

## بررسی تأثیر استفاده از ضایعات تولید پلیمر پی بی آر بر مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی

پیمان عرفانی ولی‌پور، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

صادق یگانه، دانشجوی دکترای راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

ایران، تهران

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

Email: ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۹ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

### چکیده

این تحقیق، به بررسی میزان تأثیر ضایعات حاصل از تولید پلیمرهای الاستومری در بهبود عمر خستگی روسازی آسفالتی و مقایسه نتایج آن با مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر غیرضایعاتی و همچنین قیر اصلاح نشده می‌پردازد. از آنجایی که هزینه زیاد استفاده از مواد پلیمری یکی از معایب به‌کارگیری این نوع از اصلاح‌کننده‌های قیر محسوب می‌شود، به‌کارگیری ضایعات پلیمر که هزینه‌ای به مراتب کمتر از پلیمر خالص دارند به عنوان افزودنی قیر در این مطالعه بررسی گردیده است. علاوه بر دیدگاه اقتصادی استفاده از این ضایعات پلیمری و افزایش کارایی روسازی‌های آسفالتی به عنوان بخشی از سرمایه‌های ملی، به‌کارگیری این بخش از تولیدات پلیمری تجزیه‌ناپذیر می‌تواند موجب آسیب کمتر به محیط‌زیست گردد. با توجه به اهداف این پژوهش، آزمایش‌های تیرخمشی چهارنقطه‌ای در حالت کنترل کرنش با موج نیمه سینوسی، در سه سطح کرنش، و آزمایش خستگی قطری روی نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای در دماهای ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس، در دو سطح تنش، انجام شده است. این آزمایش‌ها روی نمونه‌های آسفالتی متشکل از قیر اصلاح شده با درصد‌های مختلف ضایعات پلیمر پی بی آر و قیر اصلاح نشده صورت پذیرفته است. نتایج آزمایش‌ها و رویکردها بر اساس روش سنتی و روش انرژی تحلیل عمر خستگی بررسی شده و پس از تحلیل آماری، مقایسه گشته‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش‌های ۵۰٪ کاهش سختی اولیه، انرژی تلف شده، و نسبت انرژی (ER)، میزان عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح شده بیش از دو برابر مخلوط‌های اصلاح نشده می‌باشد. عدم تفاوت قابل توجه میان تأثیر پلیمر خالص و پلیمر ضایعات می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های تهیه قیر پلیمری گردد.

واژه‌های کلیدی: ترک‌خوردگی خستگی، ضایعات پلیمر، تیر خمشی چهارنقطه‌ای، خستگی قطری

## ۱. مقدمه

خستگی در مخلوط‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین خرابی‌هایی است که در روسازی‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد. مشخصه‌های خستگی در مخلوط‌های آسفالتی از مهم‌ترین اجزای طرح سازه‌ای و طرح اختلاط روسازی‌های انعطاف‌پذیر محسوب می‌شوند.

مقاومت خستگی یک مخلوط آسفالتی توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است (لویزی و همکاران، ۱۹۹۹). در هنگام عبور وسایل نقلیه روی روسازی، بارهای چرخ باعث می‌شود که قسمت بالا و پایین روسازی به طور تناوبی از حالت کشش به فشار تغییر نماید. بیشترین تنش کششی در زیر لایه روسازی ایجاد می‌شود. این روند تکراری باعث بروز ترک‌های خستگی می‌گردد و تنش کششی به گسترش ترک کمک می‌کند.

رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از یک سو وابسته به مشخصاتی است که بر سختی خمشی آن مؤثر است (درصد هوا، نوع قیر، ضخامت غشای قیر، مشخصات رئولوژیک قیر، نوع و دانه‌بندی مصالح سنگی) و از سوی دیگر از روش آزمایش، مد بارگذاری و شرایط آن (اندازه و فرکانس پارامترهای تنش یا کرنش که در طول آزمایش کنترل می‌شوند، زمان استراحت بین بارهای متوالی، دما) تأثیرپذیر می‌باشد.

در راستای هدف ذکر شده، در این مقاله به آزمایش مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ<sup>۲</sup>، مقایسه عملکرد خستگی این مخلوط‌ها با استفاده از آزمایش خستگی قطری (ITFT)<sup>۳</sup> و مقایسه عملکرد خستگی با استفاده از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای (4PB)<sup>۴</sup> روی مخلوط‌های اصلاح شده با ضایعات پلیمر پرداخته شده است.

