

## بررسی اثر آمیخته پلیمری بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی

مصطفی وامق، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

سید فرهاد چاوشیان نائینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

محمدحسن میرابی مقدم، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان،

ایران

Email: Ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

### چکیده

در پی اعمال بارهای ترافیکی سنگین و محورهای متنوع امروزی، ضرورت اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی به منظور کاهش شدت خرابی‌ها و هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی، امری اجتناب‌ناپذیر است. خستگی آسفالت نوعی خرابی سازه‌ای است که محققین زیادی را به دنبال یافتن راه‌هایی برای مقابله با این خرابی سوق داده است. یکی از این راه‌ها، به‌کارگیری ترکیبات پلیمری به منظور اصلاح خواص قیر و نهایتاً مخلوط‌های آسفالتی است. در این پژوهش، از ترکیب دو پلیمر ارزان قیمت تولید داخل با نام‌های تجاری SBR و PP و با نسبت‌هایی برابر در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده و تأثیر عملکرد خستگی این ترکیب پلیمری با پلیمر گران‌قیمت و وارداتی SBS مقایسه گردید. در این راستا، آزمون‌های خستگی تیر خمشی و خستگی کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های آسفالتی انجام گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب دو پلیمر با بهبود عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش تا بیشتر از ۵۰٪ عمر خستگی به نسبت پلیمر SBS گشته و می‌توان از آن به‌عنوان یک افزودنی مقرون به‌صرفه برای جایگزینی پلیمر SBS استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، عمر خستگی، آمیخته پلیمری، آزمایش خستگی تیر خمشی، نانورس

### ۱. مقدمه

ترافیکی، شرایط محیطی و مصالح نامرغوب، از جمله عواملی هستند که موجب ایجاد خرابی‌هایی نظیر خستگی، شیارشدگی و عریان‌شدگی سنگ‌دانه‌ها می‌گردند و به‌تبع آن منجر به کاهش ایمنی و راحتی

روسازی راه یکی از اجزای اساسی جاده‌ها محسوب می‌شود که در تأمین ایمنی و راحتی سرنشینان خودرو نقش مهمی را ایفا می‌کند. در روسازی‌ها، بارهای

می‌شوند (صالح‌فرد و همکاران، ۲۰۱۶). ترک خستگی یا پوست سوسماری یکی از خرابی‌های عمده روسازی است که منجر به کاهش عملکرد و دوام روسازی می‌گردد. این ترک از سطوح زیرین آسفالت، جایی که تنش یا کرنش بالایی وجود دارد، شروع شده و کم‌کم با تکرار بار به سمت بالا حرکت می‌کند. از این رو، کنترل ترک خستگی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متخصصین حوزه روسازی می‌باشد. عوامل مؤثر بر عمر خستگی عبارت‌اند از نوع قیر، سطح کرنش، دما، فرکانس بارگذاری، تعداد سیکل بارگذاری و دوره استراحت. زمانی که روسازی تحت تنش تناوبی قرار می‌گیرد، عکس‌العمل مصالح در مقابل تنش و کشش شامل سه مؤلفه‌ی کرنش اصلی الاستیک، ویسکوالاستیک و پلاستیک می‌باشد. کرنش‌های پلاستیک کششی باعث بروز خستگی و در نتیجه خرابی روسازی می‌شوند (لو و ایساکسون، ۲۰۰۰؛ خاتاک و بلدی، ۲۰۰۱).

قیر یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی است. از آنجا که قیر خالص قادر به فراهم آوردن شرایط مناسب در مخلوط جهت تحمل بارهای ترافیکی تردد امروزی نیست، استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده خواص قیر امری ضروری است (عامری و همکاران، ۲۰۱۱). افزودنی‌های پلیمری به‌عنوان اصلاح‌کننده خصوصیات قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی با تجربیات موفق همراه بوده است و عملکرد اساسی آن‌ها متأثر از خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیک قیر می‌باشد (نسیری و همکاران، ۲۰۱۷). پلیمرهای الاستیک از جمله موادی هستند که می‌توانند با اصلاح قیر موجب کاهش تغییرشکل‌های دائم و گودافتادگی مسیر چرخ‌ها در روسازی‌های آسفالتی شوند. استایرن بوتادین رابر (SBR) از دسته الاستومرها نیز قابلیت افزایش خواص الاستیک و انعطاف‌پذیری آسفالت را دارد. این لاستیک، ویسکوزیته قیر را افزایش می‌دهد و موجب افزایش مقاومت شیارشدگی می‌گردد و با

خاصیت الاستیک و چسبندگی که در قیر ایجاد می‌کند، مقاومت در برابر ترک‌های خستگی، حرارتی و خرابی رطوبتی را افزایش می‌دهد (عبدالوجود و تانون، ۲۰۱۵؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۱۵). پلاستومرها نیز به‌عنوان دسته دیگری از پلیمرهای مورد استفاده در قیر بوده که موجب افزایش سختی قیر در دماهای زیاد می‌گردند و می‌توانند مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ماندگار و گودافتادگی مسیر چرخ‌ها در روسازی آسفالتی را افزایش دهند. اتیلن وینیل استات از این دسته پلیمری بوده که در ایالات متحده نیز رواج بیشتری داشته است. پلیمری همچون استایرن بوتادین استایرن دارای خصوصیتی از این دو دسته پلیمری بوده که توانایی بهبود عملکرد دینامیک آسفالت در برابر بارهای اعمالی را دارد (The Asphalt Handbook, 2007؛ کوک و ییلماز، ۲۰۰۹؛ کونگ و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، سازگاری ضعیف این پلیمر در قیر و در نتیجه ناپایداری انبارداری قیر اصلاح شده با SBS، مانعی برای استفاده از آن در روسازی راه‌ها می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر آن، قیمت زیاد این پلیمر عامل دیگری می‌باشد که نهایتاً منجر گردیده تا زمینه تحقیقاتی روی دیگر گزینه‌های جایگزین، مانند آمیخته‌ها، فراهم شود (یوسفی و همکاران، ۱۹۹۸).

