

## بررسی شیارشدگی و اثر خودترمیمی بر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده

### مقاله پژوهشی

منصور فخری، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران  
ابراهیم شاه ابراهیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران  
سید فرهاد چاوشیان نائینی\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Farhadchavoshian.23@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲

صفحه ۱۵۶-۱۴۳

### چکیده

امروزه گسترش به کارگیری قیرهای اصلاح شده در روسازی موجب شده است تا خواص مخلوط از جمله عملکرد خستگی بهبود یابد. در کنار اثر این افزودنی‌ها، پدیده‌ای به نام خودترمیمی آسفالت نیز منجر به افزایش عمر خستگی مخلوط می‌گردد. از آنجاکه تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی اثر خودترمیمی صورت نگرفته است، در طراحی‌ها معمولاً عمر خستگی کمتر از ظرفیت مخلوط در نظر گرفته می‌شود و این اقدام، علاوه بر اضافه شدن هزینه، عملکرد مخلوط در دمای بالا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک، استایرن بوتادین رابر، استایرن بوتادین استایرن و پلی‌اتیلن در دو دسته مقدار قیر و فضای خالی یکسان تهیه شده و تحت آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پلیمر الاستومر SBS با افزایش خاصیت الاستیکی قیر بیشترین قابلیت بازیابی (۸۵ درصد) را برای نمونه‌های آسفالتی فراهم آورده است. پس از آن پلیمر SBS با ایجاد ۶۰ درصد قابلیت بازیابی دارای بیشترین عمر خستگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خستگی، خودترمیمی، قیر اصلاح شده، مخلوط آسفالتی گرم

### ۱- مقدمه

منجر به پدید آمدن خرابی‌های متداول روسازی می‌گردند (Sarsam, 2015). بر این اساس، ضرورت انجام اقدامات پیشگیرانه برای افزایش عمر روسازی آسفالتی مشخص می‌گردد. با این حال ترک مخلوط آسفالتی می‌تواند بدون دخالت انسانی، خودبه‌خود ترمیم شود (Qiu, van de Ven and Molenaar, 2012; García et al., 2013). این پدیده خودترمیمی نام دارد که عوامل مؤثر بر آن در مطالعات پیشین نیز شناخته شده است. (Huang, Wang and Huang, 2013). خودترمیمی معمولاً در بازه‌های زمانی عدم عبور

آسفالت مخلوطی از قیر، سنگ‌دانه و فیلر بوده که از جمله معمول‌ترین روسازی مورد استفاده در جهان است. این نوع روسازی با عوامل متعددی همچون بارگذاری ترافیکی، شرایط آب و هوایی نامساعد و... دچار خرابی‌هایی می‌گردد که شروع عمده این خرابی‌ها با بروز ترک‌های ریزی به همراه است (Menozzi et al., 2015). ترک یک مد شکست مهم در آسفالت است. ترک‌های ریز<sup>۱</sup> در طی اعمال بارهای تکراری به آسفالت پدید می‌آید و به وسیله تنش‌های محیطی و ترافیکی رشد کرده و به ترک‌های بزرگ<sup>۲</sup> تبدیل می‌شوند و در نهایت

نمونه‌ها به مدت ۲۰ ثانیه تحت دماهای متفاوت حرارت دیده و پس از آن به مدت ۳ ساعت درون دمای اتاق نگهداری شدند. سپس با برقراری مجدد شرایط آزمایش خستگی، مقاومت آن‌ها به دست آمد. حداقل دمایی که در آن آسفالت شروع به فرآیند خودترمیمی نمود، دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. همچنین در تمامی نمونه‌ها حداقل به میزان ۳۱ درصد افزایش عمر خستگی پس از پدیده خودترمیمی مشاهده شد. افزایش دما تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند موجب افزایش سرعت خودترمیمی شود و با بیشتر شدن دما از این مقدار، روند خودترمیمی کندتر از قبل ادامه می‌یابد. از آنجاکه در آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم، در نمونه علاوه بر ایجاد ترک، تغییر شکل پایدار نیز ایجاد خواهد شد، در خودترمیمی فقط ترک‌ها بازیابی می‌گردند و نمونه به دلیل عدم بازسازی تغییر شکل دائم، به‌طور کامل ترمیم نمی‌گردد. (Menozzi et al., 2015). در پژوهشی دیگر، مخلوط‌های آسفالتی داغ با سه نوع سنگ‌دانه تهیه شده و پس از تعیین قیر بهینه، نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش خستگی کششی غیرمستقیم تهیه شدند. معیار توقف در این آزمایش، رسیدن سختی نمونه به یک‌چهارم سختی اولیه (سختی نمونه پس از ۲۰۰ سیکل بارگذاری اولیه) قرار گرفت. به‌منظور اعمال شرایط استراحت و ترمیم در نمونه، برای هر سه نوع سنگ‌دانه، پنج بازه زمانی ۱ و ۳ ساعت و ۷، ۱۴ و پنج نوع دمای صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد اعمال شد. سپس نمونه‌ها مجدداً تحت آزمایش خستگی قرار گرفته تا سختی نمونه‌ها به همان سختی انتهایی مرحله اول بارگذاری برسد. در نهایت محققین دریافتند که افزایش زمان و دما می‌تواند منجر به تسریع بازیابی آسفالت گردد، باین‌حال اثر زمان استراحت بیشتر از دما بوده و با افزایش زمان استراحت می‌توان به نمونه فرصت بیشتری داد تا قیر موجود در آن جاری شده و ترک‌ها را پر نماید (Abo-Quadais and Suleiman, 2005). پدیده خودترمیمی را می‌توان با استفاده از آزمایش مدول برجهنگی نیز بررسی نمود. در این حالت با افزایش سیکل بارگذاری، مدول برجهنگی کاهش می‌یابد و با ایجاد شرایط خودترمیمی آسفالت، مدول برجهنگی بازیابی می‌گردد (Roque et al., 2012). با این‌حال این تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد اثر خودترمیمی انجام نگرفته و این اقدام به معنای چشم‌پوشی بخشی از عمر خستگی است. لذا با طراحی دست بالا در