امروزه، به منظور بهبود عملکرد روسازی‌ها در مناطق مختلف دنیا، بسیاری از آسفالت‌های تولید شده با یکی از مواد پلیمری یا غیرپلیمری ترکیب و اصلاح می‌شوند. از این رو، اصلاح‌کننده‌های مختلف در مراکز پژوهشی و اجرایی دنیا مورد بررسی قرار می‌گیرند. تحقیقات فراوانی در زمینه استفاده از انواع مواد بازیافتی و ضایعات پلیمرها به عنوان عامل اصلاح‌کننده قیر و مخلوط‌های آسفالتی صورت پذیرفته است. با این وجود، تحقیقات در این زمینه به علت نیاز روز افزون به بهبود مقاومت روسازی‌های آسفالتی با هزینه کمتر و همچنین یافتن راهکارهایی جهت استفاده بهینه از ضایعات پلیمری به منظور کاهش و یا حذف مواد آلاینده محیط‌زیست، همچنان مورد اهمیت و بررسی است. در حالی که تولید مواد پلیمری، آلودگی زیست‌محیطی زیادی را به همراه دارند و همچنین استفاده از آن‌ها پرهزینه است، استفاده از ضایعات فرایند تولید این مواد، ضمن کم هزینه کردن اصلاح قیر در مقایسه با پلیمر خالص، موجب کاربرد بهینه این بخش از تولید پلیمر کشور و عدم رهاسازی این مواد در محیط‌زیست می‌شود.

یکی از روش‌هایی که می‌تواند عمر روسازی آسفالتی را افزایش دهد، ارتقای مشخصات اجرایی تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی، یعنی ماده چسباننده قیری و مصالح سنگی، می‌باشد که در سال‌های اخیر تلاش‌ها و مطالعاتی در این زمینه در کشور صورت گرفته است. آنچه در این تحقیق به عنوان هدف در نظر گرفته شده است، بررسی امکان ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ در زمینه خستگی آسفالت و تعیین الگوی مناسبی از میزان و نحوه مصرف مواد ضایعات پلیمر پی بی آر<sup>۱</sup> (PBR) به عنوان اصلاح‌کننده قیر می‌باشد. ترک

<sup>۱</sup>- Poly Butadiene Rubber (PBR)

<sup>۲</sup>- Hot Mixed Asphalt (HMA)

<sup>۳</sup>- Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)

<sup>۴</sup>- Four-Point Bending Beam (4PB)

## ۲. مروری بر مطالعات پیشین

## ۲-۱. خستگی مخلوط آسفالتی

تعریف معیار گسیختگی، همواره یکی از مهم‌ترین موضوعات در بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر خستگی است. معیاری که برای آزمایش‌های کرنش ثابت در سطح وسیعی به کار برده می‌شود، عبارت از تعداد تکرار بار متناظر با کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪ است که توسط پرانک و هاپمن (۱۹۹۰) و طایبعلی و همکاران (۱۹۹۲) ارائه گردیده است. استاندارد آشتو (۲۰۰۲) این معیار را به عنوان استاندارد موقت TP8-94 و استاندارد آشتو (۲۰۰۷) به عنوان استاندارد T321 منتشر کرد. نتایج مطالعات مختلف نشان داده که در تعداد تکرار بار متناظر با کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪، هیچ‌گونه ترکی مشاهده نمی‌شود و این معیار، یک معیار قراردادی است و در نتیجه این معیار نشان‌دهنده خرابی واقعی نیست. بنابراین، برخی از محققین روش تحلیل براساس انرژی تلف شده برای تعیین عمر خستگی را پیشنهاد کرده‌اند (الخطیب و سنوی، ۲۰۰۴).

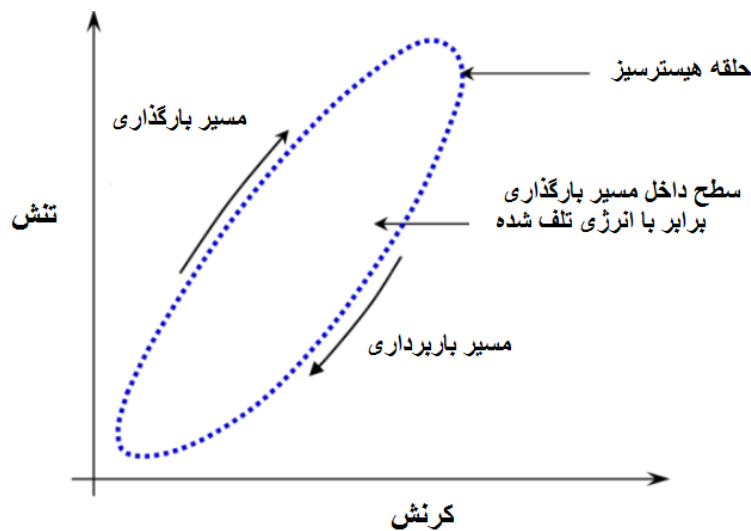
یو و همکاران (۲۰۰۵) از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه-ای با کرنش ثابت استفاده کردند و دریافتند که افزایش دما باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی می‌گردد (الخطیب و قوزلان، ۲۰۱۴). شکست، یا نقطه پایانی، به عنوان یک کاهش مشخص در سختی اولیه در شروع آزمایش، عموماً ۵۰٪ مشخص می‌شود. شرایط در روسازی‌های آسفالتی نازک‌تر (ضخامت کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر) توسط مد بارگذاری کنترل کرنش شبیه‌سازی می‌گردد. سختی مخلوط سطح تنش را کنترل می‌کند که

