

## تأثیر پلیمر اتیل وینیل استات بر خصوصیات خستگی قیر و مخلوط آسفالتی

سعید حسامی، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

نوشیروانی بابل

یعقوبعلی خسروی جلودار\*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

علی منیری، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

y\_khosravi\_j@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸

### چکیده

رشد عوامل ترافیکی مانند افزایش حجم ترافیک، تردد وسایل نقلیه با محورهای سنگین تر و فشار تایر بیشتر، نیاز به مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بیشتر را ایجاد می‌کند. تحقیقات انجام شده در دهه‌های اخیر نشان داده که استفاده از پلیمرها و فیبرها در مخلوط‌های آسفالتی سبب به تأخیر انداختن خرابی‌ها و بهبود خصوصیات آن‌ها می‌شود. در تحقیق حاضر، به بررسی و تحلیل تأثیر پلیمر اتیل وینیل استات (EVA) بر رفتار خستگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. برای این منظور، از آزمایش‌های جاروب دامنه خطی و بازیابی الاستیک قیر برای ارزیابی رفتار خستگی قیر و از آزمایش بارگذاری چهار نقطه-ای تیر خستگی جهت ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. نتایج آزمایش بازیابی الاستیک نشان می‌دهد که اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش خواص الاستیک و برگشت‌پذیری قیر خواهد شد. داده‌های خروجی آزمون جاروب دامنه خطی نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده در کرنش‌های بالاتر از خود مقاومت بهتری نشان می‌دهند و روند رشد خرابی در آن‌ها به مراتب کندتر می‌باشد. نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی نشان داد که اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب بهبود خصوصیات ویسکوالاستیک، عملکرد و رفتار خستگی قیر می‌گردد. همچنین، مقایسه نتایج آزمون در دماهای ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که قیرهای خالص و اصلاح شده در دمای ۳۰ درجه عمر خستگی بیشتر و مقاومت خستگی بهتری از خود نشان می‌دهند. با افزایش دما، قیر نرم‌تر شده، خواص ویسکوالاستیک نمود بهتری پیدا می‌کند و ترمیم ترک‌های مویین ناشی از بارگذاری با سرعت بیشتری صورت می‌پذیرد. همچنین، نتایج آزمایش تیر خستگی نشان داد که مخلوط‌های اصلاح شده با این پلیمر، در مقایسه با نمونه‌های حاوی قیر خالص، عمر خستگی بالاتری دارند.

واژه‌های کلیدی: پلیمر اتیل وینیل استات، خستگی، آزمایش بازیابی الاستیک، آزمایش جاروب دامنه خطی، قیر.

## ۱. مقدمه

بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات او نشان داد که مخلوط‌های قیر اصلاح شده با پلیمر فیبر، ایستمن EE-2، SBS، پلی-اتیلن سبک<sup>۱</sup> (LDPE) و پودر لاستیک<sup>۲</sup> به ترتیب عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه خالص دارند. ژی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر پلیمرهای پلی‌پروپیلن<sup>۳</sup> و پودر لاستیک را بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش، نمونه‌های آسفالتی از آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم<sup>۴</sup> استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که اصلاح قیر با پودر لاستیک سبب بهبود رفتار خستگی مخلوط نسبت به نمونه-ی خالص می‌شود. در حالی که مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر پلی‌پروپیلن سبب کاهش مقاومت خستگی نسبت به نمونه خالص می‌گردد. ایری (۲۰۰۲) تأثیر پلیمرهای اتیل وینیل استات<sup>۵</sup> (EVA) را بر مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج آزمایش رنومتر برش دینامیک<sup>۶</sup> نشان داد که اصلاح قیر با EVA سبب افزایش سختی و الاستیسیته قیر در دمای عملکردی بالا و فرکانس بارگذاری کم خواهد شد. لو و چن (۲۰۱۰) تأثیر پلیمر EVA و پلیمر EVA پیوند خورده با اسید آنهیدرید را بر خصوصیات قیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های کلاسیک قیر و آزمایش رنومتر برش دینامیک نشان داد که قیرهای اصلاح شده عملکرد بهتری در دماهای زیاد از خود نشان می‌دهند. عامری و همکاران (۲۰۱۳) مخلوط‌های حاوی صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد EVA را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، آزمایش‌های رنومتر تیرچه خمشی<sup>۷</sup>، رنومتر برش دینامیک، خزش دینامیک<sup>۸</sup> و تنش کششی غیر مستقیم مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط‌های اصلاح شده خصوصیات عملکردی بهتری دارند و نمونه حاوی ۴٪

