

## مقایسه‌ی خواص عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری و گرانول خشک پلیمری

سید حمیدرضا صاحب‌الزمانی\*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سید محمدضیاء علوی، استادیار، دانشکده دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اورنگ فرزانه، دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [hsahebzamani@ut.ac.ir](mailto:hsahebzamani@ut.ac.ir)

دریافت: ۹۷/۰۴/۰۶ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۳۸۰-۳۶۹

### چکیده

چندین سال است که برای تولید مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی از قیرهای اصلاح شده با پلیمر استفاده شده است. برای تولید قیرهای اصلاح شده با پلیمر با خصوصیات مهندسی مطلوب، تجهیزات و فناوری‌هایی مورد نیاز هستند که ممکن است همواره در دسترس نباشد. طی سال‌های اخیر، جهت تسهیل استفاده از پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی، یک روش نوین به صنعت راهسازی معرفی شده است. در این روش، گرانول پلیمری متشکل از ۴۰٪ استایرن بوتادین استایرن (SBS) را می‌توان در حین فرایند تولید آسفالت در کارخانه آسفالت بدون نیاز به هرگونه تجهیزات خاص به طور مستقیم به داخل میکسر اضافه نمود. با استفاده از این روش، استفاده از پلیمرها را می‌توان حتی برای پروژه‌های کوچک تسهیل کرده و توسعه داد. هرچند، با توجه به نوظهور بودن این فناوری، جهت ارزیابی اثربخشی آن تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. در این مقاله، سختی و خصوصیات مقاومتی بتن آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی، شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمر-قیری و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلیمر، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین اثر پیرشدگی ناشی از اکسیداسیون بلند مدت بر روی سختی و مقاومت مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول پلیمری دارای نتایج مشابهی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS است.

واژه‌های کلیدی: استایرن بوتادین استایرن SBS، پیرشدگی بر اثر اکسیداسیون، ترک‌های حرارتی، خستگی، شیارشدگی، گرانول‌های پلیمر-قیری، مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده

### ۱-مقدمه

اصلاح شده با پلیمر استفاده کرد. تحقیقات انجام شده توسط موسسه آسفالت آمریکا (انستیتو آسفالت، ۲۰۰۱) نشان داده است که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی رایج ترک‌خوردگی را تا ۵۰ درصد و شیارشدگی را تا حدود ۶۰ درصد کاهش می‌دهند. مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر می‌توانند عمر سرویس‌دهی روسازی را تا ۲۵ درصد افزایش (بین ۲ تا ۱۰ سال عمر بیشتر) داده و در نتیجه هزینه‌ها و بازه‌های زمانی تعمیر و نگهداری و نوسازی راه کاهش می‌یابد. خصوصیات قیرهای اصلاح شده با

مزایای استفاده از پلیمرها برای بهبود خواص مهندسی قیر و در نتیجه مخلوط‌های آسفالتی به خوبی شناخته شده است. هدف اصلی استفاده از پلیمرها، افزایش مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشدگی)، خستگی و ترک‌های حرارتی است. با افزایش چشمگیر حجم ترافیک و وزن کامیون‌ها، روسازی‌های ساخته شده با مخلوط‌های آسفالتی متداول دارای عملکرد خوبی نبوده و اغلب پیش از طول عمر طراحی مورد انتظار، دچار خرابی‌های سازه‌ای و عملکردی می‌شوند. برای رفع این مشکل، می‌توان از مخلوط‌های آسفالتی

(۸۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرواسترین) اندازه‌گیری شد، حدود ۱۰۰ برابر بزرگتر از مخلوط آسفالتی معمولی بود (کیم و همکاران، ۲۰۱۳).

همچنین هاو و همکاران (هاو و همکاران، ۲۰۱۷) دریافتند که اصلاح یک قیر نرم (با درجه نفوذ ۱۴۰-۱۲۰) با ۵٪ SBS در ارضای معیارهای لازم برای مصرف در مکانی با حداقل دمای ۴۲- درجه سانتیگراد در چین موفق بود.

خدایی و مهرآرا (خدایی و همکاران، ۲۰۰۹) عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده حاوی مقادیر مختلف SBS را با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی در دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق مشخص شد که استفاده از ۵٪ SBS نسبت به میزان ۴٪ و ۶٪، اثر بیشتری در بهبود خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر شیارشدگی داشت. بر اساس مطالعه ییلماز و جولوگلو (ییلماز و همکاران، ۲۰۱۳)، با در نظر گرفتن راندمان و کارایی قیرهای اصلاح شده با SBS و سایر قیرهای طبیعی، پلیمر SBS مناسب‌ترین نوع افزودنی شناخته شد. عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با SBS با استفاده از دستگاه آزمایش شبیه‌ساز بار و سیله نقلیه (ترافیک) سنگین (HVS) ارزیابی گردید (سیرین و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج حاکی از آن بود که عملکرد مقاطع روسازی ساخته شده با مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با SBS نسبت به مقاطع ساخته شده با مخلوط‌های آسفالتی معمولی به میزان قابل توجهی بهتر است. مکانیسم شیارشدگی قطعات دارای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر تنها ناشی از تراکم بود (یعنی ضعف برشی مشاهده نشد).