با وجود اینکه تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد پلیمر در آسفالت انجام گردیده است، لیکن تاکنون هیچ پلیمری نتوانسته به‌طور کامل معایب آسفالت را برطرف نماید. از طرفی، قیمت زیاد برخی از پلیمرها به دلیل فرایند تولید و یا وارداتی بودن آن‌ها موجب شده تا این پژوهش‌ها تنها در مقیاس آزمایشگاهی اجرا شده و در صنعت راه‌سازی آن‌چنان که شایسته است مورد توجه قرار نگیرد. همپوشانی خواص پلیمرها از طریق ترکیب آن‌ها با یکدیگر می‌تواند یکی از راه‌های غلبه بر این معضل باشد. آمیخته پلیمری، ترکیبی از حداقل دو پلیمر بوده و از مهم‌ترین دلایل آمیزه‌سازی پلیمری را می‌توان دستیابی به

چاوشیان و عامری (۱۳۹۶) در تحقیقی، از ترکیب دو پلیمر پلی استایرن و استایرن بوتادین رابر برای بهبود مقاومت خستگی استفاده کردند. در این تحقیق، این دو پلیمر به صورت مستقیم با قیر داغ مخلوط گردیدند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار SBR در قیرهای اصلاح شده، عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی افزایش یافته است. در حالت کلی، ترکیب دو پلیمر پلاستومر و الاستومر در مخلوط توانسته است عمر خستگی را به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه فاقد افزودنی افزایش دهد.

در پژوهش حاضر، از آمیزه دو نوع پلیمر تولید داخل در راستای بهبود خواص قیر و دستیابی به خواصی بهتر یا مشابه پلیمر SBS استفاده گردیده است. دو پلیمر پلاستومر پلی پروپیلن (PP) و الاستومر استایرن بوتادین رابر (SBR) به مقداری برابر و در نسبت‌های ۳، ۴ و ۵ درصد وزن قیر، به مخلوط اضافه شدند. به منظور کنترل عملکرد این افزودنی در آسفالت، آزمایش‌های مدول برجهنگی، خستگی کشش غیرمستقیم و خستگی تیر خمشی روی نمونه‌های آسفالتی انجام پذیرفت.

ترکیب پلیمری باصرفه، از طریق اختلاط با گونه‌های ارزان‌تر نظیر پلیمرهای بازیافتی و تهیه مواد با خصوصیات بهتر، نام برد (عامری و همکاران، ۱۳۹۴).

صالح فرد و همکاران (۲۰۱۶) اثر پلیمر SBR به صورت مجزا و ترکیب با نانورس (NC)، بر قیر و خستگی مخلوطهای آسفالتی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که قیرهای اصلاح شده با SBR/NC دارای ویسکوزیته و پایداری بیشتری هستند و همچنین مقدار  $G^*$  بالاتری دارند و به صورت کلی خصوصیات ویسکوالاستیک قیر را بهبود می‌بخشند. مخلوطهای آسفالتی حاوی SBR/NC در آزمایش خستگی، مقاومت بیشتری در برابر خستگی نسبت به نمونه‌های حاوی لاتکس SBR نشان می‌دهند.

ناوارو و همکاران (۲۰۱۸) از آمیخته‌ی اتیلن وینیل استات و پلی اتیلن سبک (EVA/LDPE) در قیر استفاده نمودند. نتایج رئولوژی نشان داد که افزودن ترکیبی از این دو پلیمر، مدول برشی بالاتری نسبت به پلیمر گران قیمت SBS و EVA خالص دارد. همچنین، میزان خاصیت الاستیک آمیخته در دماهای زیاد، افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده‌ی بهبود مقاومت شیارشدگی در دمای زیاد می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

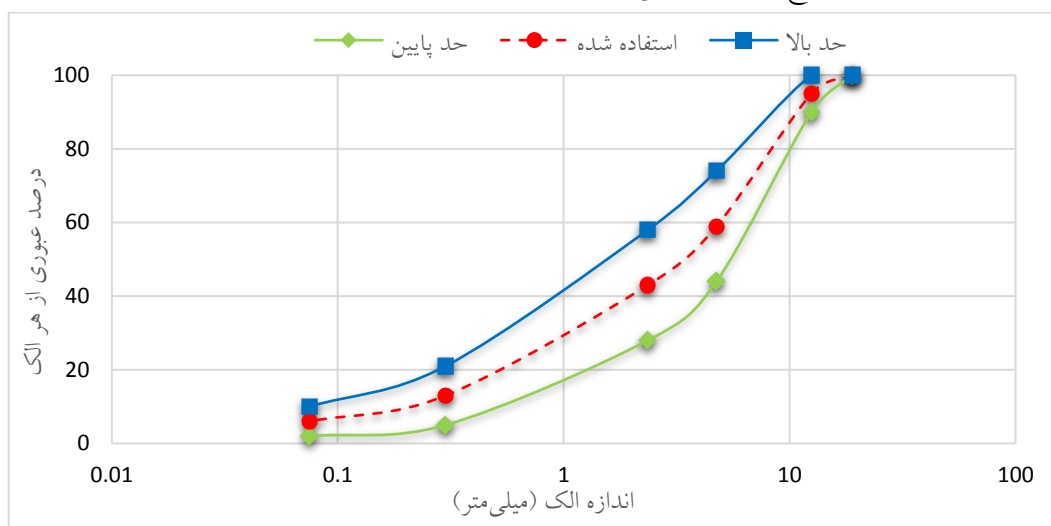
| استاندارد آزمایش | واحد               | حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴ |      | نتایج<br>آزمایش | شرح آزمایش                              |
|------------------|--------------------|-------------------------|------|-----------------|---|
|                  |                    | رویه                    | آستر |                 |   |
| AASHTO T96       | %                  | ۳۰                      | ۴۰   | ۲۲/۳            | حداکثر سایش به روش لس آنجلس             |
| BS 812           | %                  | ۲۵                      | ۳۰   | ۱۶              | حداکثر ضریب تورق                        |
| ASTM D5821       | %                  | ۹۰                      | ۸۰   | ۹۳              | حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ |
| AASHTO T85       | %                  | ۲/۵                     | ۲/۵  | ۲/۲             | حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)    |
| AASHTO T84       | %                  | ۲/۵                     | ۲/۸  | ۲/۴             | حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)      |
| ASTM C127        | gr/cm <sup>3</sup> | -                       | -    | ۲/۵۹            | وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه    |
| ASTM C128        | gr/cm <sup>3</sup> | -                       | -    | ۲/۳۲            | وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه      |

## ۲-۱. مصالح مصرفی

### ۲-۱-۲. مصالح سنگی و قیر

مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی به‌عنوان استخوان‌بندی سازه‌ای، نقش اساسی در تحمل بارهای وارده ایفا می‌کنند (مجیدزاده و براوژد، ۱۹۶۸). سنگ‌دانه مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح شکسته آهکی است که مشخصات آن به شرح جدول ۱ می‌باشد.