رشد عوامل ترافیکی مانند افزایش حجم ترافیک، تردد وسایل نقلیه با محورهای سنگین‌تر و فشار تیر بیشتر، نیاز به مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بیشتر را ایجاب می‌کند. عملکرد مخلوط آسفالتی باید با توجه به نوع قیر و مصالح سنگی مصرفی، خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی و شرایط آب و هوایی محل استفاده طراحی گردد. اگرچه قیر سهم وزنی کمی در مخلوط آسفالتی دارد، اما نقش به‌سزایی در رفتار روسازی ایفا می‌کند. خواص فیزیکی و شیمیایی قیر تأثیر عمده‌ای بر عملکرد مطلوب، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. قیر، خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط را در دوران تولید، اجرا و خدمت رسانی کنترل می‌کند. درصد قیر مصرفی و خصوصیات ذاتی آن، از جمله ویسکوزیته، به‌طور مستقیم و تأثیر میزان قیر در مقدار فضای خالی و نقش قیر در پیرشدگی مخلوط آسفالتی، به‌طور غیر مستقیم، در عمر روسازی بتن آسفالتی مؤثرند (هاروی و تسای، ۱۹۹۷؛ ابراهیم و همکاران، ۱۹۹۸؛ سوسا و همکاران، ۱۹۹۳). در دهه‌های اخیر استفاده از افزودنی‌ها، بخصوص پلیمرها و فیبرها، جهت اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی برای بالا بردن عمر سرویس‌دهی و بهبود خصوصیات روسازی‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. روسازی‌های حاوی قیرهای اصلاح شده با پلیمر مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی، ترک‌های دمایی داشته و خرابی خستگی، عریان‌شدگی و حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهند (کینگ و همکاران، ۱۹۹۹). مخلوط‌های اصلاح شده در طول عمر بهره برداری می‌توانند انرژی کرنشی بیشتری در خود جذب کنند. لذا، عمر خستگی بهتری از خود نشان می‌دهند. همچنین، فیبرها و پلیمرها یک شبکه سه بعدی در بتن آسفالتی تشکیل داده و قیر را روی سطح سنگدانه‌ها تثبیت می‌کنند (بقایی مقدم و همکاران، ۲۰۱۱).

وهاب (۲۰۱۲) با استفاده از آزمایش تیر خستگی، تأثیر پلیمرهای مختلف را بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از مصالح آهکی و سیلیسی مورد

<sup>1</sup>- Low-density Polyethylene (LDPE)

<sup>2</sup>- Crumb rubber (CR)

<sup>3</sup>- Polypropylene (PP)

<sup>4</sup>- Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)

<sup>5</sup>- Ethylene-Vinyl Acetate (EVA)

<sup>6</sup>- Dynamic Shear Rheometer (DSR)

<sup>7</sup>- Bending Beam Rheometer (BBR)

<sup>8</sup>- Dynamic Creep Test

بررسی و تحلیل تأثیر پلیمر EVA بر رفتار خستگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. برای این منظور، از آزمایش جاروب دامنه خطی قیر طبق استاندارد AASHTO TP 101 (که در سال ۲۰۱۳ منتشر گردید)، برای ارزیابی خستگی قیرهای خالص و اصلاح شده استفاده گردید. همچنین، آزمایش بازیابی الاستیک (که در تحقیقات گذشته صحت آن مورد تأیید قرار گرفت) برای بالا بردن اطمینان از نتایج، روی نمونه‌ها انجام شد. جهت ارزیابی نمونه‌های بتن آسفالتی از آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای تیر خستگی استفاده شد. در ادامه، مصالح مورد استفاده، شرایط انجام آزمایش و نتایج به دست آمده و تحلیل نتایج ارائه خواهد شد.