ترافیک و تحت شرایط دمای بالا (بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بسته به نوع قیر مورد استفاده) اتفاق می‌افتد. از این‌رو آسفالت یک ماده خودترمیم نام گرفته است (García, 2012). به‌طور طبیعی روند خودترمیمی به‌کندی صورت می‌گیرد و برای بهبود شرایط از روش‌هایی مختلفی همچون استفاده از کپسول‌های حاوی ماده افزونی و یا روش‌های القایی استفاده می‌گردد، که این روش نیازمند اضافه کردن تجهیزات رسانا همچون الیاف فولاد در فرایند اختلاط آسفالت است (García, Schlangen and Van de Ven, 2011). در پژوهشی الیاف‌های فولادی به آسفالت متخلخل اضافه شد و با القاء نمودن گرما، ظرفیت خودترمیمی مخلوط آسفالتی از طریق بازیابی در استحکام، سختی، عمر خستگی در نمونه‌های تیر و استوانه‌ای آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج مطلوبی حاصل شد (Liu, Schlangen and Van Bochove, 2013). پژوهشگران در تحقیقی دیگر از کپسول‌های کلسیم برای بهبود خودترمیمی آسفالت متخلخل استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این کپسول‌ها قابلیت زیادی در ترمیمی ترک‌های ریز داشته، به‌طوری‌که پس از چندین مرتبه سیکل خودترمیمی، نمونه مجدد خود را بازیابی می‌کند و مقداری زیادی از ترک‌های تحمیل شده را رفع می‌نماید (Xu et al., 2019). جمعی دیگر از محققین با استفاده از آسفالت ماکروپو در آسفالت حاوی الیاف فولادی نشان دادند که با افزایش میزان الیاف و زمان تابش اشعه به آسفالت، میزان خودترمیمی افزایش می‌یابد (Gao et al., 2019). خودترمیمی آسفالت بعد از هر مرحله بارگذاری در یک سیکل و یا در سیکل‌های استراحت نمونه ایجاد می‌گردد. در زمان فقدان بارگذاری، خاصیت ویسکوالاستیک طبیعی قیر منجر به قرارگیری مجدد تکه‌های آسفالت بر سر جای خود می‌گردد (Sarsam, 2015). در پژوهشی با هدف تعیین مدت‌زمان بازیابی خواص آسفالت، نمونه‌های آسفالتی تخریب‌شده تحت آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم<sup>۳</sup>، در مدت‌زمان‌های متفاوت تحت گرما قرار گرفتند. میزان بازیابی خودترمیمی با برقراری مقایسه بین تعداد سیکل خستگی قبل و بعد از ترمیم نمونه‌ها مشخص شد. نحوه ایجاد شرایط خودترمیمی نیز به این‌گونه بود که نمونه‌ها پس از طی تعداد سیکل‌های مشخص بارگذاری، به مدت یک ساعت و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد درون ظرف ماسه‌ای قرار گرفتند. سپس

موردبررسی و مقایسه قرار می‌گیرد تا در نهایت منبعی برای تحقیقات آتی و برنامه‌ریزی‌های مهندسی باشد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- قیر

به منظور تهیه نمونه‌های آسفالت مورد نیاز جهت آزمایش، از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ تولیدی پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران استفاده گشته است. مشخصات این قیر مطابق با جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده

مشخصات	مقدار	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۳	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۴	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۵۴	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۰۲	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۳۰۵	ASTM D-92

### ۲-۲- افزودنی‌ها

را منطف می‌نماید. لذا قیرهای اصلاح‌شده با این پلیمر با داشتن خاصیت برگشت‌پذیری بیشتر، در مقابل خرابی‌های خستگی و شیارشدگی مقاومت نموده و تغییر شکل‌های ماندگار کمتری را برای آسفالت پدید می‌آورند (Cahvoshian Naeni and Ameri, 2018). لاستیک طبیعی نیز به صورت ذاتی چسبنده بوده و با افزایش دما به سادگی تغییر شکل می‌دهد و در دمای پایین شکننده است. دلیل این ویژگی، حرکت مستقل زنجیره‌های طویل پلیمری است. زمانی که پودر لاستیک با سولفور قیر ترکیب می‌شود، پیوندهای عرضی بین زنجیره‌ها تشکیل می‌دهد که مانع از حرکت مستقل آن‌ها می‌گردد. لذا قیر اصلاح‌شده با این ماده خاصیت الاستیک پیدا می‌کند و در مقابل بارهای وارده برگشت‌پذیر می‌گردد و مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی و خستگی افزایش می‌یابد (California Department of Transportation, 2003). پلیمر پلی‌اتیلن نیز که از دسته پلاستومرها می‌باشد، در اختلاط با قیر موجب افزایش ویسکوزیته و سختی قیر می‌گردد. لذا انتظار می‌رود که به کارگیری این پلیمر در قیر بتواند مقاومت در برابر

عملکرد خستگی، از یک طرف هزینه و مصالح بیشتری استفاده می‌شود و از طرف دیگر عملکرد دمای پایین و متوسط (دمای معمول بروز ترک خستگی) کمتر از ظرفیت مخلوط پیش‌بینی شده و نتایج معکوسی بر عملکرد دمای بالای آسفالت خواهد داشت (Souliman, Mamlouk and Kaloush, 2014). لذا در به کارگیری آسفالت‌های اصلاح‌شده، در نظرگیری پدیده خودترمیمی امری ضروری است. در این پژوهش عملکرد خستگی و خودترمیمی ده نوع مخلوط آسفالتی دارای دو مشخصه مقدار قیر و فضای خالی برابر،

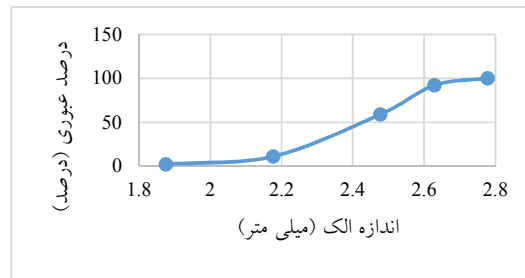
افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن<sup>۱</sup>، استایرن بوتادین رابر<sup>۲</sup>، پلی‌اتیلن<sup>۳</sup> و پودر لاستیک<sup>۴</sup> می‌باشند. پودر لاستیک به میزان ۲۰ درصد و سه پلیمر دیگر به میزان ۵ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس انتخاب این مقادیر از افزودنی بر پایه مطالعات پیشین است (Huang and Huang, 2016; Zhang, 2009; Cahvoshian Naeni and Ameri, 2018). پودر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش با اندازه مش ۴۰ بوده که دانه‌بندی آن مطابق با نمودار شکل ۱ می‌باشد. خصوصیات سایر افزودنی‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. در مورد تأثیر هر یک از افزودنی‌ها نیز باید گفت که مونومر بوتادین موجود در پلیمر استایرن بوتادین استایرن، با حل شدن در فاز مالتهی قیر موجب سازگاری این پلیمر با آسفالتن قیر شده و یک شبکه یکپارچه از زنجیره‌های پلیمری را در قیر اصلاح‌شده به وجود می‌آورد. این بهبود پیوستگی اجزاء قیر به مخلوط آسفالتی کمک می‌کند تا در مقابل بارهای وارده منسجم بماند. در پلیمر استایرن بوتادین رابر (نیز علاوه بر نقش مونومر بوتادین، لاستیک رابر نیز در الاستیسیته قیر شرکت می‌کند و قیر

۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به منظور گرم کردن اولیه قیر و پلیمر و اختلاط آن‌ها، تهیه شده‌اند.