دانه‌بندی این مصالح مطابق با منحنی دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه (شکل ۱) می‌باشد. قیر با تأمین پیوستگی اجزا در آسفالت، نقش مهمی در عملکرد مخلوط در برابر بارهای وارده ایفا می‌کند. قیر مورد استفاده در تمامی نمونه‌های این تحقیق از نوع خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ بوده که مشخصات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده

| روش آزمایش | مقدار | خصوصیات                     |
|------------|-------|-----------------------------|
| ASTM D-70  | ۱/۰۳  | وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس |
| ASTM D-5   | ۶۴    | درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس |
| ASTM D-36  | ۵۴    | نقطه نرمی (درجه سلسیوس)     |
| ASTM D-113 | ۱۰۲   | انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس     |
| ASTM D-92  | ۳۰۵   | نقطه اشتعال                 |
| ASTM D-70  | ۳۱۷   | نقطه احتراق                 |

سخت استایرن، سختی و مقاومت برای قیر به همراه می‌آورد و نقطه نرمی را افزایش می‌دهد. وجود مونومر استایرن در SBR باعث بهبود سازگاری این پلیمر با پلاستومرها و افزایش برهمکنش بین دو فاز و قابلیت اختلاط آن‌ها می‌شود (رابینسون، ۲۰۰۵؛ راسمن، ۲۰۰۷).

### ۲-۲-۳. افزودنی‌های پلیمری

پلیمر SBR از کوپلیمریزاسیون استایرن و بوتادین تولید می‌شود. مونومر نرم بوتادین در الاستیسیته شرکت می‌کند و قیر را منعطف‌تر می‌کند. در حالی که مونومر

شده‌اند در قیر تشکیل می‌دهد. در این پژوهش، از SBS 501 تولیدی کارخانه LG کره استفاده شده است. خصوصیات پلیمرهای مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

پایداری پلیمرها در قیرهای اصلاح شده به هنگام انبارداری، گرم کردن و اختلاط سنگ‌دانه با قیر، یکی از عیوبی است که کاربرد پلیمرها را محدود ساخته است. نانورس یکی از افزودنی‌های پایدارکننده پلیمرها در قیر است (عامری و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش به منظور افزایش پایداری پلیمر SBS و آمیخته SBR\PP در قیر، از نانورس مونت‌موریلونیت Cloisite 15A به میزان ۱/۵ درصد وزن قیر استفاده شده است که خصوصیات آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.

استایرن بوتادین رابر مصرفی از نوع ۱۵۰۲ (SBR1502) تولیدی پتروشیمی تخت جمشید بوده که قابلیت پخش‌شدگی بالایی در کنار انحلال خوب در قیر دارد. وجود این پلیمر در قیر موجب کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و بهبود خواص حرارتی قیر شده و در دمای کم بدون افزایش سختی، خواص الاستیک قیر را افزایش می‌دهد که این وضعیت در رابطه با رفتار خستگی آسفالت مطلوب به نظر می‌رسد.

پلیمر پلی‌پروپیلن شاخص انحلال‌پذیری نزدیکی با قیر دارد. در این پژوهش، از پلی‌پروپیلن با نام تجاری PP 552R تولیدی شرکت پتروشیمی جم استفاده شده است.

SBS یک شبکه الاستیک سه‌بعدی از فاز پلی استایرن که به‌وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل

جدول ۳. مشخصات پلیمرهای مصرفی

| SBR       |                                   | PP    |                                   | SBS   |   |
|-----------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---|
| مقدار     | خصوصیات                           | مقدار | خصوصیات                           | مقدار | خصوصیات                                   |
| ۲۲/۵-۲۴/۵ | مقدار استایرن (درصد وزنی)         | ۱۵۲   | نقطه نرمی (درجه سلسیوس)           | ۳۱    | مقدار استایرن (درصد وزنی)                 |
| ۴/۷۵-۷/۵  | ارگانیک اسید (درصد وزنی)          | ۳۲    | استحکام کششی (مگاپاسکال)          | خطی   | ساختار مولکولی                            |
| ۳۵۰       | ازدیاد طول تا پارگی (درصد)        | ۱۳    | ازدیاد طول تا پارگی (درصد)        | ۲۸۸   | نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)                 |
| -۳۰       | دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس) | -۱۷   | دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس) | ۷۹    | درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)                  |
| ۰/۹۸      | وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب) | ۰/۹   | وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب) | ۰/۹۴  | وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)         |
| ۲۴/۵      | استحکام کششی (مگاپاسکال)          | --    | ----                              | ۱۳/۴  | ویسکوزیته در ۲۰۰ درجه سلسیوس (سانتی پواز) |

جدول ۴. مشخصات CA مصرفی (Cloisite 15A)

| مقدار     | خصوصیات                                    |
|-----------|--|
| 2M2HT     | اصلاح کننده آلی                            |
| ۱۲۵       | مقدار اصلاح کننده در ۱۰۰ گرم رس (میلی گرم) |
| کمتر از ۲ | میزان رطوبت (درصد)                         |
| ۴۳        | کاهش رطوبت در اثر حرارت (درصد)             |
| ۱/۶۶      | چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)              |

### ۳. روش تحقیق

#### ۵-۲-۳. طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1559 (روش استاندارد آزمایش برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل تغییر شکل پلاستیک با دستگاه مارشال) صورت پذیرفته است. به منظور تعیین قیر بهینه، مصالح سنگی با هر نوع از قیر در مقادیر ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد نسبت به وزن مخلوط، ترکیب شده و در داخل استوانه استاندارد مارشال با ۷۵ ضربه (شبیه‌سازی ترافیک سنگین) چکش مارشال در هر طرف کوبیده شده است. مقدار قیر بهینه بر اساس پارامترهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، درصد فضای خالی آسفالت متراکم شده، روانی و درصد فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده به دست آمده است (ASTM D1559، ۱۹۹۸). مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های فاقد افزودنی، حاوی آمیخته پلیمری و نمونه حاوی SBS به ترتیب ۴/۸، ۵/۵ و ۵/۳ به دست آمده است.

