

## ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش‌های جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

علیرضا علی‌اکبری، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

پوریا حاجی کریمی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

**E-mail: phajikarimi@aut.ac.ir**

علی خدایی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمد راهی، مدیر تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران

اسحاق بابایی عاشورآبادی، مسئول واحد تحقیق و توسعه، کارخانه تهران، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

### چکیده

بهره‌گیری از افزودنی‌های مختلف در قیر جهت افزایش عمر و دوام روسازی بسیار رایج است. در این پژوهش تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف (۲، ۴ و ۶ درصد وزنی نسبت به قیر خالص) پلیمر استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) بر رفتار خستگی قیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از آزمایش‌های جاروب زمان (TS) و جاروب دامنه خطی (LAS) برای بررسی مشخصات خستگی قیر اصلاح شده استفاده شده است. علاوه بر روش رایج برآورد عمر خستگی بر اساس نتایج آزمایش LAS، در این پژوهش از روش شبه‌تنش نیز استفاده شده و نتایج هر سه روش با یکدیگر مقایسه شده است. در نتیجه این پژوهش، استفاده از ۲ درصد وزنی SEPS در قیر باعث کاهش عمر خستگی تا ۱۲ درصد و افزایش آن به ۴ و ۶ درصد موجب افزایش عمر خستگی قیر تا ۲۷/۹ برابر شده است. با مقایسه نتایج آزمایش‌های LAS و TS اختلاف زیادی در میزان بهبود عملکرد خستگی در اثر اضافه شدن SEPS مشاهده شده است. آزمایش LAS به دلیل زمان کوتاه‌تر انجام روش مناسب‌تری برای بررسی مشخصات خستگی قیر است. در تحلیل نتایج آزمایش LAS بر اساس روش شبه‌تنش، میزان عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS به ترتیب ۰/۷۵، ۲/۵ و ۱۵/۸ برابر نمونه قیر خالص شده است.

واژه‌های کلیدی: استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن، جاروب دامنه خطی، جاروب زمان، شبه‌تنش، خستگی

## ۱. مقدمه

همبسته با رفتار روسازی، این روش به دلیل زمان زیاد انجام آزمایش مورد استقبال قرار نگرفته است [Johnson, 2010]. در سال ۲۰۱۴ روش دیگری تحت عنوان جاروب دامنه خطی<sup>۱</sup> (LAS) توسعه داده شد که تئوری آن بر پایه مدل ویسکوالاستیک مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته<sup>۲</sup> (VECD) است [AASHTO, 2014]. این روش به دلیل کارایی مناسب و زمان کوتاه انجام آزمایش مورد استقبال و پذیرش محققین قرار گرفته و توانسته است برآورد مناسبی از عملکرد خستگی قیر و به تبع آن مخلوط آسفالتی ارائه کند.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای بررسی و کنترل خرابی‌های اساسی روسازی نظیر خستگی، شیار شدگی و ترک خوردگی حرارتی دمای پایین انجام شده است [Oshone, Dave and Sias, 2019 and Sreedhar, 2019]. استفاده از افزودنی‌ها روشی رایج به منظور بهبود خواص قیر و مخلوط آسفالتی و به دنبال آن افزایش عمر و ممانعت از بروز خرابی‌های زود هنگام است. [Jiang, et al., 2020, Khodadadi, et al., 2020 and Noory, Moghadas Nejad and Khodaii, 2019]

پلیمر SBS یکی از رایج‌ترین اصلاح‌کننده‌های قیر است که باعث بهبود عملکرد در برابر خستگی و شیارشدگی می‌شود [Nejad, et al., 2017, Underwood and Kim, 2015, Zheng, et al., 2020 and Yu, et al., 2021]. پلیمرهایی نظیر استایرن-اتیلن/بوتادین-استایرن<sup>۳</sup> (SEBS) و استایرن-اتیلن/پروپیلن-استایرن<sup>۴</sup> (SEPS) نیز متعلق به این خانواده از افزودنی‌ها می‌باشند. اگر چه تا کنون مطالعات گسترده‌ای روی تأثیر استفاده از SBS و SEBS بر مشخصات قیر صورت گرفته، مطالعات زیادی بر روی تأثیر پلیمر SEPS بر رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی انجام نشده است. امکان سنجی استفاده از SEBS برای اولین بار در سال ۱۹۹۹ انجام پذیرفته است [Chernotowich, Brozowski and sanicky, 1999]. طبق مطالعه ژنگ و همکاران [Jheng, Wang and Zhao, 2011]، استفاده از SEBS باعث بهبود

یکی از عوامل موثر در راحتی و ایمنی سفر، کیفیت مناسب روسازی است. روسازی‌ها انواع مختلفی دارند که رایج‌ترین آن‌ها در ایران روسازی آسفالتی است. خرابی‌ها در اثر عوامل متعددی از جمله حجم تردد وسایل نقلیه و عوامل محیطی (بارندگی، دما و غیره) ایجاد می‌شوند [Popoola, Apampa and Adekitan, 2020 and Qao, et al., 2020]. شناخت رفتار قیر که یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در عملکرد روسازی است، کمک شایانی به پیش‌بینی صحیح رفتار مخلوط آسفالتی، بروز خرابی و راهکارهای مقابله با ایجاد خرابی می‌کند [Notani, et al., 2020].

خرابی خستگی به دلیل تجمع ریزترک‌ها تحت بارگذاری‌های مکرر ترافیکی به وجود می‌آید [Hu, et al., 2020]. مشخصات قیر به کار رفته در روسازی شاخص بسیار مهمی در مشخصات عملکردی مخلوط آسفالتی و مقاومت آن در برابر خستگی، شیارافتادگی و ترک خوردگی حرارتی دمای پایین است. بنابراین، با ارزیابی مشخصه‌های خستگی قیر به کار رفته در تولید مخلوط آسفالتی می‌توان ارزیابی درستی از رفتار خستگی روسازی داشت [Notani, et al., 2019].