طی تحقیقاتی که توسط مرکز ملی تکنولوژی آسفالت انجام شد، دو قطعه روسازی با استفاده از مخلوط آسفالتی معمولی و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با مقدار زیادی پلیمر SBS (قیر مخلوط حاوی ۷٫۵٪ SBS بود) ساخته شد که ضخامت رویه ساخته شده از مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS ۳۲ میلی‌متر (۱٫۲۵ اینچ) نازک‌تر بود. نتایج این تحقیق نشان داد قطعه آزمایشی که با مخلوط آسفالتی حاوی مقدار زیادی پلیمر SBS ساخته شده بود، پس از عبور ۲۰ میلیون محور استاندارد (ESAL) و قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی به مدت ۶ سال، مقاومت بسیار بالاتری در مقابل شیارشدگی و ترک خوردگی خستگی داشت. کیفیت رانندگی

پلیمر به خصوصیات و میزان پلیمر، نوع قیر پایه و فرایند اتصال در شبکه پلیمری بستگی دارد (لو و همکاران، ۲۰۰۰). در حال حاضر، مرسوم‌ترین پلیمر مصرفی برای اصلاح قیر، استایرن بوتادین استایرن (SBS) است و پس از آن، پلیمرهایی چون استایرن بوتادین رابر (SBR)، اتیلن وینیل استات (EVA) و پلی اتیلن مطرح هستند (آیری، ۲۰۰۴).

پلیمرهای SBS، همچون الاستومرها، باعث افزایش الاستیسیته قیر می‌شوند که این شاخصه آن‌ها را به مناسب‌ترین پلیمر برای اصلاح قیر تبدیل می‌کند (سنگوز و همکاران، ۲۰۰۸). زمانی که SBS با قیر مخلوط می‌شود، فاز الاستومریک آن، اجزای سبک قیر پایه (مانند روغن‌های آروماتیک) را جذب کرده و حجم آن تا ۹ برابر حجم اولیه افزایش می‌یابد و یک شبکه سه‌بعدی در قیر ایجاد می‌کند.

## ۲- پیشینه تحقیق

ارزیابی خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر، کانون توجه مطالعات بسیاری در زمینه روسازی بوده است. مدرس (مدرس، ۲۰۱۳) تاثیر پلیمر SBS بر روی خصوصیات خستگی و سختی مخلوط‌های آسفالتی را مورد ارزیابی قرار داد و متوجه شد در دمای ۲۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط‌های ساخته شده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS، مقاومت کششی غیرمستقیم بالاتری نسبت به مخلوط‌های متداول داشتند، اما این روند در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد وارونه بود. مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر SBS به طور کلی، سختی بالاتری نسبت به مخلوط‌های مرسوم داشتند. همچنین مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر در مقایسه با مخلوط‌های مرسوم، به ویژه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کرنش بالاتر (بیشتر از ۲۵۰ میکرو استرین) عمرخستگی بیشتری داشتند. کیم و همکاران (کیم و همکاران، ۲۰۱۳)، خصوصیات مقاومتی و خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با SBS را جهت استفاده در روسازی عرشه پل‌ها، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر SBS نسبت به مخلوط‌های مرسوم در هر دو دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی غیر مستقیم (IDT) کمتری دارند. عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سطح کرنش بالا

فرایند اضافه کردن افزودنی‌ها به مخلوط‌های آسفالتی در حین ساخت مخلوط، به عنوان "روش خشک" شناخته می‌شود. تا به امروز، تنها اطلاعات تجاری در مورد این نوع افزودنی‌های پلیمری در دسترس است. بنابراین، برای درک کامل اثربخشی و محدودیت‌های آن لازم است تا تحقیقات بیشتر انجام شود.

### ۳-اهداف

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری (SBS) در مقایسه با مخلوط‌های تولید شده با قیر معمولی و قیر اصلاح شده با SBS است. سختی، پتانسیل شیارشدگی، مقاومت در برابر خستگی، ترک خوردگی در دمای پایین و حساسیت پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۴-طرح آزمایشگاهی

#### ۴-۱-مواد و مصالح استفاده شده

مصالح شکسته دولومیتی استفاده شده در مخلوط‌های آسفالتی از معدن اسب چران شرکت کندوان پارس واقع در نزدیکی تهران فراهم گردیدند. حداکثر اندازه اسمی مصالح ۱۹ میلی‌متر بود. دانه‌بندی مصالح و خصوصیات آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

قیر خالص با درجه عملکردی ۱۶-۶۴ از پالایشگاه پاسارگاد واقع در نزدیکی تهران تهیه شد. این قیر برای تولید مخلوط اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری، مخلوط آسفالتی معمولی و به عنوان قیر پایه جهت تولید قیرهای پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. قیرهای اصلاح شده پلیمری در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران تولید شدند. روش تولید قیر پلیمری به طور خلاصه شامل اختلاط قیر پایه و پلیمر SBS (به میزان ۴٪ وزنی قیر پایه) در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه با استفاده از همزن برشی با دور گردش بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه بود. براساس اطلاعات ارائه شده توسط کارخانه تولید کننده، گرانول‌های پلیمری-قیری دارای ۴۰٪ SBS و ۴۰٪ قیر و ۲۰٪ دیگر مواد خاص جهت پایدارسازی است. مقدار گرانول‌های پلیمری-قیری برابر ۱۰ درصد وزنی قیر بهینه مخلوط آسفالتی معمولی