در مقابل، آن نیز نرخ انتشار ترک را کنترل نموده و عمر خستگی اندازه‌گیری شده شامل تعداد سیکل‌های انتشار ترک می‌باشد (پل، ۱۹۷۳). تحت بارگذاری کنترل کرنش، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انعطاف‌پذیرتر (با سختی خمشی کمتر) نسبت به آزمایش کنترل تنش در دامنه‌های کرنش اولیه مشابه، بهتر است. در آزمایش کنترل کرنش، انرژی تلف شده اولیه بر سیکل کوچک‌تر است و عمر خستگی طولانی‌تر می‌باشد و نرخ اتلاف انرژی تا مرحله نهایی آزمایش، وقتی فاز انتشار ترک رخ می‌دهد، آهسته می‌باشد. باتون و همکاران (۱۹۸۷) بیان نمودند که مد بارگذاری کنترل تنش، هر دو فاز شروع ترک و انتشار آن را شامل نمی‌شود، به این دلیل که تعداد سیکل مورد نیاز برای انتشار ترک در مقایسه با تعداد سیکل منجر به شکست کوچک می‌باشد.

## ۲-۲. روش انرژی

برای مصالح ویسکوالاستیک، همانند بتن آسفالتی، منحنی باربرداری- بارگذاری در نمودار تنش- کرنش روی هم منطبق نمی‌شود و یک حلقه پسماند مانند شکل ۱ تشکیل می‌گردد (عامری و همکاران، ۱۳۹۴). انرژی تلف شده<sup>۱</sup> عبارت است از اختلاف بین مقدار انرژی مصرف شده در سیستم (ناحیه زیر منحنی بارگذاری) و مقدار انرژی بهبود یافته (ناحیه زیر منحنی باربرداری). به عبارت دیگر، انرژی تلف شده سطح ناحیه داخلی حلقه پسماند است. در نتیجه سیکل بارگذاری مکرر، نمودار انرژی تلف شده تجمعی می‌تواند برحسب تعداد تکرار بار و زمان رسم شود.

<sup>۱</sup> - Dissipated Energy Approach (DEA)



شکل ۱. تغییرات تنش و کرنش در بارگذاری سیکلیک (مگیور، ۲۰۱۴)

شکل ۲ نشان دهنده روند تغییرات پارامتر RDEC در طول زمان آزمایش می باشد. این منحنی شامل سه قسمت است. قسمت اول، معرف کاهش نسبت انرژی و قسمت دوم بیانگر آن است که درصد ثابتی از انرژی منجر به ایجاد ترک می شود. مقدار RDEC در این قسمت را مقدار مسطح<sup>۲</sup> (PV) می نامند. در قسمت سوم، نمونه به حالت ناپایدار رسیده و قادر به تحمل بار نخواهد بود. محل اتصال قسمت دوم به سوم را به عنوان نقطه شکست واقعی نمونه<sup>۳</sup> تعریف نموده اند.

برای رفع ایرادهای موجود در روش های پیشین (تفاوت دو مد بارگذاری)، نسبت انرژی مطابق با رابطه (۴) پیشنهاد داده شد (رو و بولدین، ۲۰۰۰):

$$4- ER = n \times s \quad (4)$$

که S سختی نمونه و n تعداد تکرار بار است. در این روش، برای هر دو حالت تنش و کرنش ثابت، با ترسیم منحنی نسبت انرژی برحسب تعداد تکرار بار، نقطه حداکثر منحنی به عنوان معیار شروع ترک تعیین می گردد.

رابطه (۱) برای تعیین انرژی تلف شده در هر چرخه بارگذاری برای مصالح ویسکوالاستیسیته خطی حاصل می شود.

$$1- W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta_i \quad (1)$$

که در آن  $W_i$  انرژی تلف شده در چرخه بار  $i$  ام،  $\sigma_i$  مقدار تنش در چرخه بار  $i$  ام،  $\varepsilon_i$  مقدار کرنش در چرخه بار  $i$  ام و  $\delta_i$  زاویه فازی برای چرخه بار  $i$  ام است.

