قیر اصلاح شده با ۴٪ EVA/NC در تمامی مناطق اقلیمی ایران قابل استفاده است.

قیرهای اصلاح شده EVA/NC بر اساس روش‌های ذکر شده درجه بندی شدند و نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که تقریباً همه قیرها با دمای بالا از طریق سیستم PG و MSCR در سطح ترافیک استاندارد یکسان درجه بندی می‌شوند.

جدول ۸. نتایج درجه بندی براساس MSCR و PG

سیستم PG		سیستم MSCR				
Original binder	PG64-22	64S-22	58V-22	52E-20	-	-
2% EVA	PG64-22	70S-22	64S-22	58V-22	52E-22	-
4% EVA	PG70-28	70S-28	76S-28	64H-28	58V-28	52E-28
6% EVA	PG76-22	76S-34	70S-34	64H-34	58V-34	52E-34
2% EVA/NC	PG 76-28	70S-28	64H-28	58V-28	52E-28	-
4% EVA/NC	PG 76-34	76S-34	70H-34	64H-34	58V-34	52E-34
6% EVA/NC	PG 76-28	76S-28	70H-28	64V-28	58V-28	52E-28

۴-۵- نتایج تست LAS

طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. ضرایب VECD قیرهای اصلاح شده مختلف در جدول ۹ نشان داده شده است. استفاده از اصلاح کننده‌ها به ترتیب باعث افزایش و کاهش ضریب C1 و ضریب C2 می‌شود. بر اساس نتایج، قیر اصلاح شده ۶٪ EVA/NC بالاترین C1 و کمترین C2 را دارد.

نتایج آزمایش LAS در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل از شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در سطوح کرنش بالا تنش برشی قیرهای اصلاح شده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که نشان دهنده سطح بالایی از آسیب است. علاوه بر این، قیر اصلاح شده ۶٪ EVA مقاومت بهتری در برابر آسیب نشان می‌دهد. همچنین بر اساس شکل ۱۱، در سطح کرنش بالا، پاسخ تنش برشی این قیر اصلاح شده به

جدول ۹. ضرایب VECD

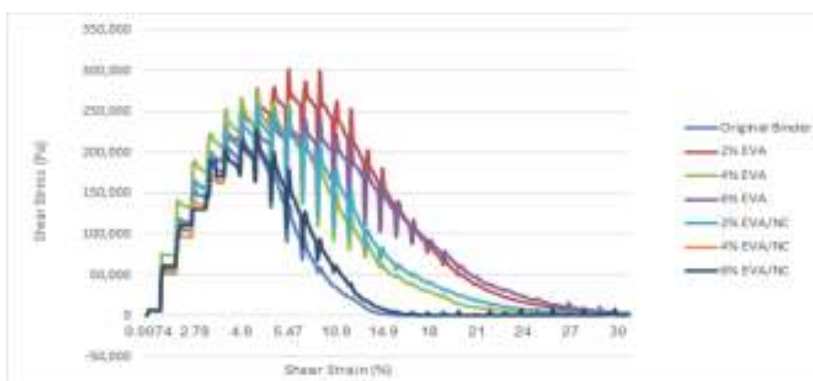
Binder Type	C_0	C_1	C_2
Original Binder	1	0.069	0.546
2% EVA	1	0.061962757	0.556198166
4% EVA	1	0.085541754	0.44672221
6% EVA	1	0.087451183	0.459500584
2% EVA/NC	1	0.099600123	0.420493471
4% EVA/NC	1	0.112321754	0.47350221
6% EVA/NC	1	0.13820791	0.383500144

جدول ۱۰. عمر خستگی قیرها

Binder Type	2.5% Nf	5% Nf
Original Binder	1366	853
2% EVA	4355	945
4% EVA	8335	1345
6% EVA	10395	1835
2% EVA/NC	12465	2264
4% EVA/NC	16347	5374
6% EVA/NC	20741	7616

به ترتیب ۱۴۱۸٪ و ۷۹۲٪ در هر دو سطح کرنش ۲٫۵٪ و ۵٪ دارد. بر اساس نتایج آزمون LAS که از طریق رویکرد VECD ارزیابی شد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از افزودنی‌های EVA/NC می‌تواند برای افزایش عمر خستگی، به ویژه در سطوح کرنش برشی پایین به جای سطوح کرنش برشی بالا، مفید باشد.

جدول ۱۰ عمر خستگی قیرهای مختلف را نشان می‌دهد. آزمون خستگی در دو سطح کرنش ۲٫۵٪ و ۵٪ انجام شد. همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود، استفاده از EVA منجر به افزایش عمر خستگی قیر پایه شد. به طوری که با افزودن درصد EVA، عمر خستگی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از نتایج آشکار است که قیر اصلاح شده ۶٪ EVA/NC عمر خستگی بالاتری نسبت به قیر پایه



شکل ۱۱. نمودار تنش به کرنش نمونه‌ها

۵- نتیجه گیری

EVA/NC 4٪ مشاهده کرد. تمام قیرهای اصلاح شده با EVA/NC پایدار هستند، زیرا ادغام نانوس در EVA تفاوت چگالی بین قیر و EVA را برابر می‌کند. -قیرهای اصلاح شده با EVA/NC دارای مقادیر G^* بالاتر و مقادیر δ کمتر نسبت به قیرهای اصلاح شده با پلیمر EVA هستند. خواص ویسکوالاستیک قیر ۷۰/۶۰ را بهبود می‌بخشد و مقاومت در برابر شیار شدن در دماهای بالا را افزایش می‌دهد.