پس از انجام و انتشار پروژه SHRP<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۳، استفاده از آزمایش‌های پروتکل سوپرپیو<sup>۲</sup> به منظور ارزیابی رفتار قیر فراگیر شده است. در روش سوپرپیو، پارامتر  $G^*\sin(\delta)$  به عنوان مولفه‌ی کمی خستگی معرفی شده که در آن  $G^*$  مدول برشی مختلط و  $\delta$  زاویه فاز است [Kennedy, et al., 1994]. با بررسی‌های انجام شده توسط برخی محققین مشخص شده است که این مولفه در دامنه رفتار غیرخطی دچار کاستی است و قادر به پیش‌بینی مناسب خرابی خستگی در روسازی نیست [Bahia, et al., 1999]. با مشاهده نقص این پارامتر در بررسی رفتار خستگی، آزمایش جاروب زمان<sup>۳</sup> (TS) به عنوان جایگزین روش پیشین معرفی شده است تا بتواند دید مناسب‌تری از رفتار خستگی ارائه دهد. با وجود ارائه نتیجه‌ی مناسب و

ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش های

### جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

شده و تأثیر آن بر روی مقاومت خستگی قیرهای اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی خستگی قیرها چندین روش وجود دارد که در میان آنها روش آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) در سال های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. بر اساس مکانیزم خرابی در محیط های پیوسته، این روش می تواند مقاومت خستگی قیر را بر اساس تابعی از نرخ کرنش و روسازی پیش بینی کند. همچنین از روش جاروب زمان (TS) و روش شبه تنش که در سال ۲۰۲۰ از توسعه روش LAS معرفی شده نیز جهت بررسی خستگی قیرهای اصلاح شده استفاده شده و نتایج این سه روش با یکدیگر مقایسه شده است. در ادامه این مقاله به معرفی مصالح، روش تحقیق، ارائه نتایج و بررسی آنها پرداخته شده است و در آخر جمع بندی بر روی موضوعات مطرح شده ارائه شده است.

## ۲. مواد و مصالح و روش آماده سازی

### نمونه ها

در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ (بر اساس پروتکل سوپریو<sup>۸</sup> دارای رده بندی عملکردی<sup>۹</sup> PG58-22) کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات قیر خالص شامل چگالی، درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت کشسانی و درجه اشتعال را نشان می دهد.

پلیمر SEPS استفاده شده در این پژوهش از نوع Kraton G1780M بوده که از شرکت Kraton Polymer تهیه شده است. پلیمر Kraton G1780M پلیمری چند شاخه بر پایه استایرن و اتیلن/پروپیلن و حاوی ۷ درصد پلی استایرن است. این پلیمر به صورت پودر و با ساختار ستاره ای است.

جدول ۱. مشخصات قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰

ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۰۳	ASTM D7
درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)	۸۹	ASTM D5
نقطه نرمی (°C)	۴۹	ASTM D36

عمر خستگی شده و ایشان با مقایسه عملکرد SBS و SEBS نشان داده اند که عمر خستگی نمونه های اصلاح شده با SEBS بیشتر از نمونه های اصلاح شده با SBS است. قیمت افزودنی های یاد شده به صورت میانگین برای SBS، SEBS و SEPS به ترتیب برابر ۴، ۵ و ۷ یورو است که SEPS نسبت به SEBS قیمت کمتری دارد و در صورت عملکرد مناسب می تواند گزینه اقتصادی تری نسبت به SEBS باشد.

راهی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی تأثیر درصد های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS بر رفتار دمای بالای قیر اصلاح شده پرداخته اند و به این منظور از آزمایش رئومتر برش دینامیکی و شاخص  $G^*/\sin(\delta)$  استفاده کرده اند [Rahi, et al., 2015]. طبق نتایج حاصل شده از این پژوهش، استفاده ۶ درصدی از این پلیمر توانسته است مقاومت در برابر شیارشدگی را تا ۹/۸ برابر نمونه قیر خالص در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بهبود بخشد.

آذرهوش و کوه میشی در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی تأثیر پلیمر SEPS و نانورس در درصد های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی بر مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط اصلاح شده پرداخته اند و از آزمایش های رئومتر برش دینامیکی، خزش و بازیابی تنش چندگانه و خزش دینامیکی استفاده کرده اند [Azarhoosh and Koozmishi, 2020]. طبق نتایج حاصل شده از این پژوهش، استفاده همزمان از پلیمر SEPS و نانورس در درصد های ۲، ۴ و ۶ درصد توانسته است دمای عملکردی بالای قیر پایه را از ۵۸ درجه سانتیگراد به ترتیب به ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتیگراد برساند. با ارزیابی نتایج آزمایش خزش دینامیکی در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد، نمونه اصلاح شده با ۴٪ افزودنی در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد عملکرد بهتری نسبت به نمونه ۶٪ در این دما نشان داده است.

با توجه به خلاء تحقیقاتی موجود در مرور ادبیات که به ارزیابی تأثیر عملکرد دمای بالای این افزودنی اکتفا شده است و روش نوین ارزیابی عمر خستگی با استفاده از روش شبه تنش، در این پژوهش پلیمر SEPS به عنوان اصلاح کننده خواص قیر استفاده

TS و LAS بهره گرفته شده که در ادامه به تفکیک به هر دو آزمایش پرداخته شده است.

### ۳-۱ روش آزمایش جاروب زمان (TS)

آزمایش جاروب زمان با استفاده از دستگاه رنومتر برش دینامیکی ۱۰ (DSR) در سطح کرنش ۳٪ در آزمایشگاه واحد تحقیق و توسعه کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد انجام شده است. در این آزمایش با اعمال سطح کرنش ثابت، مقدار مدول برشی مختلط ( $G^*$ ) قیر اندازه گیری شده و افت آن معیاری برای ارزیابی رفتار خستگی قیر در نظر گرفته می شود. معمولاً آزمایش تا رسیدن به مدول برشی مختلط معادل ۵۰٪ مقدار  $G^*$  اولیه ادامه پیدا می کند و هر چه این افت تا ۵۰٪ دیرتر رخ دهد نشانگر عملکرد بهتر نمونه در برابر خستگی است.