رویه اصلاح شده با میزان بالایی از پلیمر، با گذر زمان، دچار زوال نشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه نانتینگهام (محمد، ۲۰۱۴) نشان داد که استفاده از قیر اصلاح شده حاوی ۵ و ۷ درصد SBS، عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشید. اما با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، استفاده از ۵ درصد SBS به عنوان مقدار بهینه پیشنهاد شد. با توجه به عمر طولانی مورد انتظار برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر، پتانسیل پیرشدگی قیرهای اصلاح شده با پلیمر از اهمیت بالایی برخوردار است. زو و همکاران (زو و همکاران، ۲۰۰۷) دریافتند که اکسیداسیون حرارتی در SBS به طور عمده در بلوک بوتادین در اثر یک عکس‌العمل خود کاتالیز شده رخ می‌دهد. وانگ و همکاران (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳) مشاهده کردند که شبکه پلیمری قیر حاوی SBS در طول پیرشدگی کوتاه مدت به ساختاری با سایز مولکولی متوسط تجزیه شد. پس از پیرشدگی بلندمدت، قیر اصلاح شده با SBS به طور کامل تجزیه شد و حساسیت نسبت به دمای آن با توجه به از دست دادن اثرات اصلاحی، نزدیک به قیر پایه بود. همچنین ژانگ و همکاران (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷) دریافتند که تجزیه پلیمر SBS، در اثر پیرشدگی با تابش اشعه ماوراء بنفش نسبت به اکسیداسیون حرارتی شدیدتر است. قیرهای اصلاح شده با پلیمر طی فرایند اختلاط قیر و پلیمر در دمای بالا و معمولاً با استفاده از یک همزن برشی با دور گردش بالا تولید می‌شوند. استفاده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر در کشورهای در حال توسعه مانند ایران هنوز یک فناوری جدید است و به دلیل محدودیت منابع و مشکلات لجستیکی (اعم از نیاز به واحد اصلاح قیر در کارخانه آسفالت، مخازن اضافی قیر داغ، تجهیزات پمپاژ و مشکلات پایداری قیر پلیمری در مخازن)، صنعت هنوز به استفاده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر ترغیب نشده است. همچنین استفاده از قیرهای اصلاح شده پلیمری برای تولید مخلوط‌های آسفالتی در مقیاس کوچک مخصوصاً در زمان استفاده از کارخانه آسفالت‌های منقطع کارآمد نیست. طی سال‌های اخیر، تولید گرانول‌های پلیمری-قیری با درصد بالایی از پلیمر توسعه یافته و به صنعت روسازی معرفی شده است تا استفاده از پلیمرها در مخلوط‌های آسفالتی را تسهیل کند. گرانول‌های پلیمری را می‌توان در حین فرآیند تولید مخلوط آسفالتی مستقیماً به داخل میکسر اضافه کرد.

اصلاح شده با گرانول خشک پلیمری-قیری و قیر پلیمری یکسان بوده است. شکل ۱ گرانول‌های SBS و گرانول‌های پلیمری-قیری مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پیشنهاد شده و هنگام تولید مخلوط آسفالتی و پیش از اختلاط سنگدانه‌ها با قیر به طور مستقیم به مصالح اضافه گردید. لازم به ذکر است، میزان پلیمر موجود در مخلوط‌های آسفالتی

جدول ۱. دانه‌بندی استفاده شده در مخلوط‌های آسفالتی

الک	درصد رد شده	محدوده رواداری مجاز طبق نشریه ۲۳۴
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۹۵	۱۰۰-۹۰
نمره ۴	۵۸	۷۴-۴۴
نمره ۸	۳۵	۵۸-۲۸
نمره ۵۰	۱۰	۲۱-۵
نمره ۲۰۰	۵	۱۰-۲

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

نتیجه	روش آزمایش
۲۳ درصد	سایش لس آنجلس مصالح درشت دانه (AASHTO T96)
۰,۱ درصد	افت وزنی در برابر سولفات سدیم مصالح درشت دانه (AASHTO T104)
۰,۳ درصد	درصد تطویل و تورق (ASTM D4791)
۱۰۰ درصد	درصد شکستگی در یک وجه (ASTM D5821)
۱۰۰ درصد	درصد شکستگی در دو وجه (ASTM D5821)
۱ درصد	افت وزنی در برابر سولفات سدیم مصالح ریز دانه (AASHTO T104)
۴۶ درصد	گوشه داری مصالح ریزدانه (ASTM C1252)
۸۴ درصد	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه (AASHTO T176)
N.P.	نشانه‌ی خمیری (AASHTO T90)



شکل ۱. SBS خام جهت افزودن و اصلاح قیر (بالا) گرانول پلیمر-قیری جهت افزودن و اصلاح مخلوط آسفالتی (پایین)

## طرح اختلاط

- آزمایش دستگاه شیار چرخ هامبورگ (HWT)
  - آزمایش خزش دینامیکی
  - مقاومت در برابر ترک‌های خستگی: آزمایش تیرچه خستگی ۴ نقطه‌ای
  - مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی: آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم.
- به جز آزمایش مدول دینامیکی که در آزمایشگاه و مرکز تحقیقات شرکت Eiffage و در کرباس فرانسه انجام شد، دیگر آزمایشات در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران انجام گرفت.