## ۲. مصالح مورد استفاده

در این پژوهش، از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ استفاده گردید. قیر مورد استفاده از نوع ۶۰-۷۰ و ۱۰۰-۸۵ بوده و از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده است. مشخصات قیر مصرفی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر خالص ۶۰-۷۰

آزمایش	استاندارد	قیر ۶۰-۷۰
وزن مخصوص (kg/L)	ASTM-D70	۱/۰۱۹
درجه نفوذ 0.1mm	ASTM-D5	۶۱
نقطه نرمی °C	ASTM-D36	۵۰/۲
مقدار کشش پذیری (cm)	ASTM-D113	۱۰۰<
حلالیت در تری کلرو اتیلن (%)	ASTM-D2042	۹۹/۵۳
درجه اشتعال °C	ASTM-D92	۲۸۸
ویسکوزیته کینماتیک (سانتی استوکس)	ASTM-D88	۳۴۹
درجه نفوذ (0.1mm) بعد از RTFO	ASTM-D5	۴۰/۱

پلیمر بهترین عملکرد را داشت. ترالدو و ماریانی (۲۰۱۴) تأثیر پلیمرهای EVA و LDPE را روی خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مخلوط‌های اصلاح شده عملکرد بهتری نسبت به نمونه خالص دارند و نمونه حاوی پلیمر EVA عملکرد به مراتب بهتری نسبت به نمونه اصلاح شده با LDPE از خود نشان می‌دهد. ژو و همکاران (۲۰۱۲) نتایج آزمایش‌های خستگی قیر شامل آزمایش رئومتر برشی دینامیک، آزمایش بازیابی الاستیک<sup>۱</sup>، آزمایش بهبود خزش تنش چندگانه<sup>۲</sup> (MSCR)، آزمایش جاروب دامنه خطی<sup>۳</sup> (LAS) و آزمایش کشش درجه یک در دو گوشه<sup>۴</sup> (DENT) را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از آزمایش فشار-کشش برای ارزیابی نتایج آزمون‌های قیر استفاده شد. در این مطالعه، برای ارزیابی آزمایش‌های خستگی موجود، پنج نوع قیر اصلاح شده و یک قیر خالص انتخاب شده است. نتایج نشان داد که آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک و MSCR رابطه‌ای بسیار ضعیف با خصوصیات خستگی بتن آسفالتی به دست آمده از آزمایش خستگی فشار-کشش دارد. نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی (که طبق استاندارد ۲۰۱۱ انجام شد) نشان داد که تحقیقات بیشتری برای درک بیشتر این آزمایش، به خصوص در تجزیه و تحلیل داده‌ها و در نظر گرفتن هر دو خاصیت ویسکوالاستیک خطی و ویسکوالاستیک غیر خطی مورد نیاز می‌باشد. آزمایش DENT و آزمایش بازیابی الاستیک بهترین آزمایش خستگی قیر در این مطالعه بودند، چرا که رده بندی هر دو آنها مانند رده بندی آزمایش خستگی فشار-کشش بود. هیتز و بهیا (۲۰۱۳) نشان دادند که آزمایش LAS اصلاح شده که با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک انجام می‌شود حد تحمل خستگی قیرهای اصلاح شده را به خوبی نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، به

<sup>1</sup> - Elastic Recovery Test (ER-test)

<sup>2</sup> - Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

<sup>3</sup> - Linear Amplitude Sweep (LAS) Test

<sup>4</sup> - Double-Edge Notched Tension Test (DENT)

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱. آزمایش لعاب نازک چرخشی<sup>۱</sup>