### ۳-۲ روش آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) با استفاده از دستگاه رنومتر برش دینامیکی و مطابق با استاندارد AASHTO TP-101 در آزمایشگاه کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد انجام شده است [AASHTO, 2014]. این آزمایش از دو بخش جاروب فرکانس و جاروب دامنه کرنش تشکیل شده است. در ادامه دو روش تنش حقیقی و شبه تنش برای تحلیل نتایج آزمایش LAS مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۲-۱ تنش حقیقی

جانسون در سال ۲۰۱۰ با بهره گیری از مدل ویسکوالاستیک مکانیک خرابی در محیط پیوسته (VECD) و تعریف کار با انرژی مستهلک شده، رابطه (۱) را برای انرژی مستهلک شده در بارگذاری کرنش-کنترل ارائه نمود [Johnson, 2010]:

$$W = \pi \gamma_0^2 |G^*| \sin \delta \quad (1)$$

که در آن،  $W$  انرژی مستهلک شده،  $\gamma_0$  کرنش برشی اعمال شده،  $G^*$  مدول برشی مختلط و  $\delta$  زاویه فاز است. با استفاده از روابط ریاضی و تبدیل رابطه (۱) به یک سری عددی، رابطه (۲) حاصل شده است که مولفه شدت خرابی را معرفی می کند:

ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
خاصیت کشسانی (cm)	> ۱۰۰	ASTM D113
درجه اشتعال (°C)	> ۲۵۰	ASTM D92

با توجه به هم خانواده بودن پلیمر SEPS با SBS و درصد رایج و بهینه ۳ الی ۶ درصد برای پلیمر SBS و همچنین انجام شدن مطالعات عملکرد دمای بالای این پلیمر در درصدهای ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی، در این پژوهش نیز به منظور ارزیابی دمای میانی از درصدهای ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS (نسبت به قیر خالص) استفاده شده و نمونه ها مطابق جدول ۲ نام گذاری شده اند. به منظور اختلاط افزودنی SEPS با قیر خالص و دست یابی به یک مخلوط همگن، مطابق شکل ۱ عمل شده است.

جدول ۲. نام گذاری نمونه ها

نام نمونه	درصد وزنی SEPS
MS0	صفر
MS2	۲
MS4	۴
MS6	۶



شکل ۱. فرآیند آماده سازی نمونه ها و دستگاه های استفاده شده

### ۳. روش انجام آزمایش

در این پژوهش، به منظور بررسی مقاومت نمونه های قیری (قیر خالص و قیرهای اصلاح شده) در برابر خستگی، از دو آزمایش

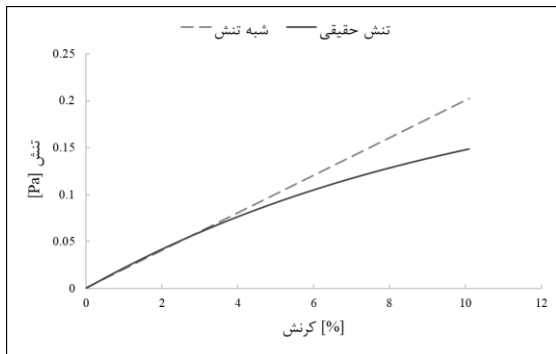
ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش‌های

جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

نتایج آزمایشگاهی آزمون LAS معرفی کرده است. شکست یک نمونه در آزمایش LAS به اختلاف تنش حقیقی و شبه تنش بستگی دارد. نرخ این انحراف به مشخصات قیر وابسته است و هر چه این نرخ بیشتر باشد، عمر خستگی نمونه کمتر است. در این پژوهش شاخصی کمی برای آسیب<sup>۱۴</sup> معرفی شده است که از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$R = \frac{A_{PS} - A_{TS}}{A_{PS}} \quad (6)$$

که در آن  $R$  مولفه آسیب و  $A_{PS}$  و  $A_{TS}$  به ترتیب مساحت زیر منحنی شبه تنش و منحنی تنش حقیقی در نمودار تنش-کرنش تا نقطه شکست (لحظه به حداکثر رسیدن تنش حقیقی) است.



شکل ۲. تنش حقیقی و شبه تنش برای نمونه قیر خالص ۸۵/۱۰۰

به منظور استفاده از مدل ویسکوالاستیک مکانیک خرابی در محیط‌های پیوسته VECD و رابطه (۱)، لازم است تا مولفه آسیب در قالب کار انجام شده به آن معرفی شود. در نتیجه، رابطه

کار انجام شده به شکل رابطه (۷) تعریف شده است:

$$W = \frac{1}{2} (\gamma_m)^2 (1-R) \quad (7)$$

که در آن  $\gamma_m$  کرنش در زمان شکست و  $R$  مولفه آسیب است. با توجه به تعریف جدید ارائه شده، در روش شبه تنش رابطه

(۳) به شکل رابطه (۸) نوشته می‌شود:

$$D_{(t)} \cong \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{2} \gamma_0^2 (R_i - R_{i-1}) \right]^{\frac{1}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (8)$$

که در آن رابطه مولفه‌های  $D$  و  $R$  از رابطه (۹) تبعیت می‌کند:

$$R = QD^C - P \quad (9)$$

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N \left[ \pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2)$$

که در آن،  $D$  شدت خرابی،  $\alpha$  معکوس شیب نمودار مدول ذخیره بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای،  $t$  زمان بر حسب ثانیه

و  $C(t)$  از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$C(t) = \frac{|G^*|_{(t)}}{|G^*|_{initial}} \quad (3)$$

که در آن  $|G^*|_{initial}$  مقدار اولیه مدول برشی مختلط است. جهت تعیین رابطه‌ی میان تعداد سیکل منجر به شکست و دامنه بارگذاری اعمالی، مدلی برای منحنی نسبت سختی در هر لحظه نسبت به سختی اولیه در مقابل شدت خرابی مصالح توسعه داده شده است که در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$C(t) = C_0 - C_1 (D)^{C_2} \quad (4)$$

که در آن،  $C_0$  برابر یک و  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب مدل هستند که از برازش بر منحنی (شدت خرابی‌های بیش از ۱۰) به دست می‌آیند. با استفاده از قانون خستگی، عمر خستگی به شکل رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$N_f = A (\gamma_{max})^B \quad (5)$$

که در آن  $\gamma_{max}$  دامنه بارگذاری در نظر گرفته شده برای روسازی (معمولاً ۲/۵ و ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود) و  $A$  و  $B$  پارامترهای وابسته به مصالح هستند.