-با توجه به نتایج تست LAS، افزودن EVA/NC به قیر پایه منجر به بهبود رفتار خستگی قیرها شد. افزودن درصدهای بالاتر EVA باعث افزایش رفتار خستگی قیرها می‌شود.

این تحقیق تاثیر EVA و EVA/NC بر قیر را ارزیابی کرد. برای بررسی رفتار رئولوژیکی قیرها، آزمون‌های DSR، RV، MSCR و LAS انجام شد. همچنین قیرهای اصلاح شده با سیستم PG و سیستم MSCR درجه بندی شدند. با توجه به نتایج، نتایج زیر حاصل می‌شود:

-بر اساس نتایج تست پایداری ذخیره سازی، استفاده از EVA با قیر پایه وضعیت ناپایداری را نشان می‌دهد. بنابراین، جداسازی فاز قیر اصلاح شده با EVA جدی است. این را می‌توان به وضوح در نمونه قیر اصلاح شده با -قیرها باید در دماهای بالا قابل کار و به اندازه کافی سیال باقی بمانند. نتایج تست ویسکومتر چرخشی نشان می‌دهد که ویسکوزیته دینامیکی قیرها با استفاده از مواد افزودنی افزایش می‌یابد.

-با توجه به مناطق اقلیمی ایران و قیرهای PG مورد نیاز، می‌توان نتیجه گرفت که قیر اصلاح شده با EVA/NC ۴٪ در تمامی مناطق آب و هوایی ایران قابل استفاده است.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Nano Clay
- 2- Ethylene Vinyl Acetate
- 3- Linear Amplitude Sweep
- 4- Multiple Stress Creep Recovery
- 5- Montmorillonite
- 6- Performance Grade
- 7- Strategic Highway Research Program
- 8- Rotational viscosity
- 9- Dynamic Shear Rheometer
- 10-X-ray Fluorescence
- 11-Rolling Thin Film Oven

۷- مراجع

-Airey GD., (2004), "Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials", Int J Pavement Eng., 5(3), pp.137-51.

-Ameri, Mahmoud, Ahmad Mansourian, and Amir Hossein Sheikhmotevali, (2016), "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumen and mixtures based upon performance related parameters", Construction and Building Materials 40

-Aghapour, M., & Babagoli, R., (2018), "Effect of high reclaimed asphalt pavement on performance of Rubberized Asphalt Mixtures", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, pp.1-50.

-Ahmadinia E et al., (2011), "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt", Mater Des., 32(10), pp.4844-9.

Materials, 20(4), pp. 411–434.
Doi:10.1177/0892705707079604.

-Saboori, Nikhil, and Praveen Kumar, (2016), "Optimum blending requirements for EVA modified binder", Transportation Research Procedia 17, pp.98-106.

-Siddig, Elfadil AA, Cheng Pei Feng, and Li Yi Ming, (2018), "Effects of ethylene vinyl acetate and nanoclay additions on high-temperature performance of asphalt binders", Construction and Building Materials 169, pp.276-282.

-Ziari, H., Mirzababaei, P., & Babagoli, R., (2016), "Properties of bituminous mixtures modified with a nano-organosilane additive", Petroleum Science and Technology, 34(4), pp.386-393.

(2013), pp.438-447.

-Babagoli, R., & Mohammadi, R., (2017), "Laboratory evaluation of the effect of styrene-butadiene-styrene–montmorillonite nanocomposite on rheological behavior of bitumen and performance of stone matrix asphalt mixtures", Canadian Journal of Civil Engineering, 44(9), pp.736-742.

-Gonzalez, O. et al., (2004), "Rheology and stability of bitumen/EVA blends", Eur Polymer J 40(10), pp.2365–72.

-Hussain, F., Roy, S., Narasimhan, K., Vengadassalam, K., and Lu, H., (2007), E-Glass—Polypropylene pultruded nanocomposite: manufacture, characterization, thermal and mechanical properties, Journal of Thermoplastic Compos- ite

Evaluation of Intermediate and High Temperature Behavior of Binder Modified by Ethylene Vinyl Acetate-Montmorillonite Nanocomposite

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

E-mail: rezvan_babagoli@yahoo.com

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

Asphalt pavements are one of the most widely constituents utilized to pave highway pavement which experience various failures during their lifetime, such as rutting, fatigue and thermal cracking. Therefore it should be used to improve the bitumen performance by addition of modifiers such as polymers and NanoClays (NC). Among the various additives used to improve the bitumen performance, Ethylene Vinyl Acetate (EVA) is one of the most useful and effective materials for paving. In this study, the rheological behavior of bitumen and fatigue behavior of mixture containing EVA/Nanoclay and EVA latex were evaluated. In order to evaluate the intermediate and high temperature behavior of binder, the Linear Amplitude Sweep (LAS) test and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test were implemented. EVA/NC and EVA latex were made and mixed with bitumen. Results of storage stability test shown that EVA/NC-modified bitumen is steadier than EVA-latex-modified bitumen. MSCR test results indicated that addition of EVA/NC and EVA latex to original binder led to decrease and decrease the percent recovery and non-recoverable compliance (J_{nr}) values, respectively. Also LAS test results show that addition of EVA/NC and EVA latex to original binder cause an enhance in fatigue behavior of binder. According to climatic regions in Iran and required PG binders, it can be concluded that binder modified with 4% EVA/NC can use in all climatic zones in Iran followed by 6% EVA/NC modified binder.

Keywords: Ethylene Vinyl Acetate (EVA), Rheology, Linear Amplitude Sweep (LAS), Rutting, Multi Stress Creep Recovery (MSCR), Fatigue