کل انرژی تلف شده در طول آزمایش برابر است با مجموع انرژی های تلف شده در هر سیکل بارگذاری، یعنی:

$$2- W_{tot} = \sum W_i \quad (2)$$

سپس، پارامتری تحت عنوان نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC)<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف گردید (قوزلان و کارپنتر، ۲۰۰۰):

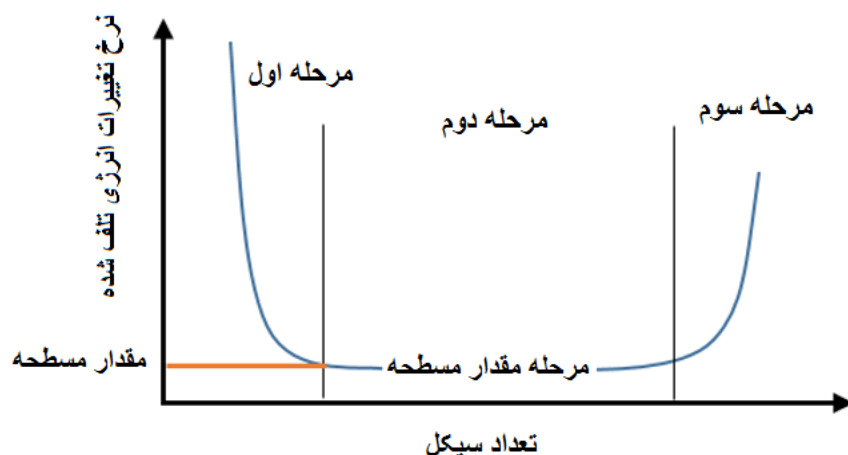
$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (3)$$

که  $DE_n$  انرژی تلف شده در سیکل  $n$  و  $DE_{n+1}$  انرژی تلف شده در سیکل  $n+1$  است.

<sup>۱</sup>- Rate of Dissipated Energy Change (RDEC)

<sup>۲</sup>- Plateau Value (PV)

<sup>۳</sup>- True Failure



شکل ۲. روند تغییرات پارامتر نسبت تغییر انرژی تلف شده (شن و کارپتر، ۲۰۰۵)

مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمرهای  $SBS^1$  و  $SBR^2$  دارای شدت خرابی کمتر و در نتیجه عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های غیرمسلح هستند (سرگند و کیم، ۲۰۰۳). در مطالعه‌ای دیگر، از ترکیب  $SBR$  و پلی-پروپیلن<sup>۳</sup> هر کدام به میزان ۵۰٪ آمیخته، در نسبت‌های ۳، ۴ و ۵ درصد وزن قیر استفاده گردید و از پلیمر  $SBS$  نیز در نسبت‌های ۴ و ۵ درصد استفاده شد. در این مطالعه، آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی انجام گرفت. میزان اثرگذاری ۵٪ از آمیخته پلیمری مشابه و کمی بهتر از  $SBS$  و ۲۰٪ افزایش بیشتر از نمونه شاهد مشخص شد (عامری و همکاران، ۲۰۱۸). لاستیک‌هایی همچون  $SBR$  و خرده لاستیک با بهبود خواص الاستیسیته قیر، خستگی آسفالت را بهبود می‌بخشند (لیانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۷).

در پژوهشی، از ضایعات پلی‌اتیلن با چگالی بالا<sup>۴</sup> ( $HDPE$ ) در ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی قیر، در سه دمای اختلاط ۱۴۵، ۱۵۵ و ۱۶۵ درجه سلسیوس و در سه زمان اختلاط ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در نمونه‌های قیر و مخلوط آسفالتی استفاده شد. نمونه‌های با ۴٪ افزودنی و در دمای

### ۳-۲. اثر افزودنی‌ها بر عمر خستگی مخلوط

#### آسفالتی

عملکرد سیستم قیر اصلاح شده بر پراکنش مناسب پلیمر در قیر وابسته است که به این منظور ترکیب شیمیایی قیر از اهمیت خاصی برخوردار است. میزان تغییر ایجاد شده در قیر به خاصیت پلیمر، درصد پلیمر و نیز ماهیت قیر وابسته است (یتکین ایلدیریم، ۲۰۰۷). اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌ها راهکاری رایج به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی به‌شمار می‌رود (عامری و همکاران، ۲۰۱۸). عملکرد اساسی آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی تأثیر بر خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیک قیر است (نصیری و همکاران، ۲۰۱۷). با بررسی رویه‌های آسفالتی اصلاح شده با تار پلی‌پروپیلن، مشخص شد که مخلوط‌های اصلاح شده دارای سختی بیشتری هستند (هوانگ و وایت، ۱۹۹۶). با افزودن تارهای کربنی به مخلوط آسفالتی، نشان داده شد که این مواد اثر قابل توجهی بر کاهش یا افزایش عمر خستگی ندارد؛ اما مقدار سختی مخلوط تا ۲۵٪ افزایش پیدا می‌کند (کلون، ۲۰۰۰). در پژوهشی دیگر، مشخص شد که

<sup>۱</sup>- Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

<sup>۲</sup>- Styrene-Butadiene-Rubber (SBR)

<sup>۳</sup>- Polypropylene (PP)

<sup>۴</sup>- High-Density Polyethylene (HDPE)

خواص قیر انجام گرفته نشان می‌دهد که در میان پلیمرهای یاد شده، PBR به صورت فازی یکنواخت در قیر حل شده، در حالی که مابقی پلیمرهای یاد شده در به صورت فازی مجزا در محیط قیر پخش شده‌اند. همچنین، این پلیمر موجب بهبود خواص قیر شده است (یوسفی، ۲۰۰۲).