### ۳-۲-۲ روش شبه تنش

در آزمایش LAS تنش با افزایش کرنش در نرخ ثابت تغییر می‌کند که توصیف‌کننده آسیب وارده به نمونه است. اگر صدمه‌ای به مواد وارد نشود، تنش فارغ از دامنه کرنش با کرنش متناسب است. مقدار تنش با فرض آسیب ندیدن نمونه شبه تنش<sup>۱۱</sup> نامیده می‌شود که شیب آن در نمودار تنش-کرنش ثابت و برابر شیب منحنی تنش حقیقی<sup>۱۲</sup>-کرنش در حالت آسیب ندیده است که نمونه‌ای از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. سابو<sup>۱۳</sup> در سال ۲۰۲۰ [Saboo, 2020] با استفاده از مفهوم شبه تنش، روشی برای تعیین عمر خستگی نمونه‌های قیری با استفاده از

#### ۴-۲ نتایج آزمایش LAS به روش تنش حقیقی

##### (AASHTO TP101)

از بین نتایج حاصل شده از این آزمایش، در این پژوهش به بررسی پارامترهای A، B، C و پارامتر عمر خستگی قیر ( $N_f$ ) پرداخته شده است. مولفه A عرض از مبدأ منحنی عمر خستگی بر حسب سطح کرنش در مقیاس لگاریتمی است که نشانگر تغییر در انسجام و یکپارچگی مصالح در اثر تجمع خرابی است. هرچه مقدار این مولفه بیشتر باشد، احتمال بروز ترک در روسازی کمتر است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش درصد SEPS مولفه A افزایش یافته است که به معنی تاثیر مثبت این افزودنی در افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی در برابر خستگی است.

مولفه B نشانگر خصوصیات رئولوژیکی مصالح آسیب ندیده و شیب نمودار عمر خستگی بر حسب کرنش در مقیاس لگاریتمی است. کاهش این پارامتر نشانگر سرعت کمتر خستگی قیر است. طبق نتایج شکل ۵، پارامتر B در نمونه‌های حاوی SEPS مقدار کمتری دارد. در نتیجه، اضافه شدن SEPS باعث کاهش ۱/۴۳ برابری سرعت خستگی قیر شده است.

هر چه مولفه C بیشتر و نزدیک به یک باشد، نشانگر عملکرد بهتر نمونه قیری در برابر خستگی است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش درصد پلیمر SEPS باعث افزایش پارامتر C در شدت خرابی ثابت شده است که به معنی افزایش مقاومت در برابر خستگی است. همچنین تفاوت مقدار C در شدت خرابی بالاتر، بیشتر شده است. در نتیجه، افزایش درصد پلیمر SEPS باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی است.

نتایج مولفه  $N_f$  برای قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با پلیمر SEPS در شکل ۷ نشان داده شده است. قیر اصلاح شده در ۶ درصد وزنی نسبت به قیر خالص عمر خستگی تا ۲۷/۹ برابر بیشتر از قیر پایه دارد. افزایش درصد SEPS باعث افزایش عمر خستگی نمونه شده است. این پلیمر با قرار گرفتن در میان

که در آن  $C, Q$  و  $P$  پارامترهای مدل هستند که از برازش معادله بر منحنی به دست می‌آیند. به مانند رابطه (۵) مولفه  $N_f$  در روش

$$N_f = \left( \frac{2fd}{[1 + (1-C)\alpha](QC)^\alpha} \right) \gamma^{-2\alpha} \quad (10)$$

شبه تنش به صورت رابطه (۱۰) تعریف شده است:

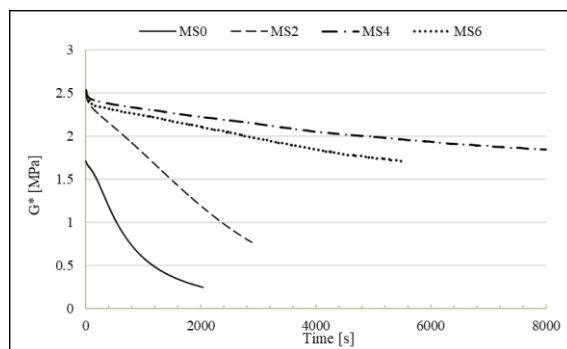
تفاوت اصلی بین روش تنش حقیقی و شبه تنش در رابطه  $N_f$  مولفه A است.

#### ۴. نتایج و بحث

پس از انجام برنامه آزمایشگاهی بر روی نمونه قیر خالص و نمونه‌های قیر حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد SEPS، در این بخش به ارائه نتایج و تحلیل و بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

##### ۴-۱ روش جاروب زمان (TS)

طبق توضیحات ارائه شده در روش آزمایش، در صورت بالا بودن  $G^*$  اولیه زمان زیادی جهت انجام آزمایش TS صرف خواهد شد که در عمل انجام این آزمایش را بعضاً با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. همانطور که از شکل ۳ برداشت می‌شود، اضافه شدن SEPS به قیر باعث افزایش  $G^*$  اولیه شده است. همچنین می‌توان دریافت نمونه حاوی ۴٪ پلیمر نرخ کاهش  $G^*$  کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد که نشانگر عمر خستگی بیشتر آن است. هرچه زمان بیشتری صرف شده است، نرخ کاهش  $G^*$  کاهش یافته و شیب نمودار به سمت افقی شدن پیش رفته است. از این رو، ممکن است نتیجه موردنظر در زمان پیش‌بینی شده حاصل نشود.