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه، آزمایش‌های خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای، خستگی کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی روی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده انجام گرفت. نمونه‌های تیر خستگی با دستگاه تراکم مالشی

#### ۴-۱-۳. ساخت قیرهای اصلاح شده

در ابتدا دو پلیمر PP و SBR در نسبت‌های ۷۰/۳۰، ۵۰/۵۰ و ۳۰/۷۰ به وسیله دستگاه Twin-Screw extruder مدل ZSK-25، تحت فرایند اکستروژن قرار گرفتند (دور 80 rpm و دمای 160 °C) که خروجی آن گرانول‌های آمیخته پلیمری (شکل ۲) است. سپس، آمیخته پلیمری به میزان ۳، ۴ و ۵ درصد و پلیمر SBS به مقدار ۴ و ۵ درصد نسبت به وزن قیر تهیه گردیدند. فرایند اختلاط این ترکیبات با قیر در مدت ۶۰ دقیقه و در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس با سرعت برشی ۶۰۰۰ دور در دقیقه با دستگاه همزن دور زیاد انجام گرفت که در مدت زمان ۳۰ دقیقه انتهایی، مقدار ۱/۵ درصد نانورس پایدارکننده پلیمری به مخلوط اضافه گردید. در مجموع، با در نظر گرفتن قیر شاهد، شش نوع قیر خواهیم داشت.



شکل ۲. تصویر ظاهری آمیخته پلیمری ایجاد شده

1- High-shear mixer

خطی و نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از دستگاه ژیراتوری<sup>۱</sup> ساخته شده است.

### ۶-۳-۳. آزمایش پایداری ذخیره‌سازی<sup>۲</sup>

با افزودن پلیمر به قیر، تعادل فازها از بین رفته و به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که دو گروه پلیمر و آسفالتن<sup>۳</sup> برای حل نمودن فاز مالتن<sup>۴</sup> رقابت می‌کنند و در صورت ناسازگاری پلیمر با آسفالتن به صورت جذب کامل مالتن قیر، آسفالتن و پلیمر دو فاز جدا را تشکیل و مخلوطی غیریکنواخت ایجاد می‌نماید (برزگری و همکاران، ۲۰۰۲). این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO PP5، نمونه‌های قیر اصلاح شده درون یک استوانه با قطر ۳۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر ریخته می‌شود و سپس به‌طور عمودی به مدت ۴۸ ساعت در داخل یک گرم‌کن با دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. پس از آن به مدت ۴ ساعت در دمای ۵ درجه سلسیوس زیر صفر و در نهایت نمونه‌ها سرد شده و از طول به سه قسمت مساوی تقسیم و قسمت بالایی و پایینی برای ارزیابی پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح شده استفاده می‌گردد. اختلاف نقاط نرمی قسمت بالایی و پایینی نمونه اندازه‌گیری شده و می‌بایست این اختلاف کمتر از ۲/۵ درجه سلسیوس باشد تا نمونه از لحاظ پایداری تضمین گردد (AASHTO PP5، ۱۹۹۳).

### ۷-۴-۳. آزمایش مدول برجهدگی<sup>۵</sup>

مدول برجهدگی در طرح روسازی به‌عنوان پارامتری جهت تعیین ضخامت مورد نیاز لایه آسفالتی استفاده می‌شود. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D4123

با بارگذاری غیرمستقیم با مقدار کم انجام می‌گردد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس تحت بارگذاری نیمه سینوسی ۴۰۰ کیلو نیوتن با دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) قرار می‌گیرند. آزمایش مدول برجهدگی با دستگاه UTM 5<sup>۶</sup> انجام می‌شود و مقدار مدول برجهدگی از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. از آنجا که بارهای اعمالی در این آزمایش مقادیر کمی دارند، آزمون مدول برجهدگی مخرب نبوده و می‌توان از نمونه‌های آن برای انجام سایر آزمایش‌ها استفاده نمود (ASTM D4123، ۱۹۹۵).

$$M_R = \frac{P(v+0.234)}{\delta t} \quad (1)$$

که  $M_R$  مدول برجهدگی (مگاپاسکال)،  $P$  بار اعمال شده (نیوتن)،  $v$  نسبت پواسون،  $\delta$  تغییرشکل قابل برگشت (میلی‌متر) و  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر) است.

### ۸-۵-۳. آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم<sup>۷</sup>

آزمون کشش غیرمستقیم به‌منظور ارزیابی خستگی به‌وسیله دستگاه UTM 5 و به‌صورت تنش ثابت انجام گرفت. نمونه‌های آسفالتی در این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه عمل‌آوری شده و سپس تحت حداکثر بار ۲۷۰ کیلو پاسکال با فرکانس ۱۰ هرتز و دوره استراحت ۴:۱ قرار گرفتند. خروجی مورد استفاده از این آزمایش، نمودار تغییرشکل-سیکل بارگذاری بوده که با تقسیم آن به سه ناحیه می‌توان گفت که در ابتدا نمونه دچار تغییرشکل‌های تجمعی سریع، به دلیل فشرده شدن هوای داخل آن در اثر اعمال بار شده، و پس از عبور از ناحیه خطی در نهایت با شروع ترک‌های اولیه، نمونه به‌صورت

6- Universal Testing Machines

۷- Indirect tensile fatigue test

1- Superpave gyratory compactors

2- Storage Stability Test

3- Asphaltene

4- Maltene

5- Resilient modulus

کاهش میزان تنش و کنترل میزان تغییرشکل، نمونه می‌تواند تا مدت زیادی در مرحله سوم باقی بماند و معیار شکست، تعداد سیکل لازم تا رسیدن به نیمی از سختی اولیه می‌باشد.

تدریجی دچار شکست خواهد شد که تعداد سیکل بارگذاری تا رسیدن به این مرحله برابر عمر خستگی خواهد بود (کوک و چولاک، ۲۰۱۱).