مزیت دیگری که در خصوص استفاده از پلیمرها در روسازی آسفالتی و افزایش عمر روسازی‌ها مطرح شده مبحث اقتصادی است. میزان هزینه اولیه و بازده اجرایی آن در بلندمدت یکی از مهم‌ترین موارد تأثیرگذار در انتخاب این نوع از قیر اصلاح شده می‌باشد. در این زمینه، تحقیقی توسط اتحادیه روسازی‌های آسفالتی<sup>۳</sup> روی ۸۴ جفت آسفالت اجرا شده در آمریکا و کانادا با قیر اصلاح نشده و قیر اصلاح شده به کمک پلیمرها انجام شده است. طبق گزارش منتشر شده، به طور متوسط، هزینه اولیه اجرای یک روسازی با قیر اصلاح شده پلیمری نسبت به قیر ساده ۸/۵ درصد افزایش خواهد داشت. اما این افزایش هزینه، در مقابل ۱۴٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های نگهداری روسازی در طول عمر آن خواهد بود. لذا، براساس محاسبات و مشاهدات منتشر شده در این گزارش، در مجموع، به‌کارگیری قیر پلیمری در ساخت روسازی آسفالتی صرفه و توجیه اقتصادی قابل توجهی خواهد داشت (بانکر و روزنبرگر، ۲۰۰۵).

### ۳. ضرورت و فرضیات پژوهش

نیاز مطالعاتی امروز کشور در زمینه تکنولوژی آسفالت، استفاده از مواد افزودنی با تأکید بر بالا رفتن خواص عملکردی مخلوط آسفالتی می‌باشد. به همین منظور، ارزیابی اقتصادی و امکان‌سنجی استفاده از آن دسته مواد افزودنی که ضمن سازگاری و تأثیر مثبت بر محیط‌زیست، در دسترس بوده و از نظر بومی مناسب‌تر باشند امری

۱۶۵ با زمان اختلاط ۳۰ دقیقه بهترین نتیجه را در مقاومت مارشال (افزایش تا ۵۰٪) و تغییرشکل دائمی ارائه کردند (هینسیلیگلو و آگار، ۲۰۰۴). همچنین، در بحث استفاده از مواد و پلیمرهای ضایعاتی، از ترکیبات متقاطع پلی-اتیلن<sup>۱</sup> و پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به منظور جایگزین قسمتی از مصالح سنگی استفاده گردید. نتیجه آن که این ترکیبات، ضمن کاهش وزن نمونه‌ها، باعث پایداری بیشتر در برابر شیارشدگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌شوند (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق دیگری، از لاستیک نیتریل بوتادین<sup>۲</sup> (NBR) در قیر ۴۰-۵۰ به عنوان افزودنی استفاده گردید و با انجام آزمایش‌های سنتی قیر و همچنین به وسیله رثومتر برش دینامیک، خصوصیات قیر حاصل با انجام آزمون جاروب فرکانس و جاروب دمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آن که در مقدار ۲۵ وزنی قیر، این مواد بهترین تأثیر را روی قیر داشته‌اند و از جمله با افزایش سختی، مقاومت شیارشدگی را افزایش دادند (سودانی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، در پژوهشی دیگر، از استایرن بوتادین رابر به میزان ۳ و ۷ درصد استفاده شد و مشخص گردید استفاده از این پلیمر در درصدهای ذکر شده می‌تواند عمرخستگی را به ترتیب ۲/۵ و ۴ برابر نمونه‌های فاقد افزودنی بهبود بخشد (صالح‌فرد و همکاران، ۲۰۱۶). از جمله دیگر مطالعات صورت گرفته در زمینه تأثیر افزودن پلیمرهای الاستیک به قیر می‌توان به بررسی تأثیر استایرن بوتادین رابر (SBR) بر میزان چسبندگی در دماهای کم اشاره نمود. طی بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه، افزایش میزان پلیمر مذکور در قیر باعث افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه شده که این امر در دماهای کم مشهودتر نیز بوده است (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه دیگری که روی نحوه پخش پلیمرهای PBR, SBR و لاستیک طبیعی (SMR) و تأثیر آن‌ها بر

<sup>۱</sup>- Cross-linked polyethylene

<sup>۲</sup>- Nitrile-Butadiene Rubber (NBR)

<sup>۳</sup>- Asphalt Pavement Alliance

## ۴-۱-۱. سنگدانه‌های آهکی

سنگدانه‌های به‌کار رفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی، از معدن شن و ماسه اسب‌چران (کارخانه آسفالت کندوان پارس)، واقع در شهرستان رودهن، تهیه شده و از نوع مصالح کوهی می‌باشند. سنگدانه‌های موجود در این معدن به صورت ۶-۰، ۱۲-۶، ۱۸-۱۲، و  $>18$  میلی‌متر طبقه‌بندی شده‌اند. جهت رسیدن به دانه‌بندی مورد استفاده در آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، سنگدانه‌ها مجدداً الک شده و در اندازه‌های مورد نیاز جمع‌آوری شدند. در این تحقیق، از پودر سنگ به عنوان فیلر استفاده شده است.