## آزمایش مدول دینامیکی

تراکم مخلوط‌هایی که دچار پیرشدگی بلند مدت و کوتاه مدت شده‌اند، با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری و با ۷٪ فضای خالی، انجام پذیرفت. دو نمونه استوانه‌ای با قطر ۵۲ میلی‌متر از هر نمونه SGC با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر خاص که برای این منظور طراحی شده است، به دست آمد (- شکل ۲ الف). برای انجام آزمایش مدول دینامیکی، نمونه‌های مغزه‌گیری شده، از هر دو طرف برای تهیه یک نمونه ۱۳۰ میلی‌متری بریده شدند. نمونه‌های ساخته شده، با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی MTS 370 در فرانسه آزمایش شدند (شکل ۲ ب). مدول دینامیکی در فرکانس ۱، ۱۰، ۱۰۰، ۲۰ هرتز در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و ۰ درجه سانتی‌گراد و در فرکانس ۱، ۱۰، ۱۰۰، ۲۰ هرتز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

نمونه مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری سینوسی با دامنه کرنش ۲۵ میکرو-استرین قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که در حین آزمایش آسیبی به نمونه وارد نمی‌شود. منحنی اصلی مدول دینامیکی با عبور دادن یک تابع S شکل (معادله ۱) از داده‌های اندازه‌گیری شده و با استفاده از ضریب انتقال آرنیوس (معادله ۲) به منظور انتقال فرکانس‌های آزمایش، در دمای مرجع صفر درجه سانتیگراد به دست آمد.

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \times \log(f_r))}} \quad (1)$$

که در آن  $E^*$  مدول دینامیکی،  $\delta$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای ثابت هستند که باید کالیبره شوند و  $f_r$  فرکانس کاهش یافته در دمای مرجع ( $T_r$ ) است.

مخلوط‌های آسفالتی بر اساس روش طرح مارشال تهیه شدند. این روش طرح اختلاط در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه ۲۳۴، مشخص شده است. میزان قیر بهینه برای همه مخلوط‌ها با توجه به ۴٪ فضای خالی، ۴٫۵٪ وزن کل مخلوط تعیین شد. فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی پر شده با قیر (VFA) و مقدار فیلر به قیر بهینه به ترتیب برابر ۱۴٪، ۷۰٪ و ۱/۱ بود. این طرح اختلاط برای تمامی مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. تمامی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۱۵۵ سانتی‌گراد تولید شدند. گرانول‌های پلیمری-قیری پیش از ترکیب مصالح با قیر PG64-16 در دمای اتاق، به مصالح گرما دیده اضافه شده بودند. لازم به ذکر است که میزان قیر موجود در گرانول‌های پلیمری، با توجه به دستورالعمل و راهنمای کارخانه تولیدکننده، از میزان قیر بهینه کسر گردید.

پس از اختلاط، برای شبیه‌سازی شرایط پیرشدگی کوتاه مدت که در حین تولید مخلوط در کارخانه آسفالت رخ می‌دهد، براساس AASHTO R30، تمامی مخلوط‌ها به مدت ۴ ساعت در حالت غیرمتراکم و در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد به صورت کوتاه مدت پیر شدند. برای شبیه‌سازی شرایط پیرشدگی بلندمدت که در طی سالیان اتفاق می‌افتد، مخلوط‌های غیرمتراکم به مدت ۷ روز در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد پیر شدند. شرایط پیرشدگی بلندمدت مخلوط غیرمتراکم، براساس یافته‌های فعلی از پروژه NCHRP 9-54 انتخاب گردید (کیم و همکاران، ۲۰۱۵).

برای انجام آزمایش‌های عملکردی، از مخلوط‌های تهیه شده با میزان پیرشدگی‌های مختلف نمونه‌هایی با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری (SGC) و غلطک متراکم‌کننده، ساخته شد. ساخت مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران انجام گرفت.

## روش آزمایش

ارزیابی مخلوط از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های مخلوط که در ادامه بیان می‌گردد، انجام پذیرفت. جزئیات روش‌های آزمایش در ادامه ارائه می‌گردد.

- سختی: آزمایش مدول دینامیکی
- مقاومت در برابر شیاردگی

که در آن  $a_T$  ضریب انتقال،  $E_a$  انرژی فعالسازی،  $R$  ثابت گاز،  $T$  دمای آزمایش ( $^{\circ}K$ ) و  $T_r$  دمای مرجع ( $^{\circ}K$ ) می باشد.

$$\log(a_T) = \frac{E_a}{2.303 \times R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2)$$



شکل ۲. دستگاه بارگذاری هیدرولیک MTS 370 جهت انجام آزمایشات مدول دینامیکی (بالا) و ابزار طراحی شده برای کرگیری (پایین)

#### آزمایش تیرچه خستگی

نمونه‌های منشوری ( $380 \times 630 \times 50$  میلیمتر) از برش دال‌های متراکم شده با استفاده از غلتک با میزان حفرات هوای ۴٪ تهیه شدند. آزمایش تیرچه خستگی چهار نقطه‌ای مطابق استاندارد AASHTO T321 انجام شد. بارگذاری نیم‌سینوس با فرکانس ۱۰ هرتز بر روی نمونه‌ها اعمال شد. برای هر نوع مخلوط، آزمایش در چهار سطح کرنش (۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین) انجام گرفت. منحنی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، بر اساس رابطه بین تعداد سیکل بارگذاری تا شکست نمونه و درصد کرنش به دست آمد. آزمایش تیرچه خستگی تنها بر روی مخلوط‌های با پیرشدگی کوتاه مدت انجام گرفت.

#### آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

مخلوط‌هایی که دچار پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت شده بودند، توسط دستگاه تراکم ژیراتوری تا مقدار حفرات هوای ۷٪ متراکم شدند. دو نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر از وسط نمونه متراکم شده با دستگاه ژیراتوری برش داده شد. آزمایش کشش غیرمستقیم

#### آزمایش دستگاه شیار چرخ هامبورگ (HWT)

نمونه‌های مخلوط آسفالتی که دچار پیرشدگی کوتاه‌مدت شدند، در ابعاد  $300 \times 300 \times 50$  میلی‌متر، متراکم شدند. آزمایش دستگاه شیار چرخ هامبورگ بر طبق استاندارد AASHTO T324، در شرایط خشک و در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد، انجام گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران انجام شد.

#### آزمایش خزش دینامیکی

مخلوط‌های آسفالتی که دچار پیرشدگی کوتاه‌مدت شدند، برای تولید یک نمونه با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۵ میلیمتر و با درصد حفرات هوای ۶٪، با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری متراکم شدند. آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی مطابق استاندارد EN12697-25 و در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. بارگذاری سیکلیک ۳۰۰ کیلو پاسکال به نمونه‌ها اعمال شد. هر سیکل شامل یک ثانیه بارگذاری و یک ثانیه استراحت می‌شد. پیش از آغاز آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت اثر پیش‌بارگذاری استاتیک به میزان ۱۲ کیلو پاسکال قرار گرفتند.

گرانول‌های پلیمری- قیری نسبت به مخلوط‌های معمولی به ترتیب حدود ۱/۶ و ۱/۴ برابر بود (شکل ۳ ب).

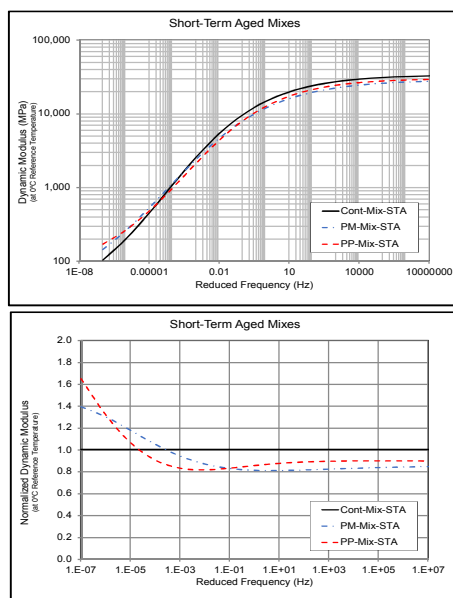
در شرایط پیرشدگی بلندمدت، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، سختی مخلوط‌های آسفالتی در فرکانس‌های بزرگتر از ۰/۰۰۱ هرتز (معادل دماهای پایین‌تر) نسبتاً مشابه است. همانطور که در مطالعات پیشین گزارش شده بود، مدول‌های مشابه مخلوط‌های معمولی و مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها، می‌تواند نشان دهنده تجزیه ساختار پلیمر به علت پیرشدگی بلندمدت باشد. با کاهش فرکانس‌ها، تفاوت در مخلوط‌ها محسوس شد. در فرکانس‌های کمتر از ۰/۰۰۱ هرتز (معادل دمای بالاتر)، مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط‌های معمولی سختی بیشتری داشتند. در مجموع، مشخص شد که اختلاف بین مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول پلیمری-قیری و مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر، با کاهش فرکانس، افزایش یافته و در شرایط پیری بلندمدت محسوس‌تر گشت. در فرکانس  $1 \times 10^{-7}$  هرتز، مدول مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول پلیمری-قیری و مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر تقریباً ۴ تا ۶ برابر سختی مخلوط‌های اصلاح نشده بود.

مطابق استاندارد AASHTO T322 انجام پذیرفت. بارگذاری در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد، به صورت قطری و با نرخ ۱۲،۵ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه‌ها وارد شد.

## ۵-تفسیر نتایج

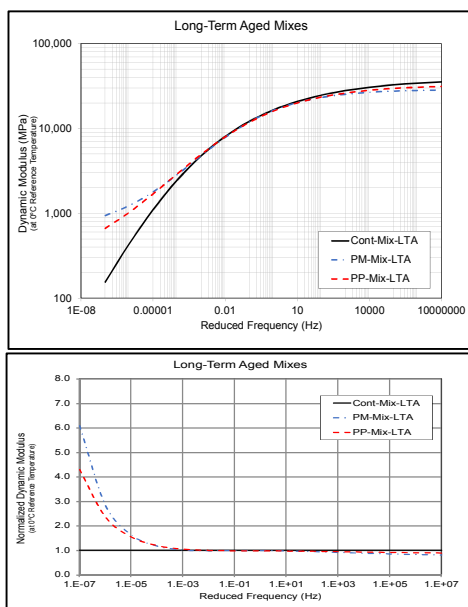
### ۵-۱-آزمایش مدول دینامیکی

منحنی اصلی آزمایش مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در شرایط پیرشدگی کوتاه مدت، سختی مخلوط‌های اصلاح شده (با گرانول‌های پلیمری-قیری یا قیر اصلاح شده با پلیمر) در فرکانس‌های بزرگتر از  $1 \times 10^{-6}$  هرتز نسبت به مخلوط‌های معمولی کمی کمتر بود (معادل دماهای سردتر). در فرکانس‌های پایین‌تر از  $1 \times 10^{-6}$  هرتز، سختی مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط معمولی نسبتاً بالاتر بود و این افزایش در سختی با کاهش فرکانس بارگذاری تشدید می‌شد. در فرکانس  $1 \times 10^{-7}$  هرتز، سختی مخلوط‌های اصلاح شده با قیر پلیمری و مخلوط‌های اصلاح شده با