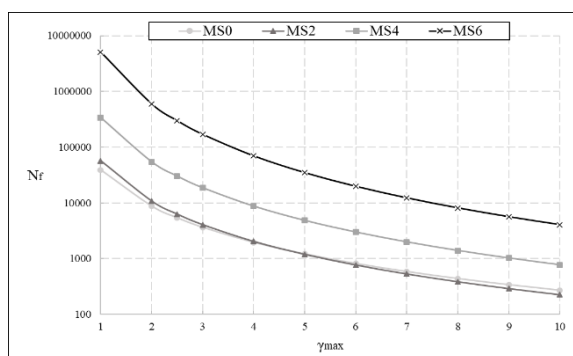


شکل ۳. نمودار مقادیر  $G^*$  در طول زمان بارگذاری برای

نمونه‌های قیر خالص و اصلاح شده با SEPS در آزمایش TS

ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش های

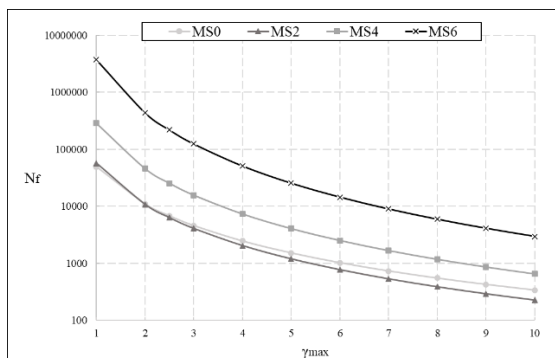
### جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)



شکل ۷. منحنی عمر خستگی نمونه قیر پایه و قیر اصلاح شده با پلیمر SEPS بر حسب  $\gamma_{max}$  به روش تنش حقیقی

### ۴-۳ نتایج آزمایش LAS به روش شبه تنش

همانطور که پیشتر اشاره شد، در این روش از اختلاف بین تنش حقیقی و شبه تنش برای تعیین عمر خستگی استفاده شده است. از این رو در شکل ۸ مقادیر عمر خستگی بر حسب  $\gamma_{max}$  نشان داده شده است.



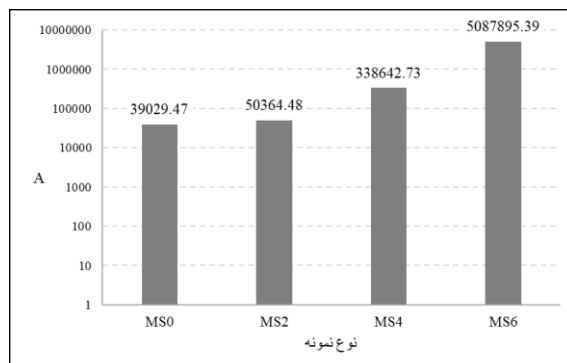
شکل ۸. منحنی عمر خستگی نمونه قیر پایه و قیر اصلاح شده با پلیمر SEPS بر حسب  $\gamma_{max}$  به روش شبه تنش

همانطور که در شکل ۸ مشخص است، روش شبه تنش توانسته است نتایج قابل قبولی برای عمر خستگی ارائه دهد. این نتایج نشانگر افزایش عمر خستگی در اثر اضافه شدن ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS است. در روش شبه تنش عمر خستگی نمونه MS2 کمتر از نمونه قیر خالص برآورد شده است.

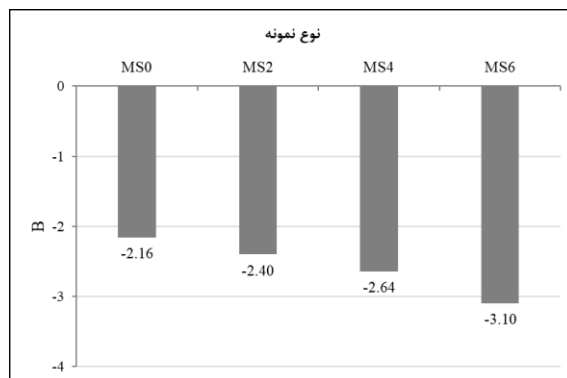
### ۴-۴ مقایسه نتایج سه روش محاسبه عمر خستگی

در شکل ۹ نتایج حاصل از دو روش یاد شده برای هر ۴ نمونه ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است،  $N_f$  به روش شبه تنش برای نمونه های MS0 و MS2 مقادیر بیشتری

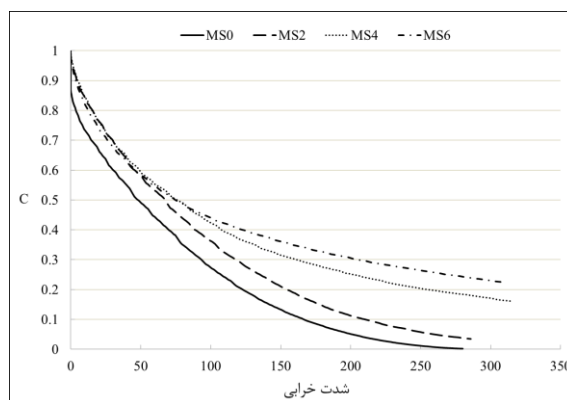
مولکول های پلیمری قیر، باعث تقویت شبکه قیر و افزایش مقاومت قیر در برابر گسترش ترک های خستگی شده است.