### ۲-۳ مصالح سنگی

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع آهکی می‌باشند که مطابق با مشخصات دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران تهیه می‌گردند. مشخصات این سنگ‌دانه‌ها مطابق جدول ۳ می‌باشد. از آنجاکه فیلر آهکی با ایجاد خاصیت ماستیکی در آسفالت منجر به کاهش اثر قیرزدگی در مخلوط و به تبع افزایش مقاومت در مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد (Huang and Huang, 2016)، در این پژوهش نیز از فیلر آهکی استفاده شده است.

شیارافتادگی را بهبود بخشید (Awwad and Shbeeb, 2007; Wong, 2018). مطابق با تحقیقات صورت گرفته (Aboutalebi Esfahani and Rahimi, 2017)، به منظور ایجاد قیرهای اصلاح‌شده همگن، پودر لاستیک می‌بایست در حداقل دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و در مخلوط‌کن با سرعت دورانی بالا و به مدت حداقل ۶ دقیقه با قیر ترکیب گردد. بنابراین در این پژوهش به منظور تهیه قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک آسیاب شده، در ابتدا پودر لاستیک تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس با قیر در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه، در مخلوط‌کن با سرعت دورانی ۴۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. قیرهای حاوی پلیمر نیز مطابق با همین فرآیند، لیکن با دمای حرارتی



شکل ۱. دانه‌بندی پودر لاستیک

جدول ۲. خصوصیت افزودنی‌های مصرفی

CR		LDPE		SBS 501		SBR1502	
مقدار	خصوصیت	مقدار	خصوصیت	مقدار	خصوصیت	مقدار	خصوصیت
۸/۷	استون (درصد وزنی)	۷	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۳۱	مقدار استایرن (درصد وزنی)	۲۳/۵	مقدار استایرن (درصد وزنی)
۴۸/۷	لاستیک طبیعی و SBR (درصد وزنی)	۶	مقاومت خمشی (مگا پاسکال)	۱۱۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴/۷۵-۷	ارگانیک اسید (درصد وزنی)
۱۵/۳	سایر لاستیک‌ها (درصد وزنی)	۰/۹۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۵۵	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	۲۴/۵	مقاومت کششی (مگا پاسکال)
۳۲/۷	کربن (درصد وزنی)	۲/۴-۳/۱	نرخ انقباض (درصد)	۱۶۰۰	ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌پواز)	۳۵۰	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
		۸۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۰/۸۷	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۳۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)
		۱۱۰	نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۰۰ و -۶۷	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)	۰/۹۸۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد	مقدار مجاز برای رویه	مقدار	مشخصات
AASHTO T96	۳۰	۲۲/۳	حداکثر درصد سایش به روش لوس‌آنجلس

BS 812	۲۵	۱۶	حداکثر درصد ضریب تورق
ASTM D5821	۹۰	۹۳	حداقل درصد شکستگی در دو وجه
AASHTO T85	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب مصالح درشت‌دانه
AASHTO T84	۲/۵	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب مصالح ریزدانه
ASTM C127	-	۲/۵۹	وزن مخصوص درشت‌دانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
ASTM C128	-	۲/۳۲	وزن مخصوص ریزدانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

## ۲-۴ ساخت نمونه‌ها

قیر بهینه مخلوط‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1599 تعیین شده و از آنجاکه میزان فضای خالی آسفالت بر اساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران از ۳ تا ۵ درصد تغییر می‌کند، تمامی نمونه‌ها با مقدار قیر بهینه و درصد فضای خالی ۴ درصد تهیه گشته‌اند. در نظرگیری این دو حالت این امکان را فراهم می‌آورد تا اثر فضای خالی و مقدار قیر به صورت مجزا بر عملکرد خودترمیمی و عمر خستگی مورد مطالعه قرار داده شود.

بر طبق مطالعات پیشین (Huang and Huang, 2016; Baladi, 1989)، میزان چسباننده مخلوط (قیر) و فضای خالی آسفالت، تأثیر بسیار زیادی بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد داشت. لذا در این پژوهش دو حالت مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. تجربیات محققین بر پایه استفاده از قیر بین ۴ تا ۶ درصد می‌باشد، لذا در حالت اول میزان قیر تمامی پنج نوع مخلوط آسفالتی برابر ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود و تیرهای آسفالتی تهیه می‌گردند. در حالت دوم میزان



شکل ۲. نمونه دال‌های آسفالتی

## ۲-۵- آزمایش‌ها

آسفالت، از جمله پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر خرابی تغییر شکل دائم (شیارشدگی) است (Huang and Huang, 2016).

مقدار قیر و فضای خالی از جمله مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است (Gul et al., 2018; Salih et al., 2018). از میان این دو پارامتر، مقدار فضای خالی به سبب ایجاد پتانسیل فرورفتگی در

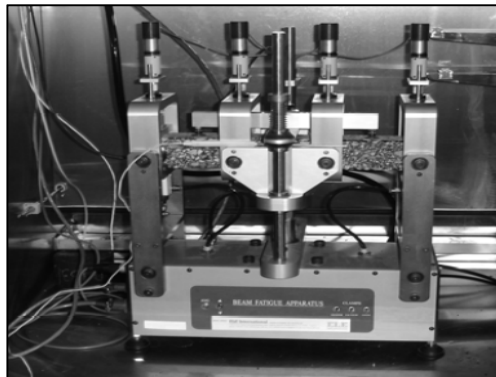
۱-۵-۲- تجهیزات و پارامترهای آزمایش خستگی

آزمایش تیر خستگی چهار نقطه<sup>۱</sup>، مشهورترین روش در تعیین عمر خستگی است (AASHTO T321-07, 2007). اندازه نمونه‌های تیر شکل با ابعاد ۳۸۵×۶۵×۵۰ میلی‌متر تحت

بارگذاری با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز در سطح کرنش ۹۰۰ میکرو استرین قرار گرفته‌اند. پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دمایی دستگاه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند.