آزمایش لعاب نازک چرخشی طبق استاندارد T-240 AASHTO روی نمونه‌های قیر خالص و اصلاح شده با پلیمر EVA انجام گردید. ابتدا قیر را به آرامی تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس گرم کرده و در ۸ استوانه شیشه‌ای (هر استوانه ۳۵ گرم قیر با دقت ۰/۰۰۱ گرم) می‌ریزیم. استوانه‌ها به صورت عمود در دستگاه قرار داده می‌شوند. آزمایش در دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس با عبور جریان هوا با شدت ۴۰۰۰ ml/min به مدت ۸۵ دقیقه جهت شبیه‌سازی پیرشدگی اولیه قیر (در طول فرایند تولید و حمل و نقل قیر و ساخت و پخش مخلوط آسفالتی) انجام گردید. نمونه‌های پیر شده برای انجام آزمایش بازیابی الاستیک و جاروب دامنه خطی مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۳-۲. آزمایش بازیابی الاستیک قیر

آزمایش بازیابی الاستیک از جمله آزمایش‌های عملکردی جدید قیر است که طبق استاندارد AASHTO T-301-99 و با استفاده از دستگاه سنجش انگمی قیر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام می‌گیرد. نمونه‌های مورد نیاز در قالب‌های مخصوص تهیه می‌گردد. سپس نمونه‌ها را به مدت ۹۰ دقیقه در حمام آب گرم ۲۵ درجه قرار می‌دهیم. در ادامه، نمونه‌ها توسط دستگاه سنجش انگمی با سرعت ۵ cm/min کشیده می‌شوند. زمانی که طول نمونه ۲۰ سانتی‌متر افزایش یافت دستگاه متوقف می‌گردد. نمونه به مدت ۵ دقیقه در همین وضعیت ثابت نگه داشته می‌شود. سپس نمونه‌های کشیده شده از وسط به دو نیم برش داده می‌شوند. به مدت یک ساعت به نمونه فرصت بازگشت داده می‌شود. پس از گذشت این مدت، طول نمونه را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنیم. پس از اتمام آزمایش، درصد بازیابی الاستیک قیر از رابطه (۱) به دست می‌آید:

#### جدول ۲. مشخصات قیر خالص ۱۰۰-۸۵

آزمایش	استاندارد	قیر ۱۰۰-۸۵
وزن مخصوص (kg/L)	ASTM-D70	۱/۰۱
درجه نفوذ 0.1mm	ASTM-D5	۸۷
نقطه نرمی °C	ASTM-D36	۴۶/۸
مقدار کشش‌پذیری (cm)	ASTM-D113	۱۰۰<
حلالیت در تری کلرو اتیلن (%)	ASTM-D2042	۹۹/۸۹
درجه اشتعال °C	ASTM-D92	۲۶۳
ویسکوزیته کینماتیک (سانتی استوکس)	ASTM-D88	۲۴۴
درجه نفوذ (0.1mm) بعد از RTFO	ASTM-D5	۷۴/۸

پلیمر اتیل وینیل استات یک کوپلیمر اتیلن و مینیل استات می‌باشد که از نظر نرمی و انعطاف‌پذیری همانند مواد الاستومر بوده و از نظر قابلیت فرآوری مشابه مواد ترموپلاستیک است. مشخصات پلیمر استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

#### جدول ۳. مشخصات پلیمر EVA

مقدار	واحد	مشخصه
۱۵۱۹	-	درجه پلیمر
۱۹	%	درصد وینیل استات
۰/۹۴	g/cm <sup>3</sup>	چگالی
۱۵۰	g/10 min	شاخص ذوب
۸۱	°C	نقطه ذوب
۸۰۰	(%)	درصد کشیدگی
۷۴	kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت کششی

اختلاط پلیمر مذکور با غلظت ۴٪ با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن دور برشی کم در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت انجام گردید (لو و همکاران، ۱۹۹۹).

<sup>۱</sup> - Rolling Thin Film Oven (RTFO)

گسترده در مدل‌سازی رفتار خستگی قیر و بتن آسفالتی استفاده شده است، تجزیه و تحلیل می‌شوند.

$$ER = \frac{20 - x}{20} \times 100 \quad (1)$$

که ER درصد بازیابی الاستیک و x طول نهایی قیر برحسب سانتی‌متر است.