باید توجه داشت که با این وجود، مصرف مقدار زیاد فیلر در بتن آسفالتی سبب کاهش تخلخل، افزایش مقاومت در برابر تراکم و کاهش استقامت (به دلیل کاهش اصطکاکی داخلی) می‌شود (طباطبایی، ۱۳۸۳). خصوصیات مصالح سنگی در جدول ۱ نشان داده شده است.

ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به هدف دستیابی به روسازی دارای عمر بیشتر در مقابل خستگی و تأثیر مثبت الاستومرها در بهبود این نقیصه و از سوی دیگر هزینه زیاد تهیه قیر پلیمری، ضایعات پلیمری به عنوان جایگزینی بسیار ارزان‌تر و با تأثیری مشابه در نظر گرفته شده است. از این رو، در این پژوهش، با فرض آنکه ضایعات پلیمر PBR بتواند ضمن هزینه به مراتب کمتر، خواص بهتر یا حداقل مشابه با پلیمر اصلی در قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی را فراهم آورد، سعی شده است تا از این مواد پلیمری مقرون به صرفه که از تولیدات داخلی کشور نیز می‌باشند، استفاده شود تا جایگزینی برای پلیمر اصلی و یا سایر پلیمرهای وارداتی باشد.

## ۴. برنامه آزمایشگاهی

## ۴-۱. مشخصات مصالح

در این تحقیق، برای نمونه‌های آسفالتی و انجام آزمایش‌ها، از سنگدانه‌های آهکی، فیلر (مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰) و قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ استفاده گردیده است که شرح و نحوه تهیه آن‌ها در ادامه ارائه خواهد شد.

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

۸- استاندارد آزمایش		۷- حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		۶- نتایج آزمایش	۵- شرح
ASTM -۱۲	AASHTO -۱۱	۱۰- رویه	۹- آستر		
-۱۸	T96 -۱۷	۳۰ -۱۶	۴۰ -۱۵	۲۲/۳ -۱۴	۱۳- حداکثر سایش به روش لس آنجلس (%)
-۲۴	-۲۳	۲۵ -۲۲	۳۰ -۲۱	۱۶ -۲۰	۱۹- حداکثر ضریب تورق با روش BS۸۱۲ (%)
D8521 -۳۰	-۲۹	۹۰ -۲۸	۸۰ -۲۷	۹۶ -۲۶	۲۵- حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴ (%)
-۳۶	T85 -۳۵	۲/۵ -۳۴	۲/۸ -۳۳	۱/۴ -۳۲	۳۱- حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه) (%)
-۴۲	T84 -۴۱	۲/۵ -۴۰	۲/۸ -۳۹	۱/۸ -۳۸	۳۷- حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه) (%)
-۴۸	-۴۷	-۴۶	-۴۵	۲/۶۳ -۴۴	۴۳- وزن مخصوص واقعی $\frac{gr}{cm^3}$ مصالح سنگی درشت‌دانه
-۵۴	-۵۳	-۵۲	-۵۱	۲/۵۹ -۵۰	۴۹- وزن مخصوص واقعی $\frac{gr}{cm^3}$ مصالح سنگی ریزدانه

## ۴-۱-۲. قیر خالص

شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. این قیر به دو صورت خالص و اصلاح شده برای تهیه نمونه‌های بتن آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج

قیر مصرفی در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ بوده که از

آزمایش های صورت گرفته روی قیر خالص در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات قیر خالص مورد استفاده

روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۳	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-5	۶۳	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-36	۴۹	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D-113	۱۱۲	انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-92	۳۰۵	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق (درجه سلسیوس)

همچنین، به منظور دانه بندی سنگدانه مخلوط های آسفالتی، از محدوده دانه بندی شماره ۴ آئین نامه روسازی آسفالتی ایران (۱۳۸۱) استفاده شده است. جدول ۳، ترکیب دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۳. دانه بندی شماره ۴ (آئین نامه روسازی آسفالتی ایران، ۱۳۸۱)

اندازه الک (mm)	۱۹	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
حد بالا و پایین	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۴۴-۷۴	۲۸-۵۸	۵-۲۱	۲-۱۰
درصد عبوری (%)	۱۰۰	۹۵	۵۹	۴۳	۱۳	۶

دمای انتقال شیشه ای بسیار کم (حدود ۱۰۰°C-) بعد از استایرن بوتادین رابر (SBR) پرمصرف ترین الاستومر مصنوعی می باشد. مهمترین کاربردهای این محصول در تولید تایر و قطعات لاستیکی می باشد. جدول ۴، خصوصیات پلیمر مصرفی که از نمونه های تولید شده در داخل کشور می باشد را نشان می دهد.