شکل ۳. منحنی اصلی مدول دینامیکی (بالا)، منحنی اصلی

نرمال‌شده در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت در دمای صفر درجه سانتی‌گراد (پایین)

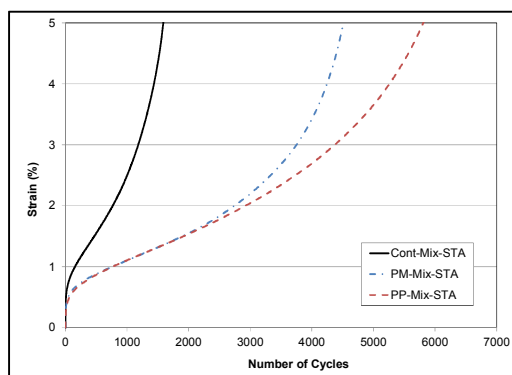


شکل ۴. منحنی اصلی مدول دینامیکی (بالا)، منحنی اصلی نرمال شده در شرایط پیرشدگی بلندمدت در دمای صفر درجه سانتی گراد (پایین)

نسبت به مخلوط‌های ساخته شده از قیر اصلاح شده به مراتب بهتر عمل کردند و با تعداد سیکل بارگذاری بیشتری به ۵٪ کرنش رسیدند (۱۳۰۰ سیکل بیشتر). با مقایسه شکل منحنی‌ها مشاهده می‌شود که نرخ افزایش کرنش ماندگار هر دو نوع مخلوط اصلاح شده، تا میزان بارگذاری حدود ۲۲۰۰ سیکل مشابه است. این نرخ افزایش در کرنش‌های ماندگار، در دو نوع مخلوط اصلاح شده برای بارگذاری بیشتر از ۲۲۰۰ سیکل به مقدار قابل ملاحظه‌ای متفاوت بود. مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گرانول پلیمری-قیری دارای نرخ افزایش بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر بود.

#### ۵-۲- آزمایش خزش دینامیکی

شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی انجام گرفته بر روی مخلوط‌های پیر شده کوتاه مدت را نشان می‌دهد. نمونه‌های مخلوط معمولی، مخلوط حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر و مخلوط اصلاح شده با گرانول پلیمری-قیری به ترتیب با ۱۶۰۰، ۴۵۰۰ و ۵۸۰۰ سیکل به ۵ درصد کرنش رسیدند. همانطور که انتظار می‌رفت این نتایج مقاومت فوق‌العاده بالای مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری را در برابر شیارشدگی نشان می‌دهد. مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری



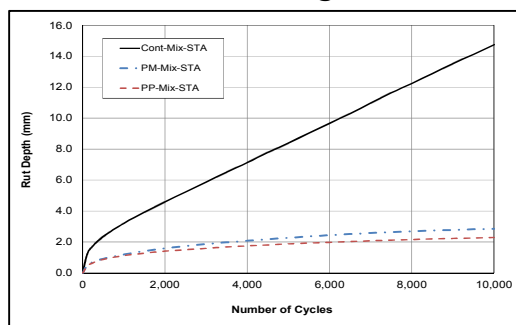
شکل ۵. نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای شرایط پیرشدگی کوتاه مدت، در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد



### ۳-۵- آزمایش دستگاه شیار چرخ هامبورگ

شده مقاومت بسیار بالایی در برابر شیارشدگی دارند. عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول پلیمری- قیری و مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر بسیار مشابه بود، که این نشان می‌دهد گرانول‌های پلیمری-قیری به اندازه قیر اصلاح شده پلیمری در بهبود خصوصیات مقاومت در برابر شیار شدگی موثر هستند.

شکل ۶، نتایج حاصل از آزمایش دستگاه چرخ بارگذاری را نشان می‌دهد که بر روی مخلوط‌های آسفالتی دچار پیرشدگی کوتاه مدت شده، انجام شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با توجه به عمق شیارشدگی بسیار کم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی اصلاح نشده، مخلوط‌های آسفالتی اصلاح



شکل ۶. نتایج آزمایش شیار چرخ هامبورگ بر روی نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه مدت و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد

### ۳-۶- آزمایش تیرچه خستگی

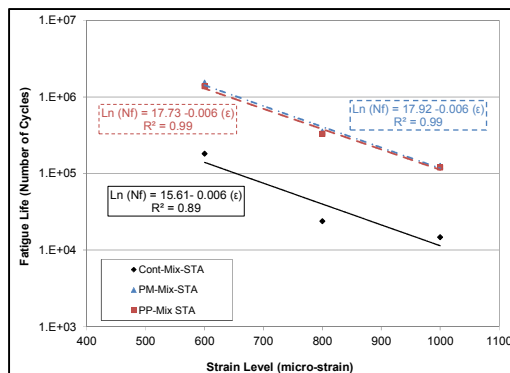
مقادیر متناظر با ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین استفاده شدند). همانطور که انتظار می‌رفت، در تمامی سطوح کرنش، عملکرد مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط‌های اصلاح نشده بسیار بهتر بود. همچنین مشخص شد که حساسیت عمر خستگی به سطح کرنش، مستقل از اصلاح پلیمری است. عملکرد خستگی هر دو نوع مخلوط اصلاح شده بسیار مشابه هم بود.