شکل ۳. نمونه تیرهای آسفالتی برش خورده



شکل ۴. نمونه تحت بارگذاری در دستگاه Beam Fatigue

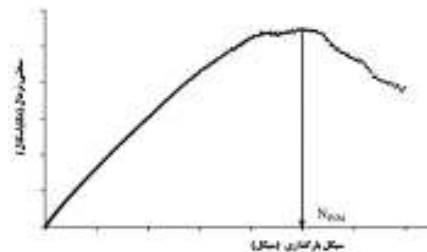
(Bouldin, 2000) و توسط ASTM مورد تصویب قرار گرفت (ASTM D 7460). در این روش حداکثر مقدار عمر خستگی برابر تعداد سیکل بارگذاری در بیشترین مقدار به‌دست‌آمده از نمودار سختی نرمال در برابر تعداد سیکل تعریف می‌شود (شکل ۵). مقدار  $NM^9$  مطابق با رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$NM = \frac{S_i * N_i}{S_0 * N_0} \quad (1)$$

که در آن  $NM$  سختی نرمال،  $N_i$  و  $S_i$  به ترتیب سیکل بارگذاری و سختی در سیکل  $i$  ام و  $N_0$  و  $S_0$  به ترتیب سیکل بارگذاری و سختی در سیکل ۵۰ ام می‌باشد ( $N_0=50$ ). سختی نرمال زمانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد که مصالح به شکست خستگی نزدیک شده‌اند، لیکن در معیار دستیابی به ۵۰ درصد سختی اولیه (سختی در سیکل ۵۰ ام) نمونه به مرحله

معمولاً بر اساس استاندارد AASHTO T321-07، مقدار عمر خستگی معادل تعداد سیکل‌های لازم برای دستیابی به ۵۰ درصد سختی اولیه در نظر گرفته می‌شود و این امر می‌طلبد تا مقادیر کرنش پایین‌تری (۲۰۰ تا ۵۰۰ میکرو استرین) در نظر گرفته شود تا نتایج با دقت بیشتری حاصل گردد (Huang and Huang, 2016; Dehghan and Modares, 2018). اما در این پژوهش برای تعیین عمر خستگی از معیار سختی نرمال استفاده می‌گردد. این روش به دلیل عدم نیاز به کرنش‌های پایین، سریع‌تر بوده و در زمان صرفه‌جویی خواهد شد و از آنجاکه در این معیار، نمونه تا نزدیک شکست پیش می‌رود، استفاده از آن در تعیین عمر خستگی آسفالت‌های دارای افزودنی، مطلوب‌تر است (Huang and Huang, 2016; Huang, 2013). این معیار برای اولین بار در دومین کنگره آسفالت و قیر در اروپا معرفی شد (Rowe and

بارگذاری روند پایداری نداریم، سیستم سختی بالایی با دقت پایین ارزیابی می‌دهد. لذا در نظر گرفتن سختی اولیه (سختی سیکل ۱۵۰ام) به عنوان معیاری در تعیین عمر خستگی، عملاً از دقت کافی برخوردار نیست. این حساسیت در آسفالت‌های اصلاح شده که الاستیک تر عمل می‌کنند بیشتر است، زیرا زمانی که نمونه آسفالتی به نیمی از سختی اولیه می‌رسد، آسفالت هنوز دچار شکست خستگی نشده است (Kim, Little and Lytton, 2003).



شکل ۵. نمودار سختی نرمال- سیکل بارگذاری (Rowe and Boulidin, 2000)

زیرلایه آسفالتی شروع شده و با عبور مکرر بارهای ترافیکی به لایه‌های سطحی نفوذ می‌کند، برای ایجاد شرایط واقعی، نمونه‌های تیر آسفالتی پس از اولین دوره اعمال آزمایش خستگی، درون قالب فلزی که نقش حفاظ جانبی را دارد، قرار داده شده است. بر طبق مطالعات انجام شده (Huang and Huang, 2016) برای ایجاد شرایط کامل خودترمیمی لایه آسفالت زیرین که تحت کرنش کششی قرار می‌گیرد، سطح نمونه می‌بایست تحت بار استاتیکی با فشار ۵ کیلو پاسکال قرار داده شود. لذا در این پژوهش، بار ۱۲/۵۱ کیلوگرم به وسیله یک صفحه صلب بر روی نمونه قرار گرفته تا تنش مذکور فراهم گردد. سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و به منظور بارگذاری مجدد، به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط عمل‌آوری گشته است. این فرآیند تا زمانی که نمونه‌ها دچار شکست نشوند، ادامه می‌یابد. در این پژوهش نمونه‌های آسفالتی در دومین مرحله آزمایش دچار شکست شده و به مرحله سوم نرسیدند. در شکل ۶ نمودار سختی در برابر زمان به ازای تعداد دفعات انجام آزمایش خستگی برای یک نمونه نشان داده شده است. برای تعیین شاخص خودترمیمی، سختی معادل ۵۰ درصد سختی اولیه تعیین می‌گردد. سپس نرخ خرابی یا شیب نمودار سختی-سیکل بارگذاری مطابق با رابطه ۲ به دست می‌آید.

شکست نمی‌رسد و عملاً معیار ۵۰ درصد سختی، مقدار عمر خستگی بیشتری را نشان می‌دهد. در پژوهش‌های پیشین استفاده از معیار نرمال را برای آسفالت اصلاح شده مناسب‌تر دانسته‌اند (Huang and Huang, 2016; Huang, 2013). بنابراین در این تحقیق، رسیدن به ۵۰ درصد سختی اولیه ملاک نبوده و از سختی نرمال جهت یافتن عمر خستگی استفاده می‌گردد. از طرفی در آزمایش خستگی از سیستم هوای فشرده برای اعمال بار استفاده می‌شود و از آنجاکه در شروع

#### ۲-۵-۲- خودترمیمی و شرایط آن

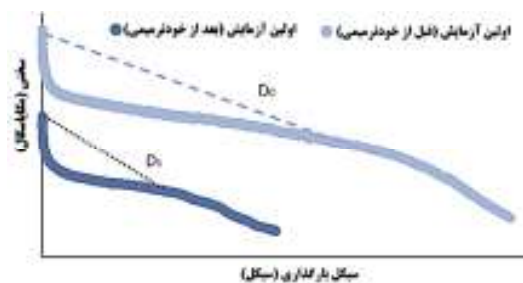
خاصیت ویسکوالاستیک آسفالت موجب می‌شود تا خودترمیمی به‌طور پیوسته و در دو مرحله اولیه و ثانویه اتفاق بیفتد. خودترمیمی اولیه ۱۰ به محض باربرداری شروع می‌شود و اگر روند عدم بارگذاری ادامه یابد، نمونه وارد مرحله خودترمیمی ثانویه ۱۱ می‌گردد. خودترمیمی اولیه به‌طور خودکار در تمامی سیکل‌های آزمایش خستگی اتفاق می‌افتد و به‌صورت مجزا و با کیفیتی مطلوب قابل محاسبه نخواهد بود. لیکن با اعمال شرایط آزمایشگاهی، خودترمیمی ثانویه قابل اندازه‌گیری است (Huang and Huang, 2016). از آنجاکه معیارهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سختی اولیه در توقف آزمایش خستگی، نمی‌تواند همچون معیار سختی نرمال موجب افزایش عمر خستگی تا مرز شکست گردد، استفاده از معیار توقف بالاتر (سختی نرمال) موجب بهتر نشان داده شدن اثر بازیابی نمونه است، چراکه در این معیار نمونه در ۱۰ تا ۲۰ درصد سختی اولیه متوقف می‌گردد (Huang, Wang and HUANG, 2013). بر طبق مطالعات پیشین (Wang and HUANG, 2013) خودترمیمی به‌طور مستقیم با بازه زمانی استراحت نمونه و به‌طور غیرمستقیم با مقدار کرنش وارده، میزان هوای مخلوط و خرابی ایجادشده، ارتباط دارد. از آنجاکه خرابی خستگی با ایجاد ترک‌های کششی در

