

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوکامپوزیت اتیلن وینیل استات-مونتوریلونیت بر خصوصیات شیارشدگی و خستگی مخلوط آسفالتی

### علمی - پژوهشی

امین فرج اللهی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضاعاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
فرزین پورحیدری ممقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی،  
ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

صفحه ۲۸۳-۲۹۵

### چکیده

روسازی‌های آسفالتی یکی از پرکاربردترین اجزای مورد استفاده برای روسازی بزرگراه هستند که در طول عمر خود دچار خرابی‌های مختلفی مانند شیارشدگی، خستگی و ترک‌های حرارتی می‌شوند. بنابراین، باید برای بهبود عملکرد قیر از افزودن اصلاح‌کننده‌هایی مانند پلیمرها و نانوسها ( $NC^1$ ) 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 مخلوط، آزمایش‌های تیر خمشی چهار نقطه‌ای، خزش دینامیکی و آزمایش شیار جای چرخ روی مخلوط‌ها 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  $EVA$  پایدارتر است. نتایج آزمون خستگی مخلوط‌ها نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده با نانوکامپوزیت نسبت به قیرهای اصلاح شده با پلیمر  $EVA$  مقاومت بیشتری در برابر خستگی دارند. نتایج نشان داد افزودن  $6\% EVA/NC$  و  $6\% EVA$  سبب افزایش عمر خستگی به ترتیب برابر با  $43\%$  و  $20\%$  درصد گردید. نتایج آزمایش‌های مقاومت شیارشدگی نشان داد با افزایش پلیمر  $EVA$  مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین افزودن مونتوریلونیت نیز سبب افزایش مقاومت مخلوط‌های پلیمری در برابر شیارشدگی گردید.

واژه‌های کلیدی: اتیلن وینیل استات (EVA)، رئولوژی، شیارشدگی، مخلوط آسفالتی، خستگی

### ۱-مقدمه

به دلیل بارهای خستگی حرارتی از جمله چرخه‌های انجام‌دوب 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، واکنش مصالح به تنش و کشش از سه جزء اصلی کرنش تشکیل می‌شود: الاستیک، ویسکوالاستیک و پلاستیک. کرنش‌های پلاستیکی

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 تماس 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 ترک‌خوردگی عمدتاً می‌تواند در سطح لایه/روکش آسفالت

افزایش کارایی مخلوط برای عملکرد بهتر روسازی در پروژه و بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود (Gonzalez, 2004). در مطالعه‌ای 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 مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده توسط EVA/NC و پلیمر EVA از طریق آزمون خزش دینامیکی و شیارجای چرخ است. پایداری قیرها از طریق پایداری ذخیره سازی در دمای بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به منظور مقاومت خستگی مخلوط، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای روی مخلوطها انجام شد.

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 (TiO<sub>2</sub>)، نانو لوله‌های 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 (MMT<sup>3</sup>) 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 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

جدول ۱. خصوصیات قیر

آزمایش	استاندارد	واحد	نتیجه
درجه نفوذ	ASTM D5	(۰/۱ میلیمتر)	68
نقطه نرمی	ASTM D36	(سانتی گراد)	48
شکل پذیری	ASTM D113	(سانتی گراد)	+100
نقطه اشتعال	ASTM D92	(سانتی گراد)	305
نقطه شعله وری	ASTM D70	(سانتی گراد)	318
وزن مخصوص	ASTM D70	(گرم بر سانتی مترمکعب)	1.046

جدول ۲. دانه بندی مصالح سنگی

Sieve Size (mm)	Percent Passing
12.5	100
9.5	97
4.75	68
2.36	49
0.3	12
0.075	5

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایشات سنگ	نتایج	استاندارد
وزن مخصوص حقیقی	2.493	ASTM C127
(%) سایش مصالح درشت دانه	2.2	ASTM C127
(%) سایش مصالح ریزدانه	4.2	ASTM C128
(%) سایش لس آنجلس	22.3	AASHTO T96
(%) درصد شکستگی در دو وجهه	94	ASTM D5821

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی مصالح

نوع	درصد اکسید (%)							
	CaO	Na2O	K2O	Al2O3	Fe2O3	MgO	SiO2	MnO
مصالح آهکی	43	0.07	0.65	2.12	0.95	0.75	17.53	0.046

جدول ۵. 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

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- 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. سنگدانه‌های مورد استفاده از معدن تلو در تهران، ایران تامین شد. جدول ۲ دانه بندی مصالح را نشان می‌دهد. جدول ۳ خواص نگدانه‌ها را نشان می‌دهد. آزمایش  $XRF^4$  (فلورسانس اشعه ایکس) برای بررسی خواص شیمیایی سنگدانه‌های سنگ آهک استفاده شد. جدول ۴ نتایج را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- افزودنی‌ها

در این مطالعه نانو رس مونتموریلونیت (MMT) از شرکت سیگما آلدریج تامین شده و خواص آن در جدول ۳ 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.

### ۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

به منظور تهیه قیرهای اصلاح شده، ابتدا درصد مشخص شده از EVA (۲٪، ۴٪ و ۶٪) با قیر پایه گرم شده (۱۸۰ درجه سانتیگراد) در مخلوط کن 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 سانتی‌گراد استفاده شد (Sidigg et al, 2018). مخلوط‌ها به

روش طراحی مخلوط مارشال طراحی شدند. جدول ۶ دمای اختلاط و تراکم نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. محتوای قیر بهینه برای مخلوط‌های اصلاح نشده تعیین شد و مقدار درصد قیر ۵/۲ درصد وزنی سنگدانه‌ها بود. به منظور ساخت نمونه‌های تیر خستگی از یک متراکم خمیر خطی استفاده شد. در این تحقیق، نمونه‌ها بر اساس حالت کنترل کرنش بر اساس استاندارد AASHTOT321 مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۶. نتایج دمای اختلاط و تراکم

نوع قیر	دمای اختلاط (سانتی‌گراد)	دمای تراکم (سانتی‌گراد)
قیر پایه	150	139
2% EVA	168	160
4% EVA	172	164
6% EVA	181	171
2% EVA/NC	166	152
4% EVA/NC	169	162
4% EVA/NC	182	173

### ۳- برنامه آزمایشی

(۱/۵۹ هرتز) به ترتیب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۶۴ درجه سانتی‌گراد اجرا شد، مورد ارزیابی قرار گرفت.

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

### ۳-۱- تست پایداری ذخیره سازی

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

### ۳-۲- خزش دینامیکی

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه  $UTM-5P^6$  در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود. این آزمایش بر اساس استاندارد 9-19 NCHRP-Unconfined)) انجام شد.

نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد یعنی هر قدر عدد روانی بزرگتر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های دائم بیشتر است.

### ۳-۳- شیار جای چرخ

در تست شیار جای چرخ اخیر، دستگاه‌های جدید (دستگاه ردیابی چرخ هامبورگ، تست‌های شیار افتادگی فرانسوی، آزمایش شیار ناتینگهام، آزمایشات چرخ بارگذاری جرجیا و آنالیز کننده روسازی) توسعه داده شده و برای ارزیابی پتانسیل شیارافتادگی روسازی آسفالتی که در آن‌ها شیار جای چرخ بیشتر ترجیح داده می‌شود، استفاده از یک چرخ بار چرخ سیکلیک در سطح نمونه‌ها است. شیار تجمعی بعد از سیکل‌های پیشنهادی به عنوان معیاری از پتانسیل شیارافتادگی، گزارش شده است.

تست ردیابی چرخ با استفاده از دستگاه ردیابی چرخ برای ارزیابی عملکرد روسازی در دمای بالا انجام شد. نمونه‌ها با درصد‌های قیر تعیین شده از طرح مخلوط و درصد‌های مختلف فیلر توسط ماشین تراکم مالشی متراکم و مخلوط شدند. مطابق با استاندارد [AASHTO T - ۳۲۴] آزمون شیار جای چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ارزیابی عملکرد شیارافتادگی نمونه‌ها انجام شد. به منظور دستیابی به کنترل دما، از محفظه دستگاه استفاده شد. سه نمونه آزمایشی برای هر نوع نمونه ساخته شد.

### ۳-۴- تست خستگی خمشی چهار نقطه

به منظور بررسی رفتار خستگی نمونه‌ها، آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای بر اساس AASHTO T321-07 انجام شد. نمونه‌ها در فرکانس ۱۰ هرتز آزمایش شدند. سفتی خمشی بر اساس معادلات زیر به دست آمد:

$$\varepsilon = 12\delta h \times 10^6 / 3(G_0^2 - 4G_1^2) \quad (1)$$

$$\sigma = G_0 P / Bh^2 \quad (2)$$

$$S = 1000\sigma / \varepsilon \quad (3)$$

$\varepsilon$  اشاره به حداکثر ریز کرنش شود.