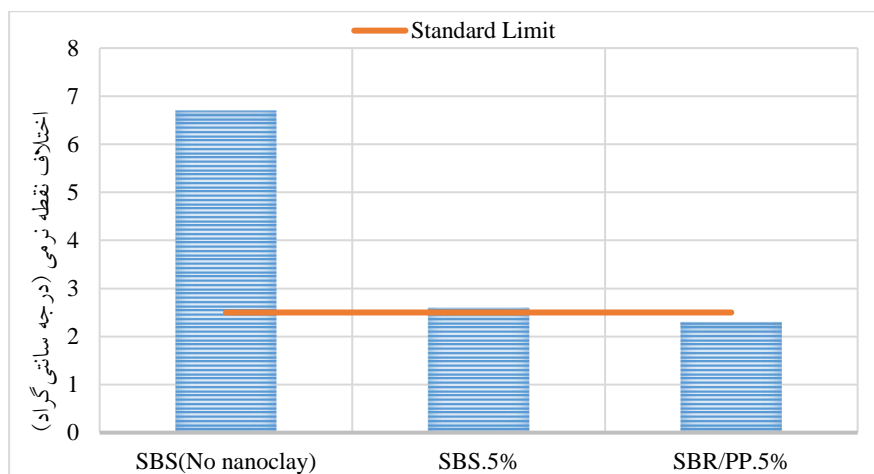
### ۹-۶-۳. آزمایش خستگی تیر خمشی<sup>۱</sup>

به منظور ارزیابی بهتر تأثیر افزودنی‌های پلیمری، آزمون تیر خمشی چهارنقطه‌ای نیز انجام گرفت. در این آزمایش که مطابق با استاندارد AASHTO T321 انجام گردید، نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده (در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت) تحت بارگذاری شبه سینوسی در فرکانس ۱۰ هرتز و در سطح کرنش ۶۰۰ میکرو استرین قرار گرفته و تعداد سیکل‌های بارگذاری تا رسیدن سختی نمونه به نیمی از سختی اولیه برابر عمر خستگی منظور گردیدند (AASHTO T321, 2014). نمودار سختی مستخرج از آزمایش کرنش ثابت به سه ناحیه تقسیم می‌شود. در قسمت اول، با کاهش سریع مدول سختی، ۱۰٪ عمر خستگی از بین می‌رود. در قسمت دوم، با گسترش ترک‌های ریز، مدول به صورت خطی کاهش پیدا کرده و حدود ۹۰٪ عمر خستگی نیز در این قسمت از بین می‌رود. با شروع مرحله سوم، ترک‌های بزرگی در نمونه ایجاد شده و نمونه به مرحله شکست نزدیک می‌شود. در حالت کرنش کنترل شده، به علت

### ۱۰-۴. نتایج و تفسیر داده‌ها

#### ۱۱-۱-۴ آزمون پایداری

گرائش، کشش بین ذرات و شناوری از نیروی‌هایی هستند که بر سیستم تعادل تأثیر می‌گذارند. در هنگام ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح شده، به دلیل اختلاف در پارامتر حلالیت و چگالی بین قیر و پلیمر، جدایی فازها اتفاق می‌افتد (صادقپور گلوباک و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج حاصل از آزمون پایداری در نمودار شکل ۳ روی ۵ نوع قیر حاوی افزودنی قابل مشاهده است. کاهش قابل توجه اختلاف نقاط نرمی، یا به عبارت دیگر افزایش ۶۰ درصدی پایداری پلیمر در قیر در مقایسه دو نمونه قیر حاوی ۵ درصد SBS، ناشی از تأثیر مناسب نانورس پایدار کننده است. نانورس با افزایش قابلیت ذخیره‌سازی نمونه‌ها توانسته است شاخص پایداری را در حدود استاندارد ۲/۵ درجه نگاه دارد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، نمونه حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری نیز پایداری مطلوبی در قیر دارد.