شکل ۹. مقادیر مولفه A برای نمونه قیر خالص و نمونه های قیر اصلاح شده با SEPS



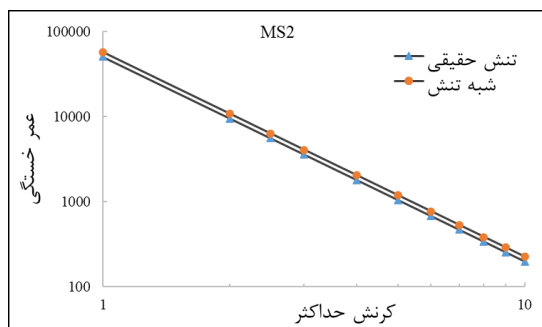
شکل ۱۰. مقادیر مولفه B برای نمونه قیر خالص و نمونه های قیر اصلاح شده با SEPS



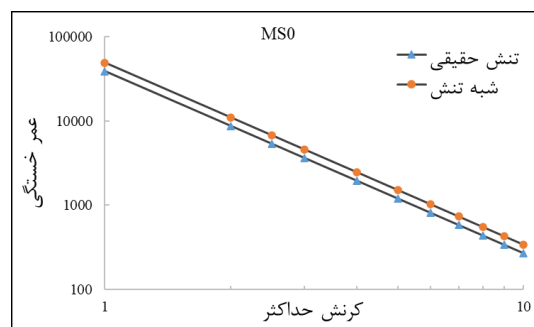
شکل ۱۱. منحنی مولفه C بر حسب شدت خرابی قیر پایه و اصلاح شده با SEPS

نتیجه را می‌توان نرخ کمتر کاهش شیب نمودار تنش-کرنش نمونه‌های MS4 و MS6 دانست که باعث ایجاد اختلاف بیشتر بین تنش حقیقی و شبه تنش شده است.

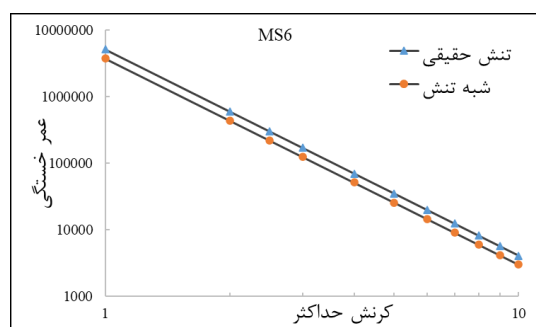
نسبت به روش تنش حقیقی بوده است. برای نمونه‌های MS4 و MS6 این نسبت برعکس شده و مقادیر  $N_f$  در روش شبه تنش کمتر از روش تنش حقیقی به دست آمده است. علت این



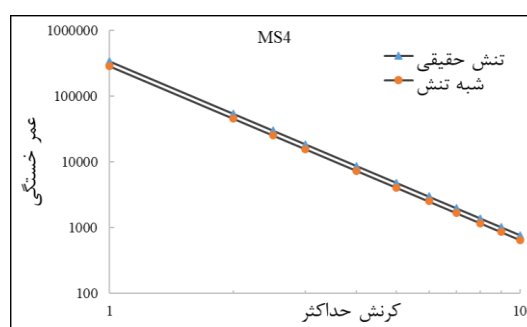
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹. منحنی عمر خستگی بر حسب کرنش حداکثر (در قالب لگاریتمی) به دو روش تنش حقیقی و شبه تنش برای نمونه (الف) قیر خالص،

و نمونه‌های حاوی (ب) ۲٪، (ج) ۴٪، و (د) ۶ درصد SEPS

در اثر اضافه شدن پلیمر SEPS به قیر برای هر دو روش یاد شده در جدول ۳ نشان داده شده است و نسبت درصد افزایش عمر خستگی روش TS نسبت به روش LAS نیز آورده شده است.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نتایج حاصل از سه روش اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. هر سه روش نشان دهنده عملکرد مثبت SEPS بر عمر خستگی قیر در درصد‌های بیش از ۲ درصد وزنی هستند. با این حال در روش TS بر خلاف روش LAS با افزایش پلیمر از ۴٪ به ۶٪ عمر خستگی کاهش یافته است. با مشاهده این تناقض، مجدداً برای این نمونه آزمایش TS انجام شده است که نتیجه مشابهی حاصل شده است. روش TS در نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۴٪ پلیمر درصد بهبود بیشتری

دو سطح کرنش در نظر گرفته شده برای ارزیابی عمر خستگی در این پژوهش ۲/۵ و ۵ درصد است که تغییرات  $N_f$  در این دو حالت مقایسه شده و نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصل شده، اضافه شدن SEPS در سطح کرنش ۵ درصد در نمونه MS0 باعث کاهش عمر خستگی و با افزایش سهم SEPS به ۴ و ۶ درصد وزنی باعث افزایش عمر خستگی شده است. اضافه شدن ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS به قیر خالص به ترتیب باعث کاهش ۱۲ درصدی، افزایش ۳۰۰ درصدی و افزایش ۲۷۸۷ درصدی در روش تنش حقیقی و کاهش ۲۶ درصدی، افزایش ۱۵۳ درصدی و افزایش ۱۴۸۴ درصدی در روش شبه تنش شده است.

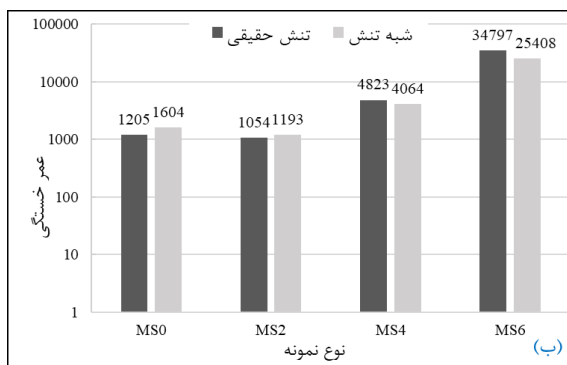
هدف اصلی از انجام آزمایش TS مقایسه نتایج حاصل از روش LAS و TS بوده است. در این راستا درصد بهبود عمر خستگی



## ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش های

### جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

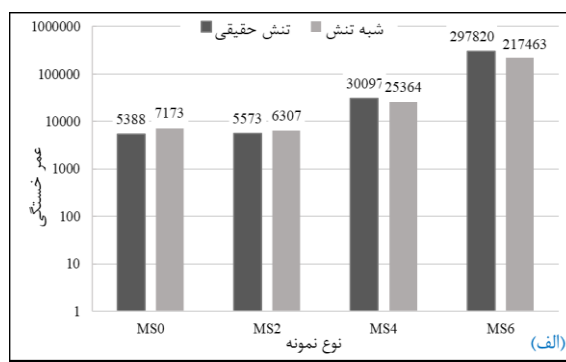
روش LAS به واسطه زمان انجام آزمایش کمتر می تواند گزینه مناسبی برای بررسی مشخصات خستگی باشد اما لازم است در حین محاسبه مولفه ها دقت لازم برای برازش وجود لحاظ شود. از طرف دیگر، روش TS به دلیل ثابت نگهداشتن کرنش زمانبر است و ممکن است در صورت بالا بودن  $G^*$  نتواند عدد دقیقی گزارش کند و پیش از رسیدن به نصف  $G^*$  اولیه آزمایش متوقف شود. در مقایسه روش تنش حقیقی و شبه تنش در آزمایش LAS مشخص شده است که در درصد های بالای افزودنی، روش شبه تنش عملکرد بهتری نشان داده است، همچنین مقادیر آن به نتایج آزمایش TS نزدیکتر شده است.