$\delta$  به حداکثر جابجایی در وسط تیر (میلی‌متر) اشاره دارد.

$h$  طول نمونه (میلی‌متر) را نشان می‌دهد.

$G_0$  طول بیرونی (۳۵۵,۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد.

$G_1$  طول داخلی گیج (۱۱۸,۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد.

$\sigma$  حداکثر تنش کششی (کیلو پاسکال) را نشان می‌دهد.

$P$  به حداکثر بار (کیلونیوتن) اشاره دارد.

$B$  به عرض تیر (میلی‌متر) اشاره دارد.

$S$  به سفتی خمشی (کیلوپاسکال) اشاره دارد.

از رابطه (۱۱) برای اندازه‌گیری عمر خستگی نمونه‌ها استفاده شد:

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (۴)$$

$N_f$  عمر خستگی نمونه‌ها است.

$\varepsilon$  سطوح کرنش اعمال شده می‌باشد.

$a$  و  $b$  ضرایب هستند.

معادلات ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای اندازه‌گیری انرژی تلف شده و انرژی تلف شده انباشته در هر چرخه بارگذاری استفاده شد.

$$D = \pi\sigma\varepsilon \sin(360f\varphi) \quad (۵)$$

جایی که به انرژی تلف شده ( $J/m^3$ ) مراجعه کنید، فرکانس بارگذاری (Hz) را نشان می‌دهد، بازه زمانی (s) را نشان می‌دهد.

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (۶)$$

$W$  اشاره به انرژی تلف شده تجمعی ( $J/m^3$ ) دارد و

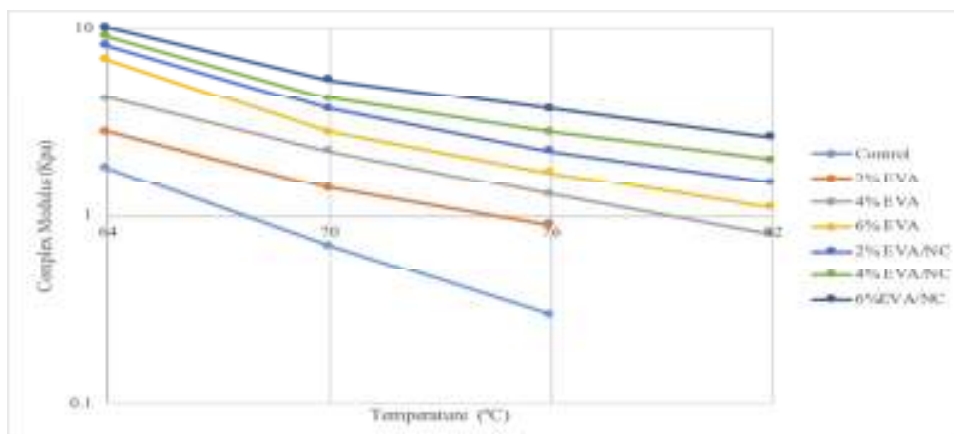
$D_i$  انرژی تلف شده را برای هر چرخه بار نشان می‌دهد.

## ۴- نتایج و بحث

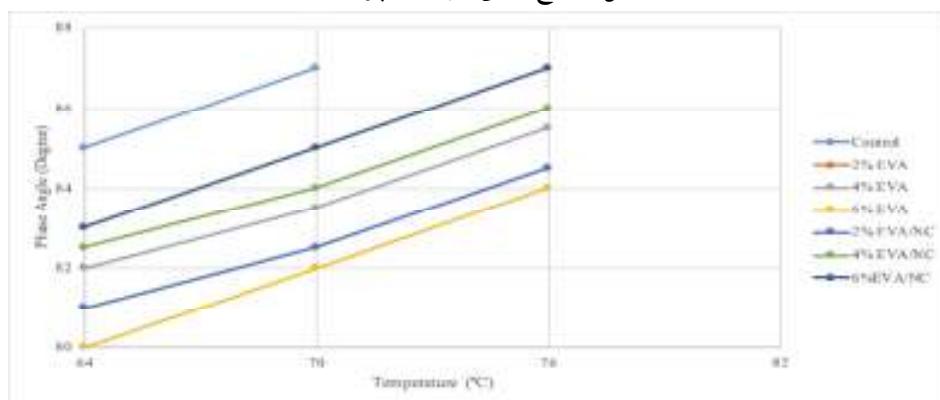
### ۴-۱- نتایج تست RV, DSR

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 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 ۱ و ۲ نتایج  $G^*$  و  $\delta$  را در برابر دما برای قیرهای پایه و اصلاح شده به ترتیب نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقدار  $G^*$  برای قیرهای اصلاح شده بالاتر از قیر پایه است. زیرا مواد افزودنی قیر را سفت‌تر 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