### ۳-۴. آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای تیر خستگی

آزمایش تیر خستگی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز روی تیرچه‌های استاندارد، که از روش تراکم مالشی ساخته شده بودند، مطابق با استاندارد AASHTO TP8-84 انجام گردید. سختی نمونه‌ها در ۵۰ امین بارگذاری به عنوان سختی اولیه در نظر گرفته شد و تعداد بارگذاری منجر کاهش سختی نمونه تا ۵۰٪ سختی اولیه عمر خستگی نمونه محاسبه گردید. آزمایش بارگذاری تیر خستگی در دو حالت کرنش ثابت (شبیه‌سازی لایه نازک آسفالتی) و تنش ثابت (شبیه‌سازی لایه ضخیم آسفالتی) انجام می‌گیرد. طبق استاندارد برای حالت کرنش ثابت، کرنش‌های ۲۵۰ تا ۷۵۰ میکرو استرین جهت شبیه‌سازی بارگذاری میدانی توصیه شده‌اند. در این پژوهش، آزمایش حالت کرنش ثابت، در کرنش‌های ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ میکرو استرین انجام گردید.

### ۴. نتایج

برای نشان دادن نمونه‌های حاوی قیرهای خالص و اصلاح شده با پلیمر از نمادهای نشان داده شده در جدول ۴ استفاده گردید.

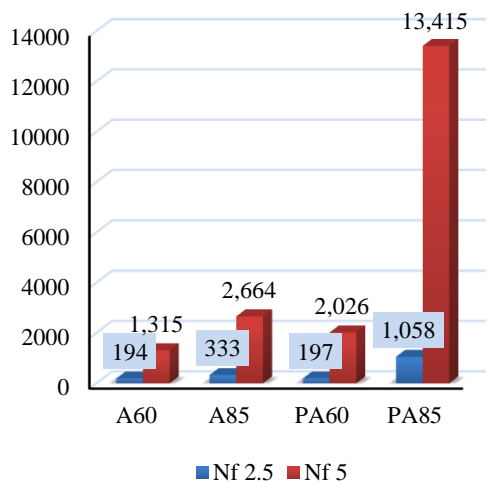
جدول ۴. نمادهای استفاده شده برای معرفی نمونه‌ها

نماد	نمونه
A60	قیر خالص ۶۰-۷۰
A85	قیر خالص ۸۵-۱۰۰
PA60	قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با EVA
PA85	قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با EVA

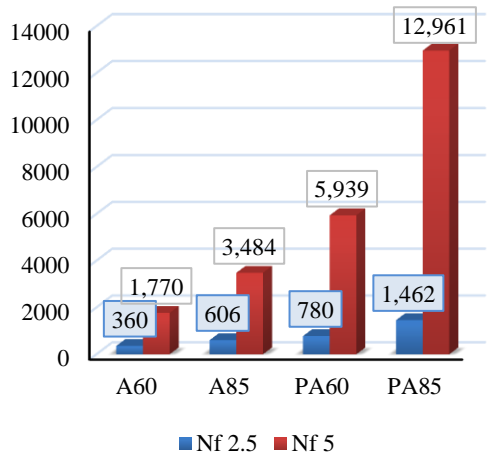
آزمایش بازیابی الاستیک روی قیرهای خالص و اصلاح شده با پلیمر در دو حالت قیر پیر نشده و پیر شده در آزمون پیر شدگی تسریع یافته، انجام گرفت. برای هر نوع قیر، دو