نسبت به روش LAS نشان داده است اما این نسبت در نمونه های حاوی ۶٪ پلیمر به ۰/۵۷ رسیده است.

### جدول ۳. مقایسه میزان بهبود عمر خستگی قیر اصلاح شده با

SEPS				
نمونه	نسبت به نمونه MS0 (%)			نسبت درصد بهبود
	TS	LAS	شبه تنش	
MS2	۱۸۶	-۱۲	-۲۶	-
MS4	۲۱۸۷	۳۰۰	۱۵۳	۷/۲۹
MS6	۱۵۸۰	۲۷۸۷	۱۴۸۴	۰/۵۷



شکل ۱۰. عمر خستگی در سطوح تنش الف) ۲/۵ درصد و ب) ۵ درصد

مناسب تری است و در زمان کمتری به نتیجه می رسد که از خطای آزمایش نیز می کاهد. خلاصه نتایج حاصل شده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. قیرهای اصلاح شده با استفاده از پلیمر SEPS عمر خستگی بیشتری نسبت به قیر خالص دارند.
۲. مطابق نتایج آزمایش LAS با افزایش میزان پلیمر در قیر، عمر خستگی در نمونه حاوی ۶٪ پلیمر بیش از ۲۷ برابر شده است.
۳. برخلاف آزمایش LAS، در آزمایش TS بیشینه افزایش عمر خستگی در نمونه حاوی ۴٪ پلیمر مشاهده شده است و با افزایش پلیمر از ۴٪ به ۶٪ عمر خستگی کاهش یافته است، اما کماکان عمر خستگی آن بیش از ۱۶ برابر قیر خالص است.

## ۵. نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثر افزودن پلیمر SEPS بر مقاومت خستگی قیر و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش جاروب زمان (TS) و جاروب دامنه خطی (LAS) به دو روش تنش حقیقی و شبه تنش برای تحلیل نتایج آزمایش LAS پرداخته است. بدین منظور قیرهای اصلاح شده با پلیمر SEPS در درصد های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی نسبت به قیر با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی تحت آزمایش LAS و TS قرار گرفتند. آزمایش TS به واسطه ثابت بودن کرنش حین آزمایش، زمانبرتر از آزمایش LAS بوده و برای قیرهای با مدول برش مختلط اولیه زیاد پیشنهاد نمی شود و ممکن است نتواند عدد دقیقی گزارش کند و پیش از رسیدن به نصف  $G^*$  اولیه آزمایش متوقف شود. از این رو، آزمایش LAS برای ارزیابی عمر خستگی گزینه

Construction and Building Materials, 255, 119363.

– Bahia, H. U., Zhai, H., Onnetti, K., & Kose, S. (1999). Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 68.

– Chernotowich, A. K., Brzozowski, K. J., & Sanicky, P. J. (1999). Comparison of standard and SEBS modified asphalts in BUR membranes. In Roofing Research and Standards Development: Fourth Volume. ASTM International.

– Jiang, J., Ni, F., Zheng, J., Han, Y., & Zhao, X. (2020). Improving the high-temperature performance of cold recycled mixtures by polymer-modified asphalt emulsion. International Journal of Pavement Engineering, 21(1), 41-48.

– Johnson, C., Bahia, H., & Wen, H. (2009). Practical application of viscoelastic continuum damage theory to asphalt binder fatigue characterization. Asphalt Paving Technology- Proceedings, 28, 597.

– Johnson, C. M. (2010). Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method.

– Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H., & Moulthrop, J. S. (1994). Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program.

– Khodadadi, M., Moradi, L., Dabir, B., Nejad, F. M., & Khodaii, A. (2020). Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance.

۴. در مقایسه نتایج آزمایش LAS و TS خطای زیادی بین میزان بهبود عمر خستگی قیر اصلاح شده نسبت به قیر خالص مشاهده شده است که علت آن تأثیر کرنش اعمالی است.

۵. روش شبه تنش می‌تواند در درصد‌های بالای افزودنی که  $G^*$  اولیه زیاد است، دقت عمل بیشتری نسبت به روش LAS (تنش حقیقی) داشته باشد.

۶. مطابق نتایج آزمایش LAS به هر دو روش، عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲ درصد وزنی SEPS نسبت به قیر خالص کاهش یافته است و با افزایش درصد SEPS عملکرد بهبود یافته و عمر خستگی افزایش یافته است.

۷. روش شبه تنش برای نمونه‌های با درصد افزودنی زیاد و روش تنش حقیقی برای نمونه‌های خالص و با درصد افزودنی کم توصیه می‌شوند.

## ۶. پی‌نوشت‌ها

1. Strategic highway research program
2. Superpave Protocol
3. Time sweep
4. Linear amplitude sweep
5. Viscoelastic Continuum Damage
6. Styrene-ethylene/butadiene-styrene
7. Styrene-ethylene/propylene-styrene (SEPS)
8. SuperPAVE protocol
9. Performance Grading
10. Dynamic shear rheometer
11. Pseudo stress
12. True stress
13. Saboo
14. Damage

## ۷. مراجع

– AASHTO. (2014). Standard method of test for estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep.