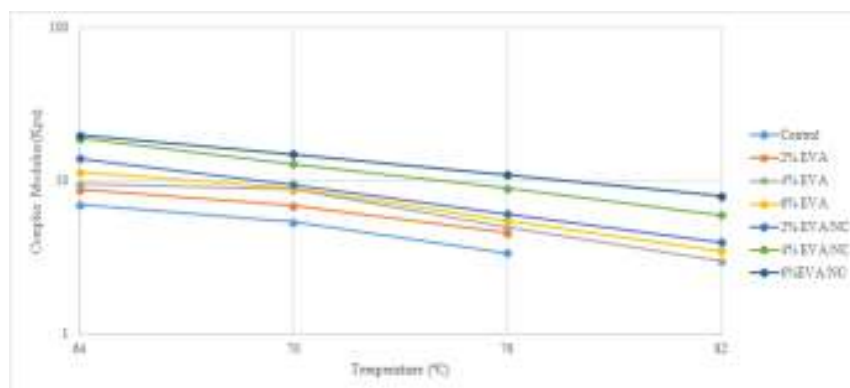
شکل ۱. نتایج سختی نمونه های پیر نشده



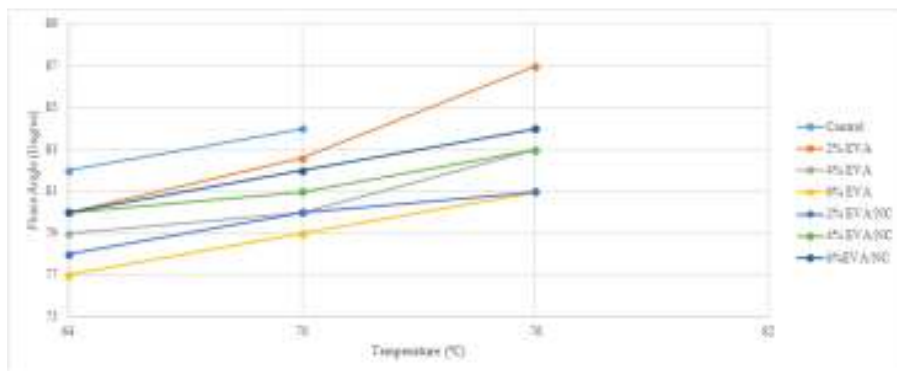
شکل ۲. نتایج زاویه فاز نمونه های پیر نشده

با EVA/NC<sup>\*</sup> 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 می یابد و در نتیجه سفتی قیرها افزایش می یابد.

شکل ۳ و ۴ به ترتیب  $\delta$  و  $G^*$  قیرهای اصلاح شده پیر شده را نشان می دهد. فرآیند پیری از طریق تغییرات شیمیایی و فیزیکی در طول عمر ساخت و ساز رخ می دهد و باعث سخت شدن قیر می شود. شکل ۴ نشان می دهد که  $G^*$  با افزایش درصد اصلاح کننده افزایش می یابد. قیرهای اصلاح شده



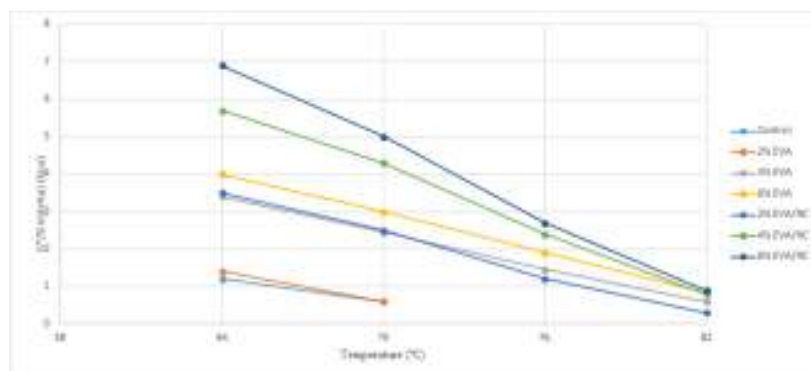
شکل ۳. نتایج مدول مختلط نمونه های پیر شده