جدول شماره ۳، نتایج آزمایش تیرچه خستگی چهار نقطه‌ای را نشان می‌دهد که بر روی مخلوط‌های آسفالتی دچار پیرشدگی کوتاه مدت شده، انجام شده است. در هر سطح کرنش، تعداد سیکل بارگذاری که در آن، سختی تیرچه نسبت به سختی اولیه ۶۰٪ کاهش داشته است به عنوان عمر خستگی انتخاب شد. مدل‌های عمر خستگی برای مخلوط‌های آسفالتی، مطابق آنچه در شکل ۷ نشان داده شده است تعیین شدند. (تنها

جدول ۳. نتایج تست تیرچه‌ی خمشی در دمای ۲۰ درجه

مخلوط آسفالتی	کرنش (میکرواسترین)	سختی اولیه (MPa)	سختی نهایی (MPa)	تعداد سیکل
مخلوط آسفالتی معمولی	۴۰۰	۳۶۶۲	۱۴۶۵	۵۸۷۹۲۰
	۶۰۰	۳۰۵۶	۱۲۲۲	۱۸۰۸۳۰
	۸۰۰	۲۹۶۳	۱۱۸۵	۲۳۸۳۰
	۱۰۰۰	۲۳۱۱	۹۲۵	۱۴۷۲۰
مخلوط حاوی گرانول پلیمری	۴۰۰	۳۰۳۱	۱۹۵۰	۲۴۴۰۰۰۰*
	۶۰۰	۳۰۲۳	۱۲۰۹	۱۳۸۱۴۳۰
	۸۰۰	۲۹۱۲	۱۱۶۵	۳۲۹۹۶۰
	۱۰۰۰	۲۴۵۵	۹۸۲	۱۱۹۹۱۰
مخلوط حاوی قیر پلیمری	۴۰۰	۲۹۵۱	۱۱۸۰	۲۴۴۰۰۰۰**
	۶۰۰	۲۹۱۰	۱۱۶۴	۱۵۳۱۵۱۰
	۸۰۰	۲۸۳۰	۱۱۳۲	۳۵۱۷۳۰
	۱۰۰۰	۲۳۴۰	۹۳۶	۱۲۵۶۳۰

\* به دلیل زمان طولانی آزمایش، آزمایش متوقف شد. سختی متناظر با ۳۶ درصد کاهش در سختی اولیه گزارش شده است.  
 \*\* به دلیل زمان طولانی آزمایش، آزمایش متوقف شد. سختی متناظر با ۳۱ درصد کاهش در سختی اولیه گزارش شده است.



شکل ۷. مدل عمر خستگی برای نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه مدت، در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

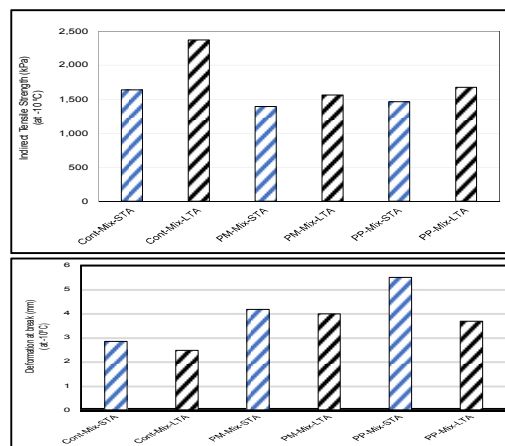
### ۶-۴-آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

برای تمامی مخلوط‌ها افزایش یافت، اما میزان افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در مخلوط‌های اصلاح شده کمتر بود که نشان دهنده اثر مثبت اصلاح کننده پلیمری در کاهش میزان حساسیت نسبت به پیرشدگی است. مقایسه نتایج مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول پلیمری-قیری و مخلوط‌های اصلاح شده با قیر پلیمری نشان داد که هر دو نوع مخلوط دارای مقاومت مشابه و میزان حساسیت یکسان نسبت به پیرشدگی هستند.

براساس نتایج حاصل از کلیه آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مخلوط‌ها، می‌توان گفت هر دو روش اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از گرانول‌های پلیمری-قیری و قیر پلیمری، اثر مشابهی در بهبود عملکرد مخلوط‌ها در برابر خستگی، شیارشدگی و ترک‌خوردگی در دمای پایین دارند.

همچنین مشاهده شد که پیرشدگی بلندمدت، اثر مشابهی بر روی سختی و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری دارد.