– Azarhoosh, A., & Koohmishi, M. (2020). Investigation of the rutting potential of asphalt binder and mixture modified by styrene-ethylene/propylene-styrene nanocomposite.

جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

- Popoola, M., Apampa, O., & Adekitan, O. (2020). Impact of Pavement Roughness on Traffic Safety under Heterogeneous Traffic Conditions. *Nigerian Journal of Technological Development*, 17(1), 13-19.
- Qiao, Y., Santos, J., Stoner, A. M., & Flinstch, G. (2020). Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States. *Journal of industrial ecology*, 24(2), 342-355.
- Rahi, M., Fini, E. H., Hajikarimi, P., & Nejad, F. M. (2015). Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014154.
- Saboo, N. (2020). New damage parameter for fatigue analysis of asphalt binders in linear amplitude sweep test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020126.
- Sreedhar, S. (2019). Developing Performance-Based Specifications to Improve the Fatigue Life of Asphalt Pavements in Oregon.
- Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2015). Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and asphalt mastics. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 510-529.
- Yu, H., Yao, D., Qian, G., Cai, J., Gong, X., & Cheng, L. (2021). Effect of ultraviolet aging on dynamic mechanical properties of SBS modified asphalt mortar. *Construction and Building Materials*, 281, 122328.
- Zheng, C. F., Wang, L., & Zhao, D. J. (2011). Experimental Study on Pavement Performance of SEBS Modified Asphalt Mixture. In *Construction and Building Materials*, 256, 119453.
- Lv, S., Hu, L., Xia, C., Wang, X., Cabrera, M. B., Guo, S., & Chen, J. (2020). Development of fatigue damage model of asphalt mixtures based on small-scale accelerated pavement test. *Construction and Building Materials*, 260, 119930.
- Nejad, F. M., Shahabi, M., Rahi, M., Hajikarimi, P., & Kazemifard, S. (2017). An investigation on the effect of SBS+ vacuum bottoms residue modification on rheological characteristics of asphalt binder. *Petroleum Science and Technology*, 35(22), 2115-2120.
- Noory, A., Moghadas Nejad, F., & Khodaii, A. (2019). Evaluation of geocomposite-reinforced bituminous pavements with Amirkabir University Shear Field Test. *Road Materials and Pavement Design*, 20(2), 259-279.
- Notani, M. A., Hajikarimi, P., Nejad, F. M., & Khodaii, A. (2020). Rutting resistance of toner-modified asphalt binder and mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(1), 1-9.
- Notani, M. A., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A., & Hajikarimi, P. (2019). Evaluating fatigue resistance of toner-modified asphalt binders using the linear amplitude sweep test. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), 1927-1940.
- Oshone, M., Dave, E. V., & Sias, J. E. (2019). Asphalt mix fracture energy based reflective cracking performance criteria for overlay mix selection and design for pavements in cold climates. *Construction and Building Materials*, 211, 1025-1033.

Advanced Materials Research (Vol. 168, pp. 906-911). Trans Tech Publications Ltd.

– Zheng, X., Xu, W., Feng, H., & Cao, K. (2020). High and low temperature performance and fatigue properties of silica fume/SBS compound modified asphalt. *Materials*, 13(19), 4446.

ارزیابی و مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) با استفاده از آزمایش های

### جاروب زمان و جاروب دامنه خطی (LAS)

علیرضا علی اکبری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه قم اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۹ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مواد و مصالح روسازی آسفالتی، ایمنی ترافیک، مدیریت ترافیک و برنامه ریزی حمل و نقل است.



پوریا حاجی کریمی، درجه کارشناسی مهندسی عمران و کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه را به ترتیب در سال های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ از دانشکده مهندسی عمران دانشکده گان فنی دانشگاه تهران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۷ موفق به کسب درجه دکتری تخصصی در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) گردید و در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر با مرتبه استادیار است. مدل سازی آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی رفتار قیر و مخلوط های آسفالتی با استفاده از روش اجزاء محدود مهمترین زمینه تحقیقاتی ایشان است. علاوه بر این مدیریت پسماندهای صنعتی و خطرناک از طریق استفاده آنها در مصالح ساختمانی و نیز مدیریت تعمیر و نگهداری روسازی راه ها و عوامل پروازی فرودگاه ها از دیگر زمینه های تحقیقاتی ایشان است.



علی خدایی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - حمل و نقل را به ترتیب در سال های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۰ از دانشگاه برادفورد انگلستان اخذ نمود. ایشان در سال ۱۹۸۴ موفق به کسب درجه دکتری تخصصی در رشته مهندسی عمران - راه و ساختمان از دانشگاه بلفاست انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مواد و مصالح روسازی آسفالتی، طراحی و برنامه ریزی فرودگاه، ترابری و ترافیک است و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استاد در دانشگاه صنعتی امیرکبیر است.



محمد راهی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر را به ترتیب در سال های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۶ از دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) اخذ نمود. ایشان از سال ۱۳۸۸ در شرکت نفت پاسارگاد مشغول به کار و هم اکنون مدیر تحقیق و توسعه این شرکت است. بررسی و مدل سازی رفتار رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای دمیده، محلول، امولسیون و... مهمترین زمینه کاری و تحقیقاتی ایشان است. بخش عمده تحقیقات ایشان بر بررسی تأثیر افزودنی های مختلف پلیمری و غیرپلیمری بر رفتار دمایی پایین، میانی و بالای قیرها متمرکز بوده است و در این زمینه مقالات متعددی در مجلات علمی - پژوهشی بین المللی چاپ نموده اند.



اسحاق بابایی عاشورآبادی، درجه کارشناسی را در رشته مهندسی شیمی در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز و درجه کارشناسی ارشد را در رشته شیمی آلی در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس اخذ نمود. ایشان در حال حاضر به عنوان مسئول واحد تحقیق و توسعه کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد مشغول به فعالیت می باشند و تمرکز اصلی فعالیت های کاری و تحقیقاتی ایشان بر اجرا و توسعه آزمایش های عملکردی ارزیابی رفتار قیرهای خالص و اصلاح شده است.