خرابی دو آزمایش خستگی بر روی یک نمونه، قبل و بعد از فرآیند خودترمیمی است که مطابق با رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$HI = \frac{D_0}{D_1} * 100\% \quad (3)$$

$$D = \frac{S_0 - S_t}{C} \quad (2)$$

که در آن  $D$  میانگین نرخ خرابی از ابتدا تا ۵۰ درصد سختی اولیه،  $S_0$  سختی اولیه،  $S_t$  سختی معادل ۵۰ درصد سختی اولیه و  $C$  تعداد سیکل رسیدن از سختی اولیه تا ۵۰ درصد سختی می‌باشد. نهایتاً شاخص خودترمیمی<sup>۱۲</sup> برابر نسبت میانگین نرخ



شکل ۶. نمودار سختی-سیکل بارگذاری قبل و بعد از خودترمیمی

ویژگی چسباننده آسفالت (قیر) نقش مهمی در عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند. در بین مصالح آسفالت، مقدار قیر تعیین‌کننده کلیدی در ارزیابی مخلوط آسفالتی است. لذا مقایسه عملکرد مخلوط‌ها در یک مقدار مشخص از قیر کمک می‌کند تا مزایا و معایب انواع مخلوط‌ها به‌طور شفاف بررسی گردد (Zukang, 2003). با توجه به تغییرات مقدار قیر در مخلوط‌های آسفالتی مابین ۴ تا ۶ درصد، در این بخش مقدار قیر مخلوط‌های آسفالتی به‌طور کاملاً یکسانی برابر ۵ درصد تعیین شده است تا میزان تأثیر مقدار قیر در نتایج، تا حد ممکن کاهش یابد. نتایج آزمایش خستگی بر روی نمونه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار عمر خستگی بر اساس دو معیار سختی نرمال و سختی ۵۰ درصد تعیین شده که از سختی ۵۰ درصد برای تعیین شاخص خودترمیمی و میزان بهبود و از سختی نرمال نیز برای تعیین میزان دقیق‌تری از عمر خستگی بکار گرفته شده است. عمر خستگی کل برابر مجموع عمر خستگی قبل و بعد از فرآیند ترمیم و بر اساس شاخص سختی نرمال است. همچنان که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار عمر خستگی حاصل از معیار سختی نرمال بیشتر از عمر حاصل از ۵۰ درصد سختی اولیه است. این امر به دلیل اعطای فرصت به نمونه تا رسیدن به سختی معادل ۱۰ تا ۲۰ درصد سختی اولیه در معیار سختی نرمال است. در شکل ۷ مقدار عمر خستگی اولیه و کل نمونه‌های آسفالتی قابل مشاهده است. با مقایسه مخلوط‌های

### ۲-۵-۳- آزمایش شیارشدگی

آزمایش شیار شدگی بر روی نمونه‌های دارای درصد فضای خالی مشابه صورت پذیرفت. در این آزمایش چرخ مدور لاستیکی به قطر ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر با سرعت ثابت ۴۲ سیکل در دقیقه از روی دال‌های آسفالتی عبور داده می‌شود و فشاری برابر ۰/۷ مگا پاسکال را به سطح نمونه‌ها وارد می‌نماید. این نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند. پس از گذشت ۴۵ دقیقه عبور چرخ بر روی نمونه‌ها، میزان تغییر شکل در دقیقه تقریباً ثابت است (Huang and Huang, 2016). در این حالت مقدار پایداری دینامیکی<sup>۱۳</sup> در بازه ۴۵ تا ۶۰ دقیقه پایانی مطابق با رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) * 42}{d_2 - d_1} \quad (4)$$

که در آن  $DS$  پایداری دینامیکی برحسب سیکل بر دقیقه،  $t_2$  و  $t_1$  به ترتیب زمان پایان (۶۰ دقیقه) و زمان شروع (۴۵ دقیقه)، ۴۲ سرعت چرخ‌ها و  $d_1$  و  $d_2$  میزان تغییر شکل در بازه زمانی ۶۰ و ۴۵ دقیقه می‌باشد. از این شاخص برای ارزیابی شیار شدگی مخلوط استفاده می‌شود.

### ۳- نتایج و تفسیر داده‌ها

#### ۳-۱- عملکرد خستگی در مقدار قیر ثابت



ترتیب PE و CR، SBR، موجب افزایش بیشتری در عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد گشته‌اند.

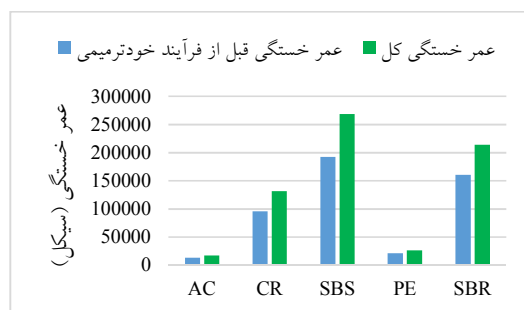
آسفالتی می‌توان گفت که پلیمر SBS بیشترین مقدار عمر خستگی را برای مخلوط فراهم کرده است و به دنبال آن به

جدول ۴. نتایج آزمایش تیر خستگی چهار نقطه‌ای نمونه‌های آسفالتی حاوی ۵ درصد قیر

نام مخلوط	فضای خالی مخلوط (درصد)	سختی اولیه (مگا پاسکال)	سختی اولیه (مگا پاسکال)	دومین آزمایش خستگی	سختی اولیه (مگا پاسکال)	عمر خستگی اولین آزمایش (معیار ۵۰ درصد سختی)	عمر خستگی اولین آزمایش (معیار سختی نرمال)	شیب نمودار سختی اولین آزمایش (D0)	عمر خستگی دومین آزمایش (معیار سختی نرمال)	عمر خستگی دومین آزمایش (معیار ۵۰ درصد سختی)	شیب نمودار سختی دومین آزمایش (D1)	شیب نمودار سختی دومین آزمایش (درصد)	شاخص خودترمیمی (HI)	عمر خستگی کل
AC	۳/۸	۳۲۷۳	۱۳۰۵	۱۳۱۴۵	۱۳۱۴۵	۶۳۲۰	۰/۲۵۸۹	۴۲۴۵	۹۹۵	۰/۶۵۵۴	۳۹/۵۲	۱۷۳۹۰		
CR	۴/۸	۳۲۹۶	۵۷۶	۹۶۱۴۰	۲۶۹۵۰	۹۶۱۴۰	۰/۰۶۱۴	۳۵۶۳۰	۲۵۹۰	۰/۱۴۰۶	۴۳/۶۶۸	۱۳۱۷۰		
SBS	۳/۷	۵۲۳۲	۲۲۰۰	۱۹۲۵۴۵	۱۹۵۹۵۰	۱۹۲۵۴۵	۰/۱۳۳۷	۷۶۲۷۵	۵۲۹۵	۰/۲۰۸۹	۶۴/۰۲۴	۲۶۸۸۲۰		
PE	۴/۶	۲۱۲۹	۱۴۹۰	۲۱۶۳۵	۹۲۲۵	۲۱۶۳۵	۰/۴۴۳۲	۵۱۰۰	۷۳۵	۱/۰۲۶۲	۴۲/۹۸۵	۲۶۷۳۵		
SBR	۴/۹	۴۵۴۹	۱۶۲۷	۱۶۰۸۷۵	۲۷۰۵۰	۱۶۰۸۷۵	۰/۰۸۴۲	۵۳۰۶۰	۷۶۴۵	۰/۱۰۶۴	۷۹/۲۰۸	۲۱۳۹۳۵		