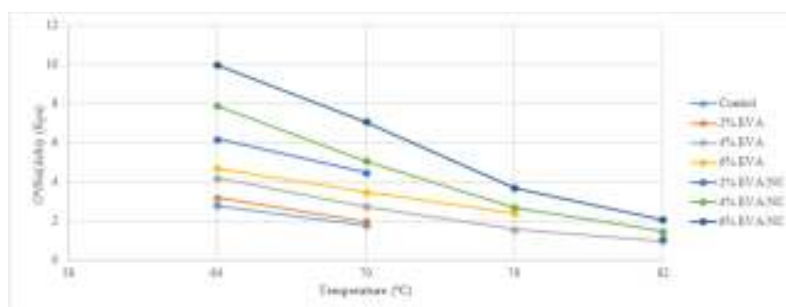
شکل ۴. نتایج زاویه فاز نمونه‌های پیرشده

با ۶٪ EVA/NC دارای بالاترین مقدار  $G^*/\sin \delta$  در هر دو شرایط پیرشده و پیرنشده بود، در نتیجه قیر اصلاح شده با ۶٪ EVA/NC مقاومت بهتری در برابر شیارشدگی 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  $G^*/\sin \delta$  را به عنوان پارامتر شیار پیشنهاد کرد. شکل ۵  $G^*/\sin \delta$  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 ۶ 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<sup>7</sup> افزایش می‌یابد. قیر اصلاح شده



شکل ۵. نتایج آزمایش شیارشدگی نمونه‌های پیر نشده



شکل ۶. نتایج آزمایش شیارشدگی نمونه پیرشده



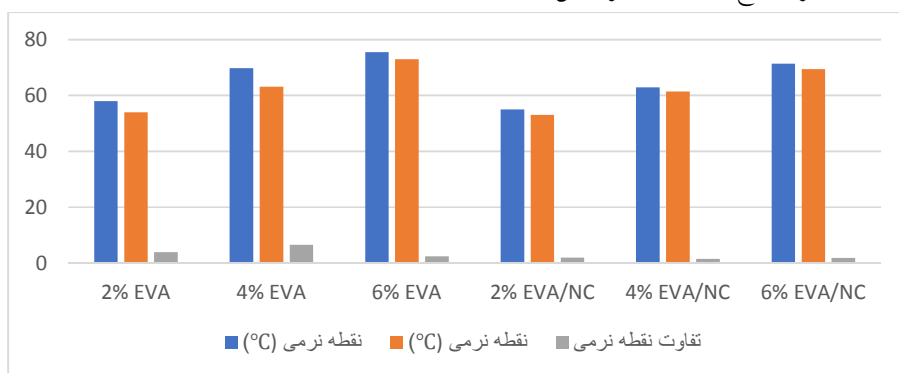
#### ۴-۲- پایداری ذخیره سازی در دمای بالا

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 سانتی گراد 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 ذخیره‌سازی 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.

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 ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح شده در شکل ۷ 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،