#### ۲-۴. ساخت نمونه ها

محصول پلی بوتادین رابر (PBR) به روش پلیمریزاسیون امولسیون محلولی بر پایه کاتالیست کبالت تولید می شود. این کائوچو، به دلیل داشتن خواصی از قبیل مقاومت سایشی و مقاومت پارگی عالی، جهندگی بسیار بالا و

جدول ۴. خصوصیات مصرفی (PBR1220)

نوع پلیمر	PBR1220	واحد	مقدار	استاندارد
گروانروی خام (ML1+4)		MU	۴۹-۴۱	ASTM D1646
مواد فرار		درصد وزنی	حداکثر ۰/۷۵	ASTM D1416
استحکام کششی		(Kgf/cm <sup>3</sup> )	۱۵۰ >	ASTM D 412
ازدیاد طول تا پارگی		(%)	۴۴۰ >	ASTM D 412



جدول ۵، نشان‌دهنده انواع مختلف قیرهای استفاده شده در این تحقیق، به علاوه پارامترهای آزمایش مارشال آن‌ها است. هر کدام از متغیرها با یک علامت اختصاری مشخص شده‌اند. همچنین، آزمون پایداری حرارتی روی نمونه‌ها انجام شده که نتایج این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است.

اختلاط مواد پلیمری با قیر در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۴۰ دقیقه توسط میکسر برش بالا<sup>۱</sup> انجام شد. در ابتدا، مواد پلیمری به ذرات ریز بریده شده و طی ۱۰ دقیقه با سرعت میکسر ۲۰۰۰ دور در دقیقه به آرامی به قیر اضافه شدند و در ۳۰ دقیقه پس از آن، سرعت میکسر به ۶۰۰۰ دور در دقیقه رسانده شد.

جدول ۵. علائم اختصاری نمونه‌های قیر به کار رفته

علامت اختصاری نمونه	نوع و مقدار افزودنی به کار رفته	مقاومت مارشال (KN)	روانی (mm)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	VMA (%)	VFB (%)	فضای خالی (%)
Control	-	۸/۳۳	۳/۲۴	۲/۳۴۶	۱۵/۸۸۷	۷۵/۰۹۶	۳/۶۳
A-PBR3	PBR1220 % ۳	۱۲/۲۸	۴/۰۴	۲/۳۶۳	۱۵/۸۱۷	۷۵/۴۶۸	۳/۸۸
B-WPBR3	Waste PBR1220 % ۳	۹/۷۸	۳/۵۱	۲/۳۴۶	۱۶/۳۷۹	۷۶/۳۸۶	۳/۸۶
C-WPBR4	Waste PBR1220 % ۴	۱۰/۶۵	۳/۶۱	۲/۳۵۰	۱۶/۴۸۹	۷۵/۲۲۴	۳/۸۶
D-WPBR5	Waste PBR1220 % ۵	۱۲/۳۶	۳/۸۴	۲/۳۵۵	۱۶/۰۸۶	۷۵/۸۷۲	۳/۸۸

جدول ۶. نتایج آزمون پایداری

نمونه	نقطه نرمی (درجه)		S(t)-S(b)
	S(t)	S(b)	
A-PBR3	۵۹/۵	۵۸	۱/۵
B-WPBR3	۵۲/۵	۵۱/۳	۱/۲
C-WPBR4	۵۵/۶	۵۴/۵	۱/۱
D-WPBR5	۵۹/۵	۵۸/۱	۱/۴

است که این مسئله با هم‌زدن نمونه قبل از اختلاط با مصالح سنگی برطرف گردید. نمونه‌های مارشال با درصدهای اختلاط قیر برابر با ۴، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد ساخته شده‌اند. مشخصات فیزیکی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با روش مارشال طبق نشریه ۲۳۴ کنترل شده‌اند. مقدار قیر بهینه، بر طبق طرح اختلاط مارشال، با

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، مقادیر S(t)-S(b) کمتر از مقدار مجاز ۲/۵ درجه سلسیوس واقع شده که با توجه به محدودیت‌های مطرح شده در استاندارد AASHTO T-PP5 می‌توان اذعان نمود که مخلوط‌های تهیه شده از لحاظ پایداری حرارتی مناسب خواهند بود. همچنین، در دو نمونه A و D پایداری کمتر

<sup>۱</sup> - High shear

۸ مشخصات حجمی مخلوط آسفالتی با قیر خالص مورد آزمایش را نشان می دهد.