شکل ۳. آزمون پایداری ذخیره‌سازی

#### 1- Four-point beam fatigue test

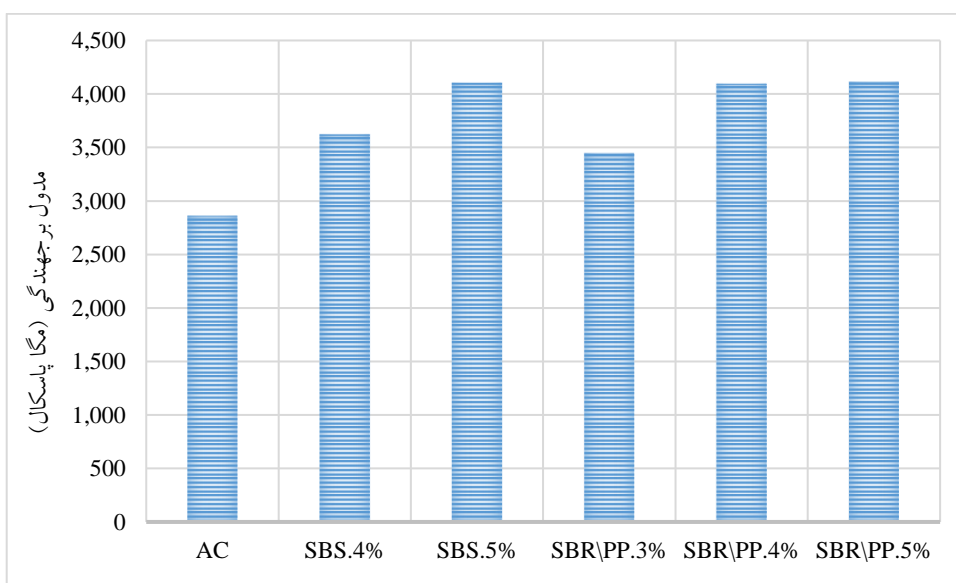


## ۱۲-۲-۴. مدول برجهندگی

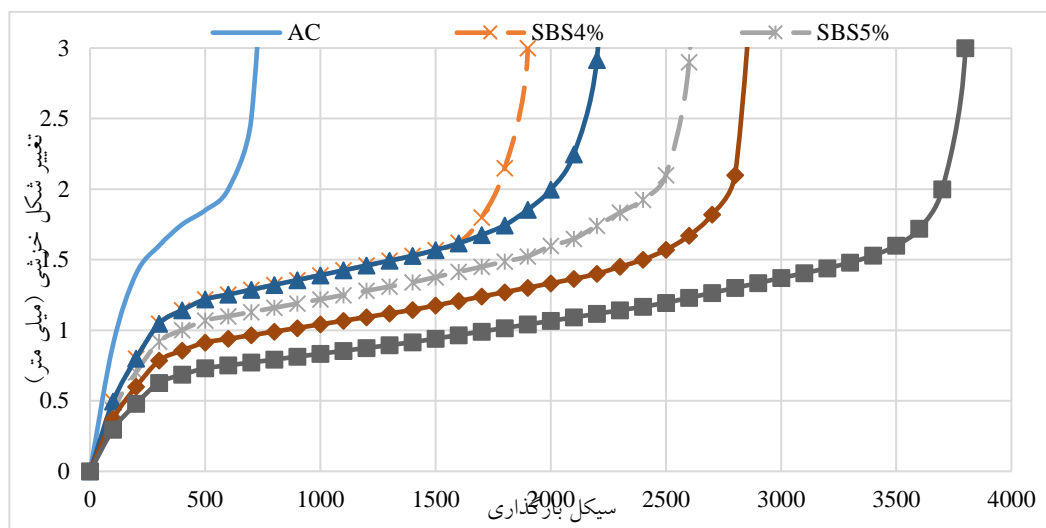
مدول برجهندگی پاسخ روسازی برحسب تنش‌های مکانیکی و کرنش‌های متناظر است و متغیر بسیار مهمی در رویکردهای طراحی مکانیکی برای سازه‌های روسازی است و با استفاده از آن ضخامت لایه‌های آسفالتی تعیین می‌شود. هرچه مقدار مدول برجهندگی بیشتر باشد، ضخامت لایه آسفالتی کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت که مقدار بیشتر از ۳/۱ گیگاپاسکال، پتانسیل ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد. چرا که با افزایش مدول برجهندگی قابلیت برگشت‌پذیری تغییرشکل‌های ایجاد شده کاهش می‌یابد. با تغییر در خواص قیر، مدول برجهندگی حساسیت بیشتری نسبت به مقاومت کششی از خود نشان می‌دهد (ایمانی‌نسب و جودکی، ۲۰۱۶). نتایج مدول برجهندگی در شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار افزودنی در مخلوط‌ها، مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. در نمونه‌های حاوی ۴ و ۵ درصد از آمیخته و ۵ درصد SBS، مدول برجهندگی تقریباً برابر مشاهده می‌شود. وجود مونومر سخت‌کننده استایرن در SBR و به‌خصوص در SBS منجر به افزایش سختی مخلوط گردیده است.

## ۱۳-۳-۴. آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

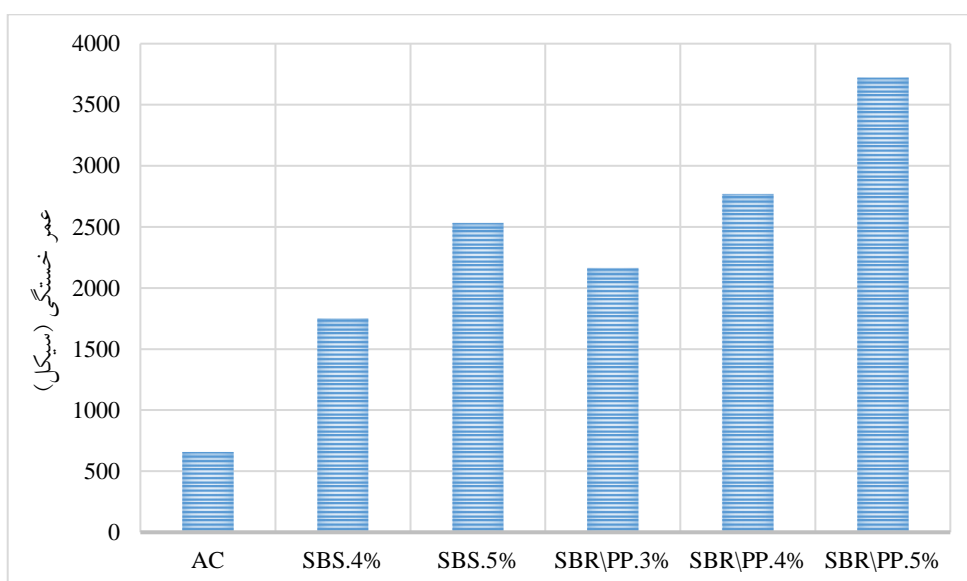
نمودار خروجی این آزمایش در شکل ۵ قابل مشاهده است. با افزایش مقدار افزودنی در نمونه‌های آسفالتی، تعداد سیکل‌های مورد نیاز تا گسیختگی نمونه نیز افزایش یافته و نمودارها حالت کشیده‌تری به خود گرفته‌اند. عمر خستگی مستخرج از این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. برای هر دو نوع افزودنی بالاترین عمر خستگی در نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ حاصل شده است. آمیخته پلیمری بهتر از SBS عمل نموده، به طوری که در نمونه حاوی ۰.۴٪ از آمیخته عمر خستگی تقریباً برابری با نمونه حاوی ۰.۵ درصد SBS داشته است و با افزایش مقدار آمیخته به ۰.۵٪، عمر خستگی به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. ساختار مشابه دو پلیمر SBS و SBR منجر شده تا هر دو پلیمر با عملکرد تقریباً مشابهی موجب افزایش عمر خستگی گردند. لیکن وجود لاستیک رابر در SBR موجب شده تا با غلبه تأثیر این پلیمر بر PP در نمونه‌های آسفالتی حاوی آمیخته پلیمری، خاصیت الاستیک مخلوط افزایش یابد و این آمیخته در میزان ۰.۵٪ بهترین نتایج را به همراه داشته باشد.