### ۳-۳. آزمایش جاروب دامنه خطی

آزمایش جاروب دامنه خطی طبق استاندارد AASHTO TP-101 در دستگاه رئومتر برش دینامیک با استفاده از دو صفحه موازی به قطر ۸ میلی‌متر با فاصله استاندارد ۲ میلی‌متر، روی نمونه‌های پیر شده در آزمایش RTFO انجام گردید. این آزمایش شامل یک سری از بارهای چرخه‌ای است که دامنه کرنش آن به صورت سیستماتیک خطی در فرکانس ثابت ۱۰ هرتز افزایش می‌یابد و شامل یک آزمون جاروب فرکانس با دامنه کرنش بسیار پایین ۰/۱ درصد برای به دست آوردن خواص مواد سالم می‌باشد. در این مرحله، بارگذاری در حالت کرنش ثابت ۰/۱ درصد با فرکانس‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هرتز صورت می‌گیرد. داده‌های مربوط به  $G^*$  (برحسب پاسکال) و  $\delta$  (برحسب درجه) برای هر فرکانس ثبت و به صورت نمودار ترسیم می‌گردد. پارامتر  $\alpha$  از ویژگی‌های رئولوژیک سالم است که می‌توان آن را  $(1/m)$  در نظر گرفت (m شیب منحنی تمام لگاریتمی مدول آرامش  $[G(t)]$  در مقابل زمان است). بلافاصله پس از آزمون جاروب فرکانس که هیچ خسارتی در این مرحله به نمونه وارد نمی‌شود، آزمون جاروب دامنه انجام می‌گیرد. بارگذاری با ۱۰۰ چرخه بارگذاری سینوسی در کرنش ۱٪ آغاز می‌شود. سپس، در هر مرحله به ازای افزایش یک درصدی میزان کرنش اعمالی، ۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. مراحل بارگذاری بین ۱٪ الی ۳۰٪ کرنش برای ارزیابی مقدار خرابی پیشنهاد شده است. انجام هر دو آزمایش حدود ۱۰ دقیقه بعلاوه زمان آماده سازی دستگاه و نمونه طول می‌کشد. نتایج آزمون LAS با استفاده از روش خرابی تجمعی ویسکوالاستیک (VECD)، که به طور



شکل ۲. نتایج آزمایش LAS در دمای ۲۰ °C

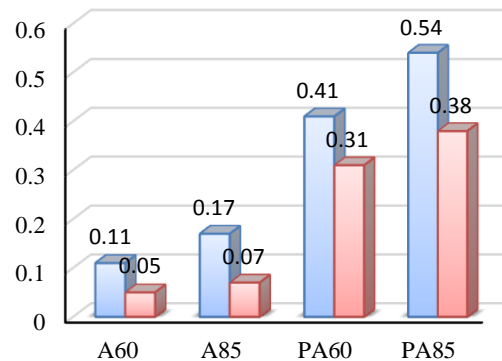


شکل ۳. نتایج آزمایش LAS در دمای ۳۰ °C

همان طور که مشاهده می‌شود، قیر ۱۰۰-۸۵ در دو حالت خالص و اصلاح شده نسبت به قیر ۷۰-۶۰ عمر خستگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش چشمگیر در عمر خستگی قیر می‌شود. مقایسه کمی مقادیر ثبت شده در آزمون نشان می‌دهد که پلیمر EVA در اصلاح رفتار خستگی قیر ۱۰۰-۸۵ عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در بررسی روند آزمایش و خروجی‌های دستگاه رنومتر برش دینامیک، مشاهده گردید که قیر خالص ۷۰-۶۰ در کرنش ۲۵٪ به زاویه فاز ۹۰ درجه (حالت ویسکوز) می‌رسد. این در حالی است که قیر ۷۰-۶۰ اصلاح شده در کرنش ۳۰٪ به زاویه فاز ۸۵ درجه می‌رسد. قیر خالص