شکل ۸، مقاومت کششی غیرمستقیم و تغییر شکل نمونه در لحظه‌ی شکست مخلوط‌های آسفالتی با پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت را نشان می‌دهد که در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده‌اند. طی این آزمایش مشاهده شد که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های اصلاح شده در مقایسه با مخلوط‌های اصلاح نشده نسبتاً کمتر بود. به طور متناظر، تغییر شکل مخلوط‌های اصلاح شده در نقطه‌ی پیک بیشتر بود. با پیرکردن مخلوط‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم برای تمام نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد (بالا)، تغییر مکان در نقطه شکست برای تمام نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد (پایین)

## ۷- نتیجه گیری

پلیمری و مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری- قیری، عملکرد خستگی مشابهی دارند. به طور کلی گرانول‌های پلیمری-قیری و قیر اصلاح شده، اثر نسبتاً مشابهی در بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و حساسیت پیرشدگی داشتند. مزایای افزودنی گرانول‌های پلیمری-قیری، می‌تواند صنعتی روسازی را برای استفاده از این افزودنی‌ها در زمان عدم دسترسی به قیر اصلاح شده با پلیمر و تجهیزات مورد نیاز برای پلیمری کردن قیر یا برای پروژه‌های کوچک به طور بالقوه ترغیب نماید.

## ۸- مراجع

- A. Khodaii and A. Mehrara, (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 23, No. 7, pp. 2586–2592.
- A. Modarres, (2013), "Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 47, pp. 218–222.
- Asphalt Institute (2001), "Quantification of the Effects of Polymer-Modified Asphalt", 1<sup>st</sup> ed. United States.
- B. Sengoz and G. Isikyakar, (2008), "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22, No. 9, pp. 1897–1905.
- D. Zhang, H. Zhang, and C. Shi, (2017), "Investigation of aging performance of SBS modified asphalt with various aging methods," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 145, pp. 445–451.
- G. D. Airey, (2004), "Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens," *J. Mater. Sci.*, Vol. 39, No. 3, pp. 951–959.

این مطالعه با هدف مقایسه خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر SBS نسبت به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری و مقایسه‌ی هر دوی آن‌ها با مخلوط آسفالتی معمولی انجام گرفته است. در این مطالعه سختی مخلوط‌های آسفالتی در بازه دمای کم تا متوسط (۱۵-، ۰، و ۲۰ درجه سانتی‌گراد)، عملکرد شیارشدگی در دمای بهره‌برداری بالا (۵۵ درجه سانتی‌گراد) و رفتار خستگی در دمای متوسط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) و سطح کرنش‌های مختلف ارزیابی شده است. همچنین حساسیت مخلوط آسفالتی در برابر پیرشدگی، از طریق اندازه‌گیری مقاومت و سختی در شرایط پیرشدگی بلند مدت و کوتاه مدت مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. در هر دو شرایط پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت، مقادیر سختی مخلوط‌های اصلاح شده با قیر پلیمری و گرانول‌های پلیمر-قیری در فرکانس‌های بالاتر (بزرگتر از  $1 \times 10^{-5}$ ) نسبتاً مشابه و کمی کمتر از سختی مخلوط‌های اصلاح نشده بود.
۲. مقادیر سختی مخلوط‌های اصلاح نشده و اصلاح شده پس از پیرشدگی بلند مدت در طیف وسیعی از فرکانس‌ها مشابه بود (بزرگتر از ۰/۰۰۱ هرتز) این مشاهدات می‌تواند بیانگر آن باشد که احتمالاً بیشتر ساختار پلیمر به دلیل پیرشدگی بلند مدت تجزیه شده است.
۳. پس از شرایط پیرشدگی بلندمدت، سختی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری نسبت به مخلوط‌های اصلاح شده با گرانول‌های پلیمری-قیری در فرکانس‌های کمتر از ۰/۰۰۱ هرتز، نسبتاً بیش‌تر بود.
۴. با بررسی و مشاهده نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی و چرخ بارگذاری، مشخص شد که عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در مقایسه با مخلوط‌های اصلاح نشده، بهبود یافته است.
۵. نتایج آزمایش تیرچه خستگی نشان می‌دهد، همانطور که انتظار می‌رفت، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی اصلاح نشده بسیار بهتر است. در تمام سطوح کرنش، مخلوط‌های اصلاح شده با قیر

- S. A. Mohammed, (2014), "Toward An Improved Model For Permanent Deformation Of Sbs-Modified Asphalt Mixtures," University of Nottingham.
- T. W. Kim, J. Baek, H. J. Lee, and J. Y. Choi, (2013), "Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 48, pp. 908–916.
- X. Lu and U. Isacsson, (2000), "Modification of road bitumens with thermoplastic polymers," *Polym. Test.*, Vol. 20, No. 1, pp. 77–86, Sep.
- Y. Wang, L. Sun, and Y. Qin, (2015), "Aging mechanism of SBS modified asphalt based on chemical reaction kinetics," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 47–56.
- Y. R. Kim, F. Yousefi Rad, S. Underwood, M. J. Farrar, and R. R. Glaser, (2015), "Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction".
- J. Hao, P. Cao, Z. Liu, Z. Wang, and S. Xia, (2017), "Developing of a SBS polymer modified bitumen to avoid low temperature cracks in the asphalt facing of a reservoir in a harsh climate region," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 150, pp. 105–113.
- J. Xu, A. Zhang, T. Zhou, X. Cao, and Z. Xie, (2007), "A study on thermal oxidation mechanism of styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS)," *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 92, No. 9, pp. 1682–1691.
- M. Yilmaz and M. E. Çeloğlu, (2013), "Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 44, pp. 533–540.
- O. Sirin, H. J. Kim, M. Tia, and B. Choubane, (2008), "Comparison of rutting resistance of unmodified and SBS-modified Superpave mixtures by accelerated pavement testing," *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22, No. 3, pp. 286–294.