شکل ۴. مدول برجهندگی



شکل ۵. خروجی آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

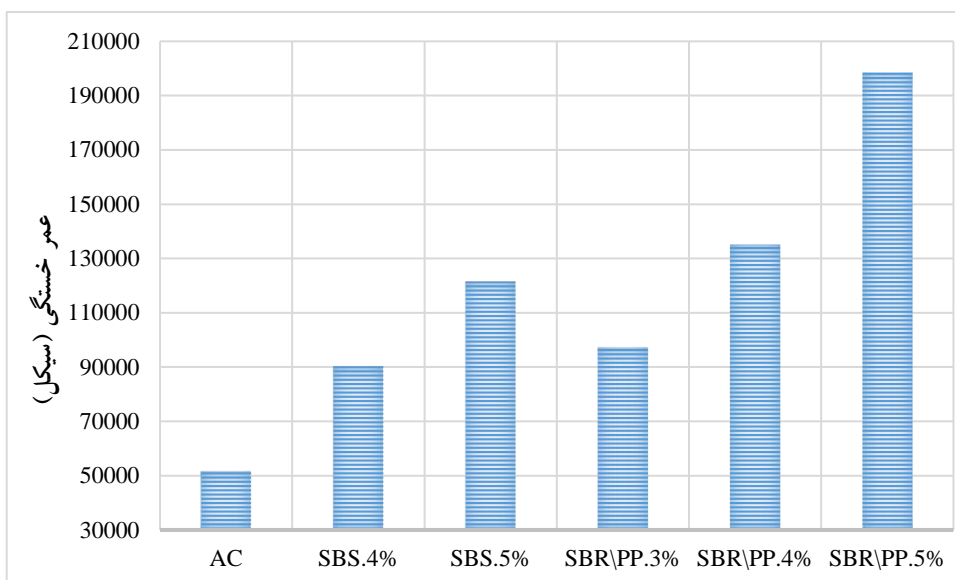


شکل ۶. عمر خستگی آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

نیز همچون نتایج آزمون کشش غیرمستقیم، نمونه حاوی ۵٪ آمیخته عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است. دو نمونه ۴ و ۵ درصدی از SBS به ترتیب مشابه با ۳ و ۴ درصد از آمیخته عمل می‌کنند و با استناد بر نتایج آزمون خستگی می‌توان گفت که تأثیر هر میزانی از پلیمر SBS معادل با یک درصد بیشتر در آمیخته پلیمری است.

#### ۱۴-۴-۴. نتایج آزمایش خستگی تیر خمشی

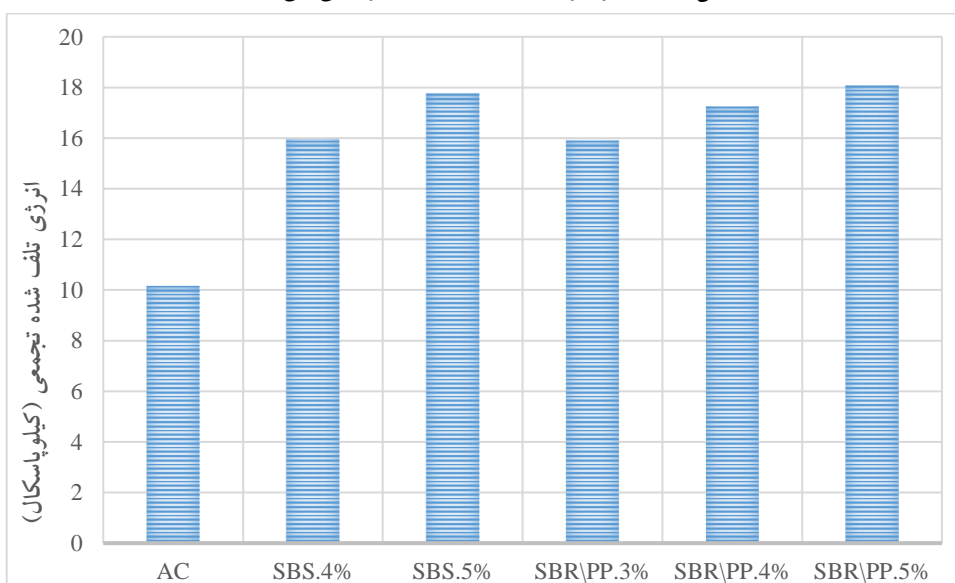
عمر خستگی حاصل از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای که بیانگر تعداد سیکل‌های کاهنده سختی به نصف مقدار اولیه آن می‌باشد، در شکل ۷ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده شاهد افزایش عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد می‌باشیم. در این آزمایش



شکل ۷. عمر خستگی آزمایش تیر خمشی

تلف شده تجمعی<sup>۱</sup> نمونه‌های آسفالتی قابل مشاهده است. این نمودار با روند تغییرات عمر خستگی کاملاً مطابقت دارد. به طوری که با افزایش میزان پلیمرها، مقدار انرژی تلف شده نیز بیشتر گشته است و نمونه‌های حاوی افزودنی دارای انرژی تلف شده بیشتری نسبت به نمونه فاقد افزودنی می‌باشند.

زمانی که ماده‌ای در برابر بار خارجی اعمال شده مقاومت می‌کند، میزان انرژی وارد شده به آن ماده برابر با سطح زیر منحنی تنش-کرنش می‌باشد. در این نمودار، برای یک ماده غیرالاستیک به دلیل اینکه مسیر بارگذاری و باربرداری روی هم قرار نمی‌گیرند، مقداری از انرژی وارده تلف خواهد شد. در نمودار شکل ۸، مقادیر انرژی



شکل ۸. انرژی تلف شده تجمعی

#### 1- Cumulative dissipated energy

## ۵. جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، از همپوشانی خواص دو پلیمر SBR\PP از طریق ترکیب آن‌ها با یکدیگر به منظور بهبود خواص خستگی آسفالت حداقل به میزان پلیمری پر کاربرد نظیر SBS استفاده شد. در راستای افزایش پایداری پلیمرها در قیر و در حین ذخیره سازی و اختلاط مخلوط‌های آسفالتی از نانورس استفاده شد. دستاوردهای این پژوهش به شرح بندهای زیر می‌باشد:

با به کارگیری نانورس می‌توان پایداری آمیخته‌های پلیمری در مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داد که این امر به تبع موجب یکنواختی در تولید آسفالت گشته و نهایتاً بهبود خواص عملکردی را ایجاد می‌نماید.

نتایج آزمون مدول برجهندگی نشان داد که آمیخته‌های پلیمری نیز می‌توانند همچون SBS موجب افزایش مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی گردند.

آزمون‌های خستگی نشان داد که آمیخته‌های پلیمری می‌توانند همچون SBS موجب بهبود خستگی مخلوط‌های آسفالتی گردند و حتی در آمیخته‌های حاوی مقادیر بیشتری از SBR این بهبود خرابی تا بیش از ۵۰٪ نسبت به این پلیمر گران قیمت نیز مشاهده شده است.