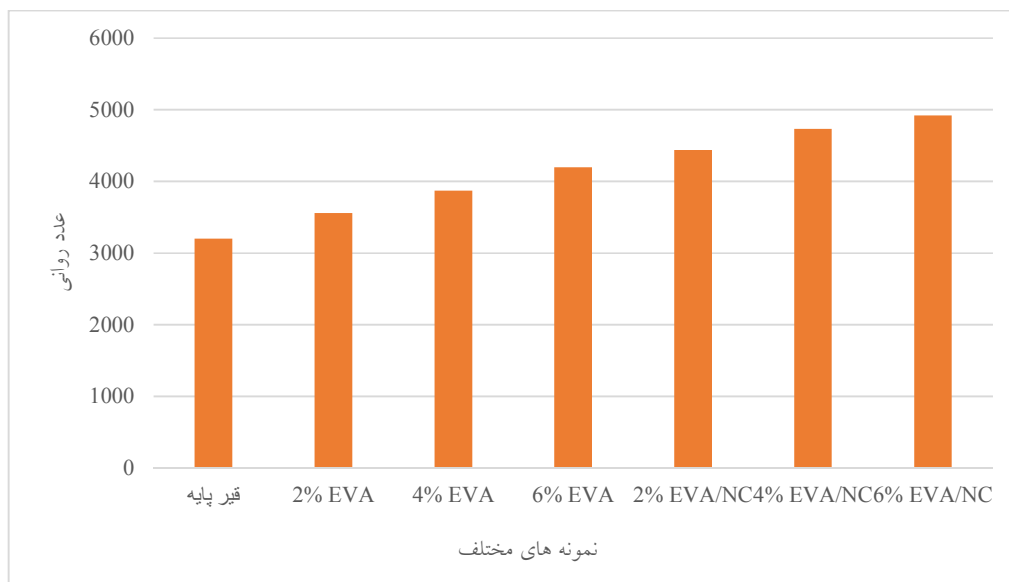
شکل ۷. نتایج پایداری ذخیره سازی قیرها

#### آزمایش خزش دینامیکی

شکل ۸ عدد روانی مخلوط اصلاح شده را نشان می‌دهد. عدد روانی بالاتر نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌ها در برابر شیارافتادگی است. براساس نتایج، افزودن EVA منجر به افزایش مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالت شده و همچنین با افزودن مقدار EVA، مقاومت شیارافتادگی آسفالت می‌شود. همانطور که می‌توان از نتایج مشاهده کرد، اضافه شدن مونتوریلونیت به مخلوط منجر به افزایش عملکرد مخلوط می‌شود. به طوری که تمام مخلوط‌های حاوی EVA/NC مقاومت شیارافتادگی بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی EVA دارند.

شیارشده‌گی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد و به تغییرشکل‌های دائمی گفته می‌شود که بصورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود ( Sureyya, Halit, Aksoy 2007). لذا در این تحقیق شیارشده‌گی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی شیارشده‌گی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد.

آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد ( National Cooperative Highway, 2002). به منظور ارزیابی مقاومت شیارافتادگی مخلوط، آزمون خزش دینامیک انجام شد.

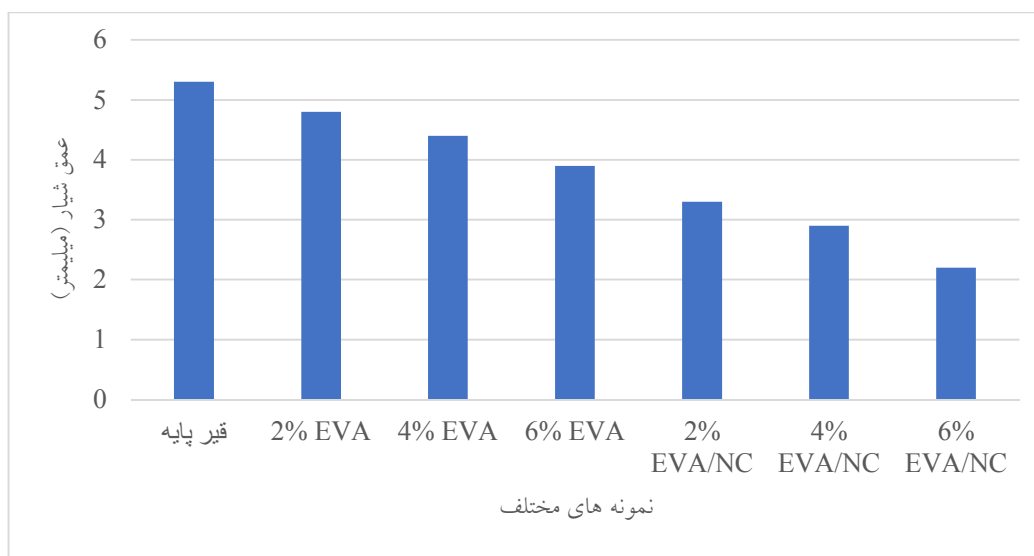


شکل ۸. نمودار نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌ها در دمای ۵۰ سانتی‌گراد

#### ۴-۷- آزمایش شیار جای چرخ

حاوی EVA/NC عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی EVA دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مونتموریلونیت، منجر به افزایش گرانروی قیر و همچنین سختی مخلوط‌ها می‌گردد.