خودترمیمی را دارا هستند. علت افزایش پتانسیل خودترمیمی در نمونه‌های حاوی SBR، وجود مونومر بوتادین در این پلیمر بوده که در کنار لاستیک رابر با شرکت در الاستیسیته، قیر را منعطف‌تر می‌نماید. پلیمر SBS نیز به دلیل آنکه بوتادین موجود در این پلیمر می‌تواند با نفوذ در قیر موجب تشکیل یک شبکه یکپارچه در قیر اصلاح‌شده گردد، خاصیت خودترمیمی مطلوبی را فراهم ساخته است (Cahvoshian Naeni and Ameri, 2018). در مقایسه بین پلیمر SBR و SBS نیز می‌توان گفت که با وجود افزایش پتانسیل خودترمیمی در نمونه‌های حاوی SBR، لیکن در حالت کلی SBS توانسته است، بیشترین مقدار عمر خستگی را در کل فراهم آورد.

در بررسی شیب نمودار سختی می‌توان گفت که هرچه مقدار این شیب کمتر باشد، نمونه تعداد سیکل بیشتری را طی نموده تا ۵۰ درصد از سختی اولیه خود را از دست بدهد. شاخص خودترمیمی که از نسبت شیب‌های قبل و بعد از آزمایش به دست می‌آید، به خوبی می‌تواند بیانگر اثر افزودنی‌ها در افزایش عمر خستگی باشد. هرچه میزان شاخص خودترمیمی افزایش یابد، نمونه قابلیت بیشتری برای بازیابی خویش خواهد داشت. در شکل ۸ مقدار این شاخص برای تمامی نمونه‌های آسفالتی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، SBR دارای بیشترین مقدار شاخص یا به عبارتی بیشترین قابلیت خودترمیمی را برای نمونه آسفالتی فراهم ساخته است. بعدازآن به ترتیب نمونه‌های حاوی CR، SBS و PE بیشترین قابلیت



شکل ۷. عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۵ درصد قیر



شکل ۸. شاخص خودترمیمی نمونه‌های حاوی ۵ درصد قیر

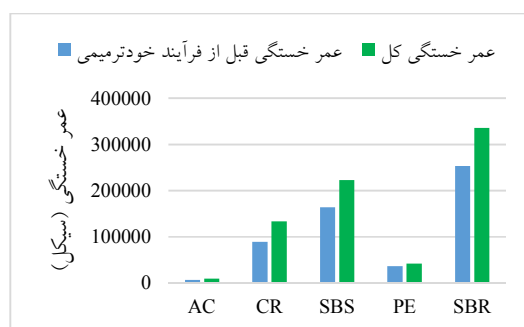
### ۲-۳- عملکرد خستگی در مقدار فضای خالی ثابت

در جدول ۵ آورده شده است و همچنین مقادیر عمر خستگی قبل و بعد از انجام فرآیند خودترمیمی و شاخص مربوطه برای مقادیر عمر خستگی و شاخص خودترمیمی است. پلیمر PE با وجود آنکه عمر خستگی پایین‌تری نسبت به پلیمر SBS خستگی مخلوط‌های آسفالتی، میزان هوای مخلوط نیز مدنظر قرار گیرد، می‌توان عملکرد شیار شدگی مخلوط را نیز تحت اثر قرار داد. از این رو بر روی نمونه‌های دارای درصد فضای خالی یکسان، آزمایش شیار شدگی نیز انجام پذیرفت.

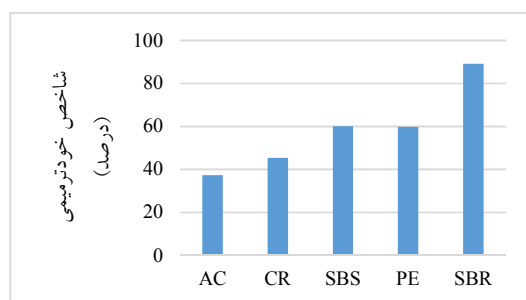
در این بخش نتایج برگرفته از آزمایش بر روی نمونه‌های دارای مقدار قیر بهینه و فضای خالی مشابه می‌باشد. این نتایج هر یک از نمونه‌ها در اشکال ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است. در شرایط کنترل شده فضای خالی مخلوط، SBR دارای بالاترین برای مخلوط ایجاد کرده است، لیکن میزان اثر بازیابی این دو پلیمر در آسفالت یکسان می‌باشد. طراحی مخلوط با در نظر گرفتن میزان فضای خالی روشی است که در آن عملکرد دمای بالا نیز در نظر گرفته می‌شود (JTG, 2011). لذا اگر در کنترل

جدول ۵. نتایج آزمایش تیر خستگی چهار نقطه‌ای نمونه‌های آسفالتی دارای ۴ درصد فضای خالی

نام مخلوط	مقدار قیر بهینه (درصد)	اولین آزمایش خستگی (مگا پاسکال)	دومین آزمایش خستگی (مگا پاسکال)	عمر خستگی اولیه (معمار ۵۰ درصد سختی)	عمر خستگی دومین آزمایش (معمار ۵۰ درصد سختی)	شیب نمودار سختی اولیه (DI)	شیب نمودار سختی دومین آزمایش (DI)	شاخص خودترمیمی (HI) (درصد)	عمر خستگی کل
AC	۴/۸	۴۳۶۵	۱۵۰۰	۳۰۲۵	۲۱۱۰	۰/۷۳۲۷	۱/۹۶۳۸	۳۷/۳۱	۸۹۱۰
CR	۵/۶	۳۷۳۳	۸۶۲	۱۶۱۴۵	۴۳۷۸۰	۰/۱۱۵۶	۰/۲۵۴۵	۴۵/۴۳	۱۳۳۴۴۰
SBS	۵/۲	۴۹۲۴	۲۵۲۹	۲۲۵۶۰	۵۸۶۴۵	۰/۱۰۹۴	۰/۱۸۲۰	۶۰/۰۹	۲۲۳۱۴۵
PE	۵/۱	۵۷۷۸	۱۶۶۵	۶۵۰۵	۵۴۷۰	۰/۴۴۸۷	۰/۷۵۰۴	۵۹/۸۰	۴۱۸۴۰
SBR	۵/۴	۳۷۹۹	۱۸۷۱	۷۰۳۴۰	۸۲۰۷۰	۰/۰۲۷	۰/۰۳۰۳	۸۹/۱۱	۳۳۵۶۱۰