همپوشانی خواص دو پلیمر PP و SBR توانسته است ترکیبی را ایجاد نماید که در بهبود ترک‌های خستگی بهتر از پلیمر SBS عمل نماید. آمیخته SBR\PP می‌تواند موجب خواص دمای کم گردد و این ترکیب ارزان قیمت جایگزین مناسبی برای پلیمر گران قیمت SBS بوده و با رویکرد اقتصادی می‌تواند در صنعت راه سازی به کار گرفته شود.

نتایج تحلیل دو به دو روی عمر خستگی نمونه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. وقوع حالت تفاوت معنی - دار بین تک تک نمونه‌ها با نمونه فاقد افزودنی نشان می‌دهد که آمیخته‌های پلیمری و پلیمر SBS تأثیر قابل توجهی بر نتایج داشته‌اند، که این تأثیرات با توجه به نمودار عمر خستگی، افزایش قابل ملاحظه‌ای در بهبود عملکرد خستگی دارد. به کارگیری ۳ و ۴ درصد آمیخته پلیمری به ترتیب می‌تواند هم اثر با استفاده از ۴ و ۵ درصد پلیمر SBS باشد. این امر نشان می‌دهد که آمیخته‌ها در مقدار استفاده کمتر نسبت به پلیمر SBS، عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. ایجاد حالت معنی دار بین افزودنی ۵٪ آمیخته با تک تک نمونه‌ها خود نشان از افزایش قابل توجه تأثیر این پلیمر در مقایسه با سایر گروه‌های قیری است.

جدول ۵. نتایج تحلیل آماری Tukey روی نتایج عمر

|           | خستگی تیر خمشی |       |       |           |           |           |
|-----------|----------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|
|           | AC             | SBS4% | SBS5% | SBR\PP.3% | SBR\PP.4% | SBR\PP.5% |
| AC        | -              | S     | S     | S         | S         | S         |
| SBS.4%    |                | -     | S     | N         | S         | S         |
| SBS.5%    |                |       | -     | S         | N         | S         |
| SBR\PP.3% |                |       |       | -         | S         | S         |
| SBR\PP.4% |                |       |       |           | -         | S         |
| SBR\PP.5% |                |       |       |           |           | -         |

## ۶. مراجع

- چاوشیان نائینی، س. ف. و عامری، م. ۱۳۹۶. "بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR\PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی. فصل‌نامه مهندسی حمل‌ونقل، ۹ (ویژه‌نامه روسازی): ۱۱۹-۱۰۵.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، تهران.
- عامری، م.، یوسفی، ع. ا. و شکرگذار، م. ۱۳۹۴. "اثر آمیخته پلیمری بر رفتار قیر". هفتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران.
- AASHTO PP5. 1993. "The laboratory evaluation of modified asphalt systems". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- AASHTO T321-14. 2014. "Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- Abdul-Mawjoud, A. A. and Thanoon, L. S. 2015. "Evaluation of SBR and PS-modified asphalt binders and HMA mixtures containing such binders". Appl. Res. J. 1(9): 460-469.
- Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S. S. and Yadollahi, G. 2011. "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction". Constr. Build. Mater., 25(3): 1379-1387.
- Ameri, M., Vamegh, M., Imaninasab, R. and Rooholamini, H. 2016. "Effect of nanoclay on performance of neat and SBS-modified bitumen and HMA". Petrol. Sci. Technol., 34(11-12): 1091-1097.
- Asphalt Institute. 2007. "MS-4 The Asphalt Handbook". 7<sup>th</sup> Edition.
- ASTM D1599. 1998. "Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus". ASTM International, PA, USA.
- ASTM D4123. 1995. "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures". ASTM International, PA, USA.
- Barzegari, M. R., Yousefi, A. A. and Zeynali, M. 2002. "Bitumen modification via PS/PB Blend". Iran. J. Polymer Sci. Technol., 16(67): 303-311.
- Cong, L., Peng, J., Guo, Z. and Wang, Q. 2017. "Evaluation of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy". J. Mater. Civ. Eng., 29(3): D4015003.
- Imaninasab, R. and Joodaki, S. 2016. "Performance evaluation of polyamine anti-stripping additives". Proc. Inst. Civ. Eng.-Constr. Mater. Doi.org/10.1680/jcoma.15.00066.
- Khattak, M. and Baladi, G. 2001. "Fatigue and permanent deformation models for polymer-modified asphalt mixtures". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1767: 135-145.
- Kök, B. V. and Çolak, H. 2011. "Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt". Constr. Build. Mater., 25(8): 3204-3212.
- Kok, B. V. and Yilmaz, M. 2009. "The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt". Constr. Build. Mater., 23(5): 1999-2006.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Luo, H., Wang, X. and Xing, B. 2015. "Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt". Constr. Build. Mater., 74: 235-240.
- Lu, X. and Isacsson, U. 2000. "Modification of road bitumens with thermoplastic polymers". Polymer Testing, 20(1): 77-86.
- Majidzadeh, K. and Brovold, F. N. 1968. "Effect of water on bitumen-aggregate mixtures". Highway Research Board.
- Navarro, F. J., Partal, P., García-Morales, M., Martín-Alfonso, M. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., Bordado, J. C. M. and Diogo, A. C. 2009. "Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: A comparative analysis". J. Ind. Eng. Chem., 15(4): 458-464.
- Nciri, N., Kim, N. and Cho, N. 2017. "New insights into the effects of styrene-butadiene-styrene polymer modifier on the structure, properties, and performance of asphalt binder: The case of AP-5 asphalt and solvent deasphalting pitch". Mater. Chem. Phys., 193: 477-495.
- Robinson, H. 2005. "Polymers in asphalt". iSmithers Rapra Publishing, 128 p.
- Rossmann, S. 2007. "Technical guideline: The use of modified binders in road construction". Pretoria, Asphalt Academy, Second Edition.

- Sadeghpour Galooyak, S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A. 2010. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites". *Constr. Build. Mater.*, 24(3): 300-307.
- Salehfard, R., Abdi, A. and Amini, B. 2016. "Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(5): 04016282.
- Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y. 2003. "SBS/carbon black compounds give asphalts with improved high-temperature storage stability". *Polym. Polym. Composites*, 11(6): 477-485.
- Yousefi, A. A., Ait-Kadi, A. and Roy, C. 1998. "Effect of elastomeric and plastomeric tougheners on different properties of recycled polyethylene". *Adv. Polym. Technol.*, 17(2): 127-143.