شکل ۹ عمق شیار مخلوط‌های اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان از نتایج مشاهده کرد، EVA منجر به کاهش عمق شیارافتادگی مخلوط‌ها شد. با افزایش مقدار EVA، مقاومت شیارافتادگی بهتر می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده شد، مخلوط‌های

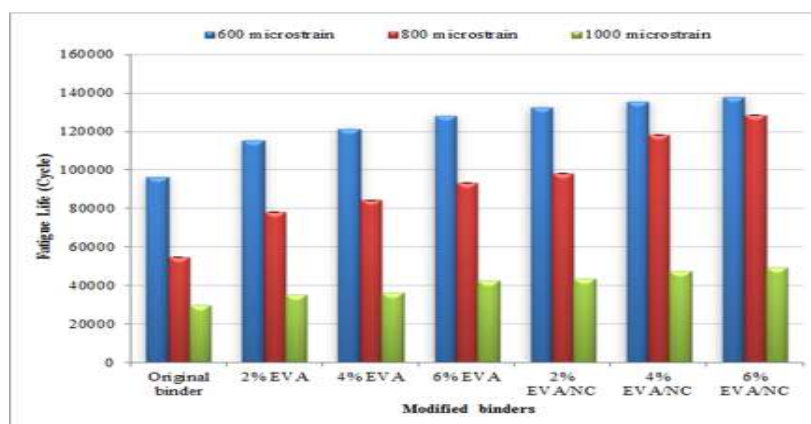


شکل ۹. نتایج آزمایش شیار جای چرخ

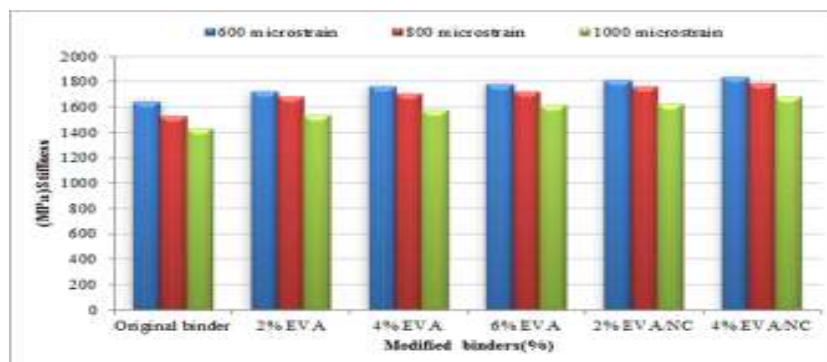
#### ۴-۶- مقاومت در برابر خستگی

شکل ۱۱، افزودن EVA منجر به افزایش سفتی خمشی شد. با افزایش درصد EVA سفتی خمشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین افزایش نانورس به مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر EVA نیز سبب بهبود عمر خستگی نمونه‌ها گردیده است. شکل ۱۲ انرژی تلف شده مخلوط‌های مختلف اصلاح شده را نشان می‌دهد. مخلوط‌هایی با انرژی اتلاف شده بالاتر عملکرد بهتری برای جذب انرژی و متعاقباً مقاومت در برابر خستگی بالاتری دارند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش پلیمر انرژی تلف شده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش نانورس نیز انرژی تلف شده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج تایید کننده نتایج تحقیقات گذشته است.

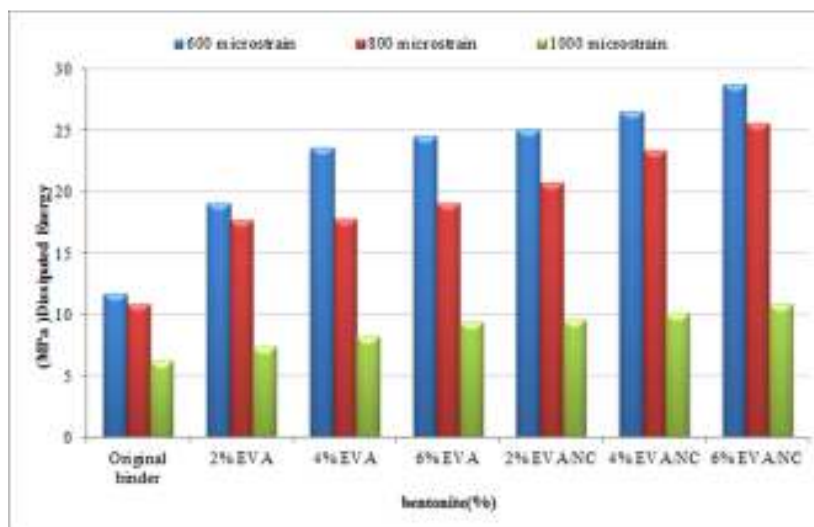
برای بررسی اثر افزودنی‌های گرم مختلف بر مقاومت نمونه‌های مختلف در برابر ترک‌خوردگی خستگی، از آزمون خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شد. شکل ۱۰ رفتار خستگی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از EVA/NC رفتار خستگی مخلوط‌ها را در هر سطح کرنش بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درصد افزودنی EVA رفتار خستگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق، تایید کننده نتایج تحقیقات گذشته است. استفاده از NC به همراه قیرهای اصلاح شده EVA، سبب بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها می‌شود. روند مشابهی از عمر خستگی را می‌توان در هر سه سطح کرنش مشاهده کرد. بر اساس نتایج در