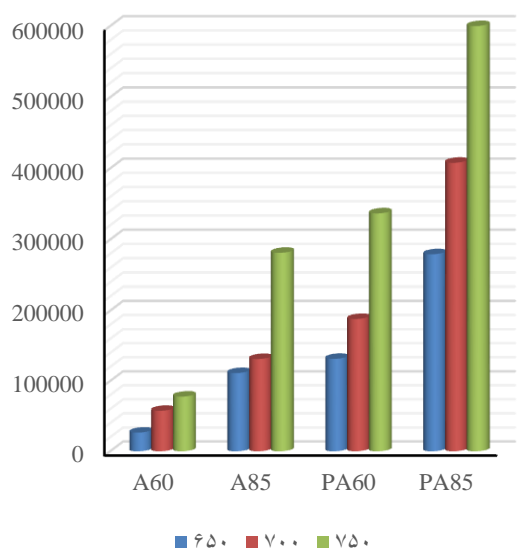
نمونه آزمایش شد که مقدار میانگین آن‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نتایج آزمایش بازیابی الاستیک قیر

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش خواص الاستیک و برگشت-پذیری قیر خواهد شد. علت این امر تشکیل یک شبکه پلیمری سه بعدی در قیر است که سبب بهبود چشمگیر خواص ویسکوالاستیک قیر می‌گردد. این عملکرد برای قیرهای پیر شده نیز مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج حالت پیر شده با پیر نشده نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده در طول مراحل ساخت و پخش و تراکم مخلوط‌های آسفالتی ویژگی‌های خود را حفظ می‌کنند، که در عمر نهایی روسازی آسفالتی مؤثر خواهد بود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب بهبود رفتار خستگی قیر و مخلوط‌های حاوی آن نسبت به نمونه‌های خالص می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که قیر ۱۰۰-۸۵ در هر دو حالت خالص و اصلاح شده، درصد بازیابی بیشتری نسبت به قیر ۷۰-۶۰ دارد.

آزمایش جاروب دامنه خطی روی نمونه‌های پیر شده در آزمون لعاب نازک چرخشی انجام شد. خروجی‌های آزمایش با استفاده از روش خرابی تجمعی ویسکوالاستیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است.



شکل ۴. نتایج آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای تیر خستگی

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تأثیر پلیمر EVA بر خصوصیات خستگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی حاوی آن پرداخته شده است. برای این منظور، از آزمایش‌های بازیابی الاستیک قیر، جاروب دامنه خطی قیر و آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای تیر خستگی استفاده شد. نتایج آزمایش بازیابی الاستیک نشان می‌دهد که اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش خواص الاستیک و برگشت-پذیری قیر خواهد شد. علت این امر تشکیل یک شبکه پلیمری سه بعدی در قیر است که سبب بهبود چشمگیر خواص ویسکوالاستیک قیر می‌گردد. مقایسه نتایج آزمایش بازیابی الاستیک در حالت پیر نشده با نمونه-های پیر شده در آزمایش RTFO نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده در طول مراحل ساخت و پخش و تراکم مخلوط‌های آسفالتی ویژگی‌های خود را حفظ می‌کنند و در عمر نهایی روسازی آسفالتی مؤثر خواهد بود. داده‌های خروجی آزمون جاروب دامنه خطی نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده در کرنش‌های بالاتر از

۱۰۰-۸۵ در کرنش ۳۰٪ به زاویه فاز ۷۵ درجه می‌رسد و این در حالی است که برای قیر ۱۰۰-۸۵ اصلاح شده زاویه فاز نهایی ۶۴ درجه می‌باشد. داده‌های خروجی آزمون جاروب دامنه خطی نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده در کرنش‌های بالاتر از خود مقاومت بهتری نشان می‌دهند و روند رشد خرابی در آن‌ها به مراتب کندتر می‌باشد.

مقایسه نتایج به دست آمده در دمای ۲۰ با نتایج آزمایش در دمای ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که قیرهای خالص و اصلاح شده در دمای ۳۰ درجه سلسیوس دارای عمر خستگی بیشتر بوده و مقاومت خستگی بهتری از خود نشان می‌دهند. با افزایش دما، قیر نرم‌تر شده و رفتار ویسکوالاستیک بهتری از خود نشان می‌دهد و روند بهبود ترک‌های مویی ایجاد شده در اثر بارگذاری با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد.