شکل ۹. عمر خستگی نمونه‌های دارای میزان هوای یکسان



شکل ۱۰. شاخص خودترمیمی نمونه‌های دارای میزان هوای یکسان

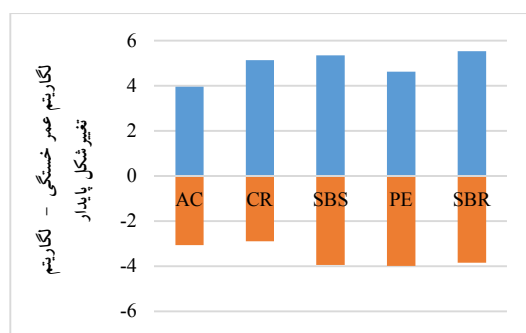
### ۳-۳ عملکرد شیار شدگی در مقدار فضای خالی مشخص

مقابل یکدیگر می‌باشد. در نمودار شکل ۱۱ عملکرد خستگی در مقادیر مثبت لگاریتمی و عملکرد شیار شدگی در مقادیر منفی لگاریتمی نشان داده شده است. مجموع قدر مطلق مقادیر عملکردی خستگی و شیار شدگی دامنه عملکرد آن مخلوط را نشان می‌دهد. مخلوط‌های حاوی SBR و SBS دارای بزرگ‌ترین دامنه عملکردی می‌باشند. پس‌از آن نیز PE و CR توانسته‌اند دامنه عملکردی بیشتری نسبت به نمونه شاهد فراهم آورند. لذا با به‌کارگیری پلیمرهای SBR و SBS در آسفالت می‌توان در هر دو موضع شیار شدگی و خستگی عملکرد مطلوبی را انتظار داشت.

در طراحی مخلوط، در نظر گرفتن مقدار فضای خالی یک روش برای کنترل عملکرد شیار شدگی است. در این پژوهش آزمایش شیار شدگی با چرخ دوار انجام شده و نهایتاً پارامتر پایداری دینامیکی محاسبه شده و در جدول ۶ به همراه میزان نفوذ چرخ در آسفالت آورده شده است. پلی‌اتیلن که نوعی پلیمر پلاستیکی است، توانسته است با افزایش سختی مخلوط مقاومت شیار شدگی بیشتری را در بین نمونه‌های آسفالتی ایجاد نماید. پس‌از آن SBS و SBR مقاومت شیار شدگی قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد پدید آوردند. لیکن پودر لاستیک موجب کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پایدار گشته است. در طراحی‌ها، عملکرد خستگی و شیار شدگی

جدول ۶. نتایج آزمایش شیار شدگی

نام مخلوط	مقدار قیر بهینه (درصد)	تغییر شکل پایدار (میلی‌متر)	پایداری دینامیکی (سیکل بر میلی‌متر)
AC	۴/۸	۴/۵۸	۱۱۸۳
CR	۵/۶	۷	۷۸۴
SBS	۵/۲	۲/۹۸	۸۹۵۶
PE	۵/۱	۲/۸۶	۹۷۰۹
SBR	۵/۴	۳/۱	۶۹۸۳



شکل ۱۱. عملکرد خستگی و شیار شدگی با مقیاس لگاریتمی

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد خستگی نمونه‌های آسفالتی با در نظرگیری پدیده خودترمیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه اصلاح شده با پلیمرهای SBR، SBS، PE و CR در دو دسته مقدار فضای خالی و مقدار قیر یکسان تهیه شدند که نتایج تحقیق به شرح بندهای زیر است:

- دو پلیمر SBS و SBR به سبب امتزاج مناسبی که با قیر دارند، بیشترین مقدار عمر خستگی را برای مخلوط‌های آسفالتی پدید آورده‌اند.

- پلیمر الاستومر SBR با اعطای خاصیت الاستیک به قیر، مخلوط را انعطاف‌پذیر نموده و بیشترین قابلیت خودترمیمی را برای مخلوط فراهم نموده است. پس از آن به ترتیب پلیمر SBS، PE و CR دارای بهترین عملکرد در ایجاد خاصیت بازیابی تغییر شکل دارند.

- کنترل مقدار فضای خالی تأثیر زیادی بر عملکرد دمای بالای مخلوط‌های آسفالتی خواهد داشت. پودر لاستیک موجب کاهش مقاومت شیار شدگی و سه پلیمر دیگر موجب افزایش این مقاومت شدند. در این حالت شاخص پایداری نمونه‌های حاوی SBR، SBS و PE بین ۶ تا ۸ برابر نمونه‌های فاقد افزودنی محاسبه گردید که این امر نشان از تأثیر قابل توجه این مواد بر عملکرد شیار شدگی است.

- با در نظرگیری دامنه عملکردی تمامی نمونه‌ها در دو بخش متقابل شیار شدگی (عملکرد دمای بالا) و خستگی (عملکرد دمای پایین و متوسط) می‌توان گفت با کنترل درصد فضای خالی و در نظرگیری خاصیت خودترمیمی در خستگی، می‌توان از افزودنی‌های پلیمری نظیر SBR و SBS استفاده نمود تا مخلوط اصلاح شده در هر دو جبهه دارای عملکرد مطلوبی باشد.

خودترمیمی پدیده‌ای است که موجب افزایش عمر خستگی آسفالت می‌گردد و می‌توان به وسیله آن ظرفیت واقعی عملکرد در دمای پایین و متوسط را مدنظر قرار داده و به تبع، عملکرد مطلوبی را نیز دمای بالا انتظار داشت. به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی می‌توان پدیده خودترمیمی را در مخلوط‌های حاوی افزودنی‌های جوان ساز قیر و یا الیاف‌های جاذب حرارت و کمک به این پدیده نظیر الیاف فولادی مورد بررسی قرار داد. بررسی این پدیده بر روی سایر انواع آسفالت نیز می‌تواند به عنوان موضوع پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد.

#### ۵- پی نوشت‌ها

1. Micro-Cracks
2. Macro-Cracks
3. Indirect Tensile Fatigue Test
4. Styrene Butadiene Styrene (SBS)
5. Styrene Butadiene Rubber (SBR)
6. Low-density Polyethylene (LDPE)
7. Powder Rubber
8. Four-point Beam

9. Normalized Stiffness
10. Instant Healing
11. Late Healing
12. Healing Index
13. Dynamic Stability

#### ۶- مراجع

-چاوشیان نائینی، س. ف. و عامری، م.، (۱۳۹۶)، "بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR\PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، ۹، ص. ۱۰۵-۱۱۹.