شکل ۱۰. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها



شکل ۱۱. نتایج سختی نمونه‌ها



شکل ۱۲. انرژی تلف شده نمونه‌ها

### ۵- نتیجه‌گیری

قیرهای اصلاح شده با EVA/NC دارای مقادیر  $G^*$  بالاتر و مقادیر  $\delta$  کمتر نسبت به قیرهای اصلاح شده با پلیمر EVA هستند. EVA/NC خواص ویسکوالاستیک قیر ۷۰/۶۰ را بهبود می‌بخشد و مقاومت در برابر شیار شدن در دماهای بالا را افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج آزمایش شیارشدگی مخلوط‌ها، افزودن EVA باعث افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌ها می‌شود. همچنین با افزودن NC به قیرهای اصلاح شده EVA مقاومت شیارشدگی افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج آزمایش خستگی مخلوط‌ها، افزودن EVA باعث افزایش عمر خستگی مخلوط‌ها می‌شود. همچنین با افزودن NC به قیرهای اصلاح شده EVA عمر خستگی افزایش می‌یابد.

این تحقیق تاثیر EVA و EVA/NC بر قیر را ارزیابی کرد. برای بررسی رفتار رئولوژیکی قیرها، آزمون‌های DSR انجام شد. همچنین عملکرد شیارشدگی و خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های فوق توسط آزمون‌های خزش دینامیکی، شیار جای چرخ و تیرخمش چهار نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج، نتایج زیر حاصل می‌شود:

بر اساس نتایج تست پایداری ذخیره‌سازی، 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 4% EVA مشاهده کرد. تمام قیرهای اصلاح شده با EVA/NC پایدار هستند، زیرا ادغام نانورس در EVA تفاوت چگالی بین قیر و EVA را برابر می‌کند.

### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Nano clay
- 2- Ethylene Vinyl Acetate
- 3- Montmorillonite
- 4- Dynamic shear rheometer
- 5- X-ray fluorescence
- 6- Universal testing machine
- 7- Rolling Thin Film Oven

۷- مراجع

- 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 Composite Materials, 20(4), pp.411-434. Doi:10.1177/0892705707079604.
- 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.
- 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.
- 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 (2013): 438-447. Saboori, Nikhil, and Praveen Kumar. "Optimum blending requirements for EVA modified binder." Transportation Research Procedia 17, pp. 98-106.
- Babagoli, R., & Mohammadi, R., (2017), “Laboratory evaluation of the effect of styrene-butadiene-styrene-montmorillonite

# Experimental Evaluation of the Effect of Ethylene Vinyl Acetate-Montmorillonite Nanocomposite on Fatigue and Rutting Behavior of Asphalt Mixture

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Farzin Poorheydari Mamaghani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,  
Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*E-mail: AminFarajollahi@gmail.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 Nano Clays (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 rutting and fatigue behavior of mixture containing EVA/Nanoclay and EVA latex were evaluated. 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. The results of the fatigue test of the mixtures showed that the asphalt mixtures made of bitumen modified with nanocomposite are more resistant to fatigue than bitumen modified with EVA polymer. The results showed that the addition of 6% EVA/NC and 6% EVA increased the fatigue life by 43% and 20%, respectively. The results of the rutting resistance tests showed that the rutting resistance of the samples increased with the increase of EVA polymer. Also, the addition of montmorillonite increased the resistance of polymer mixtures against rutting.

**Keywords:** Ethylene Vinyl Acetate (EVA), Rheology, Rutting, Asphalt Mixture, Fatigue