نمونه‌های بتن آسفالتی با استفاده از روش تراکم غلطشی در اندازه‌های استاندارد تهیه گردید. آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای تیر خستگی در حالت کنترل کرنش با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شد. حد شکست نمونه، رسیدن سختی نمونه به ۵۰٪ سختی اولیه نمونه در نظر گرفته شد و برای مخلوط‌های حاوی قیرهای مختلف سه نمونه در کرنش‌های ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ میکرو استرین مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش تیر خستگی در شکل ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت خستگی نمونه-ی حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ در دو حالت خالص و اصلاح شده بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر ۷۰-۶۰ می‌باشد. نمونه‌های حاوی قیرهای اصلاح شده عملکرد خستگی به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی قیرهای خالص مشابه دارند. مقایسه کمی مقادیر ثبت شده در آزمون نشان می‌دهد پلیمر EVA در اصلاح رفتار خستگی مخلوط‌های حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ عملکرد بهتری از خود نشان داده است. علت این امر می‌تواند عملکرد آزادانه‌تر پلیمر EVA در قیر ۱۰۰-۸۵ که نرم‌تر است، باشد.

نمونه‌های حاوی قیرهای اصلاح شده عملکرد خستگی به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی قیرهای خالص مشابه دارند. اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش روند بهبود ترک‌های مویی ایجاد شده در اثر بارگذاری افزایش خواص ویسکوالاستیک می‌شود و مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده نسبت به نمونه‌های خالص عمر خستگی بالاتری از خود نشان می‌دهند.

خود مقاومت بهتری نشان می‌دهند و روند رشد خرابی در آنها به مراتب کندتر می‌باشد. نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی نشان می‌دهد که قیر ۱۰۰-۸۵ در دو حالت خالص و اصلاح شده نسبت به قیر ۷۰-۶۰ عمر خستگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. اصلاح قیر با پلیمر EVA سبب افزایش چشمگیر در عمر خستگی قیر می‌شود. نتایج آزمون تیر خستگی نشان می‌دهد که



## ۶. مراجع

- Airey, G. D. 2002. "Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 16: 473-487.
- Ameri, M., Mansourian, A. and Sheikhmotevali, A. H. 2013. "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon performance related parameters". *Constr. Build. Mater.* 40: 438-447.
- Baghaee Moghaddam, T., Karim, M. R. and Abdelaziz, M. 2011. "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". *Sci. Res. Essays*, 6(4): 670-682.
- Harvey, J. and Tsai, B. W. 1997. "Long-term oven-aging effects on fatigue and initial stiffness of asphalt concrete". *Transportation Research Record: J. Transport. Res. Board* 1590: 89-98.
- Hintz, C. and Bahia, H. 2013. "Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter". *Transportation Research Record: J. Transport. Res. Board*, 2370: 10-16.
- Ibrahim, H., Wahhab, A. A. and Hasnain, J. 1998. "Laboratory study of asphalt concrete durability in Jeddah". *Build. Environ.*, 33(4): 219-230.
- Isacsson, U. L. F. and Lu, X. 1999. "Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers". *J. Mater. Sci.*, 34(15): 3737-3745.
- King, G., King, H., Pavlovich, R., Epps, A. L. and Kandhal, P. 1999. "Additives in asphalt". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.* 68: 32-69.
- Luo, W. Q. and Chen, J. C. 2010. "Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer". *Constr. Build. Mater.*, 25: 1830-1835.
- Sousa, J. B., Tayebali, A. A., Harvey, J. T., Hendricks, P. and Monismith, C. L. 1993. "Sensitivity of SHRP A-003A testing equipment to mix design parameters for permanent deformation and fatigue". Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Toraldo, E. and Mariani, E. 2014. "Effects of polymer additives on bituminous mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 65: 38-42.
- Wahhab, H. I. A. A. 2012. "Effect of modifiers and additives on fatigue behavior of asphalt concrete mixes in the Gulf". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 5(5): 326-332.
- Zhi, S., Gun, W. W., Hui, L. X. and Bo, T. 2012. "Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers". *Constr. Build. Mater.*, 27(1): 117-125.