-دهقان، ز. و مدرس، ا.، (۱۳۹۷)، "پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت حاوی الیاف پلی اتیلن بازیافتی بر اساس پارامترهای انرژی تلف شده در دما و فرکانس متغیر"، پژوهشنامه حمل و نقل، (۳)، ۱۵، ص. ۹۳-۱۱۰.

-ابوطالبی اصفهانی، م.، رحیمی، ا.، (۱۳۹۶)، "تأثیر پودر لاستیک و ساسوبیت بر پارامترهای مقاومتی آسفالت گرم"، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، (۳)، ۲، ص. ۴۰-۱۹.

-AASHTO T321-07, (2007), "Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subject to Repeated Flexural Bending, in Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing", Part II, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

-Abo-Qudais, S., & Suleiman, A., (2005), "Monitoring fatigue damage and crack healing by ultrasound wave velocity", Nondestructive Testing and Evaluation, 20(2), pp.125-145.

-ASTM D 7460, (2010), "Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending".

-Awwad, M. T., & Shbeeb, L., (2007), "The use of polyethylene in hot asphalt mixtures, American Journal of Applied Sciences", 4(6), pp.390-396.

-Baladi, G., (1989), "Fatigue life and permanent deformation characteristics of asphalt concrete mixes". Transportation Research Record, 1227, pp.75-86.

-California Department of Transportation. (2003), "Asphalt rubber usage guide", Office of Flexible Pavement.

- Menozi, A. Garcia, A., Part I, M. N., Tebaldi, G., & Schuetz, P., (2015), "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples". *Construction and Building Materials*, 74, pp.162-168.
- Qiu, J. van de Ven, M. & Molenaar, A., (2012), "Crack-healing investigation in bituminous materials". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), pp.864-870.
- Roque, R., Simms, R., Chen, Y., Koh, C., & Lopp, G., (2012), "Development of a test method that will allow evaluation and quantification of the effects of healing on asphalt mixture (No. UF Project No. 00084223)". Florida Department of Transportation.
- Rowe, G. M., & Bouldin, M. G., (2000), "Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures". In 2nd Eur asphalt & Eurobitume Congress Barcelona, Vol. 2000.
- Salih, S., Gómez-Meijide, B., Aboufoul, M., & Garcia, A., (2018), "Effect of porosity on infrared healing of fatigue damage in asphalt". *Construction and Building Materials*, 167, pp.716-725.
- Sarsam, S. I., (2015), "Crack healing potential of asphalt concrete pavement. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*", 3(1), pp.001-012.
- Souliman, M. I. Mamlouk, M. & Kaloush, K. E., (2014), "Preliminary prediction of endurance limit for asphalt rubber mixtures due to healing". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(11), pp.964-969.
- Wong, S. F., (2018), "Use of Recycled Polymers in Asphalt Concrete for Infrastructural Applications", In *International Congress on Polymers in Concrete*, pp. 437-442.
- Xu, S. Liu, X., Tabaković, A., & Schlangen, E., (2019), "Investigation of the Potential Use of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing in Porous Asphalt Concrete". *Materials*, pp.168.
- Zhang, B. Xi, M. Zhang, D. Zhang, H. & Zhang, B. (2009), "The effect of styrene-butadiene-rubber/montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt. *Construction and Building Materials*", 23(10), pp.3112-3117.
- Zukang, Y. A. O., (2003), "A review on design criteria of asphalt pavements", *Highway*, 2, pp.43-49.
- Gao, J., Guo, H., Wang, X., Wang, P., Wei, Y., Wang, Z. & Yang, B., (2019), "Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers", *Journal of Cleaner Production*, 206, pp.1110-1122.
- García, Á., (2012), "Self-healing of open cracks in asphalt mastic", *Fuel*, 93, pp.264-272.
- García, A., Bueno, M. Norambuena-Contreras, J., & Part I, M. N., (2013), "Induction healing of dense asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, 49, pp.1-7.
- García, Á., Schlangen, E., & Van de Ven, M., (2011), "Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete". *Fuel*, 90(2), pp.583-591.
- Gul, M. A., Irfan, M., Ahmed, S., Ali, Y., & Khanzada, S. (2018), "Modeling and characterizing the fatigue behavior of asphaltic concrete mixtures". *Construction and Building Materials*, 184, pp.723-732.
- Huang, M., (2013), "Evaluation and comparison of fatigue performance of asphalt mixture considering 42 multiple factors". A Doctoral dissertation of Tongji University.
- Huang, M. & Huang, W., (2016), "Laboratory investigation on fatigue performance of modified asphalt concretes considering healing". *Construction and Building Materials*, pp.68-76.
- Huang, M. Wang, X. & HUANG, W. D., (2013), "Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture". *China Journal of Highway and Transport*, 26(4), pp.16-22.
- Huang, M. Wang, X. & HUANG, W. D., (2013), "Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture". *China Journal of Highway and Transport*, 26(4), pp.16-22.
- JTG, E., (2011), "Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering. People's communication press, Beijing.
- Kim, Y. R., Little, D. N., & Lytton, R. L., (2003), "Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), pp.75-83.
- Liu, Q. Schlangen, H. E. J. G., & Van Bochove, G., (2013), "The first engineered self-healing asphalt road: How is it performing?"

## **Study Rutting and Effect of Self-healing on Fatigue Behavior of Modified Asphalt Mixtures**

*Mansour Fakhri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Khaje Nasirodin Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*

*Ebrahim Shahebrahimia, M.Sc. Grad., Department of Road and Transportation Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*

*Seyed Farhad Cahvoshian Naeni, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: Farhadchavoshian.23@gmail.com*

Received: November 2019-Accepted: February 2020

### **ABSTRACT**

Today, modified bitumen is used in the asphalt pavement, extensively. This has improved the properties of the asphalt mixture, including fatigue failure performance. Beside of these additives effect, a phenomenon called asphalt self-healing also increases the fatigue life of the mixture. Since there has not been extensive research on effect of self-healing, design fatigue life is usually considered to be less than the capacity of the mixture, and this action, in addition to adding cost, affects high temperatures performance or in other words, rutting performance. In this study, modified mixtures containing crumb rubber , styrene-butadiene-rubber, styrene-butadiene-styrene and polyethylene polymers were prepared in two groups of same bitumen and same void ratio and subjected to four-point fatigue and rutting tests. Results showed that SBR elastomer polymer with increased bitumen elasticity provides the highest recovery capability (85%) for asphalt specimens. Subsequently, the SBS polymer has the highest fatigue life and 60% recovery capability.

**Keywords:** Fatigue, Self-healing, Modified Bitumen, Hot Mix Asphalt