مقایسه خصوصیات حجمی نمونه ها با استحکام و روانی نتایج آزمایش ها به دست می آید. نتایج به دست آمده برای درصد قیر بهینه در جدول ۷ نشان داده شده است. جدول

جدول ۷. درصد قیر بهینه محاسبه شده برای هر نوع مخلوط

نمونه	Control	A	B	C	D
درصد قیر بهینه	۴/۶	۵/۲	۵/۳	۵/۳	۵/۳

جدول ۸. مشخصات مخلوط های آسفالتی با قیر خالص و با دانه بندی شماره ۴

درصد فضای خالی آسفالت	G <sub>mm</sub>	G <sub>mb</sub>	درصد قیر
۳/۹۸	۲/۵۲	۲/۴۱	۴/۶

### ۳-۴. آزمایش ها

#### ۴-۳-۱. آزمایش مدول برجهدگی

مدول برجهدگی همواره پارامتری تعیین کننده در طراحی روسازی های آسفالتی می باشد و از این جهت در هر نوع روسازی حائز اهمیت است. به دلیل شباهت مفهومی مدول برجهدگی با مدول الاستیسیته، با انجام آزمایش مدول برجهدگی می توان نحوه ترکیب عملکرد الاستیسیته و رفتار پلاستیک وابسته به زمان نمونه های آسفالتی را بررسی کرد. میزان عملکرد الاستیسیته نمونه های آسفالتی از مهمترین عوامل اثرگذار بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی می باشد. با انجام این آزمون، در این تحقیق، جهت تعیین مدول برجهدگی از دستگاه UTM بر اساس استاندارد مذکور استفاده شده است. پارامترهای این آزمایش در جدول ۹ ارائه گردیده است.

نمونه های استوانه ای مخلوط آسفالتی به قطر ۱۰ و ارتفاع تقریبی ۶/۴ سانتی متر جهت آزمایش خستگی قطری و مدول برجهدگی به کمک دستگاه متراکم کننده چرخشی ۱ متراکم گردید. با استفاده از این دستگاه، نمونه های استوانه ای تحت فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال، با سرعت چرخش ۳۰ دور در دقیقه و زاویه چرخش ۱/۲۵ درجه متراکم شدند (برنامه تحقیقاتی بزرگراه های آمریکا<sup>۲</sup>).

برای تراکم نمونه های تیر خستگی در این تحقیق از دستگاه موجود در دانشگاه علم و صنعت استفاده گردید. این دستگاه بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دپارتمان کلرادو ساخته شده است. نمونه ها برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد AASHTO T321 برش داده می شوند و در پایان بعد از عملیات برش، ۴۵ نمونه تیری شکل آماده تست به دست آمد.

<sup>۱</sup>- Gyratory

<sup>۲</sup>- The Strategic Highway Research Program (SHRP)

جدول ۹. مشخصات مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

استاندارد مورد استفاده	ASTM D4123-82
شکل بارگذاری	زنگوله‌ای (Haversine)
زمان بارگذاری (ثانیه)	۰/۱
تعداد پیش بارگذاری	۵۰
تعداد بارگذاری	۵
دمای نمونه (سلسیوس)	۲۵
بار اعمال شده (نیوتن)	۵۰۰

## ۴-۳-۳. آزمایش خستگی تیر خمشی

در این تحقیق، نمونه‌ها با استفاده از درصد قیر بهینه هر مخلوط و دانه‌بندی شماره ۴ آئین‌نامه روسازی راه‌های ایران (۱۳۸۱) ساخته شدند. برای حذف اثر درصد فضای خالی از نتایج عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، سعی بر این بوده است تا حتی‌الامکان نمونه‌های آسفالتی با درصد فضای خالی برابر ساخته شوند. شایان ذکر است که از هر مورد، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای در سه سطح کرنش (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین)، با فرکانس ۱۰ هرتز و بارگذاری سینوسی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شده است. معیار کاهش ۵۰٪ سختی اولیه بر اساس استاندارد AASHTO-T321، به منزله پایان آزمایش در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه به منظور محاسبه مقادیر بر پایه رویکرد انرژی تلف شده، اعمال بارگذاری تا رسیدن نمونه به ۳۵٪ سختی اولیه ادامه پیدا کرد. شرایط انجام آزمایش مطابق استاندارد AASHTO-T321 در جدول ۱۰ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در محاسبه مدول برجهندگی

توسط نرم‌افزار موجود در دستگاه UTM از رابطه‌ای که در استاندارد ASTM D4123 به آن اشاره گردیده، استفاده شده است.

$$55-M_R = \frac{P(v+0.2734)}{tH} \quad (5)$$

$$56-v = 0.359 H/V - 0.27 \quad (6)$$

که  $M_R$  مدول برجهندگی (مگاپاسکال)،  $P$  بار تکراری (نیوتن)،  $v$  نسبت پواسون،  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر)،  $H$  تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر (میلی‌متر) و  $V$  تغییرشکل قائم برگشت‌پذیر (میلی‌متر) است.

## ۴-۳-۲. آزمایش خستگی قطری

آزمایش خستگی قطری<sup>۱</sup> برای تعیین عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در این آزمایش، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. نمونه دارای ابعاد ۱۰۱/۶ میلی‌متر قطر و ۶۳/۵ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد. بار به صورت قطری روی نمونه تا شکست آن اعمال می‌گردد.

جدول ۱۰. شرایط انجام تست تیر خمشی چهارنقطه‌ای

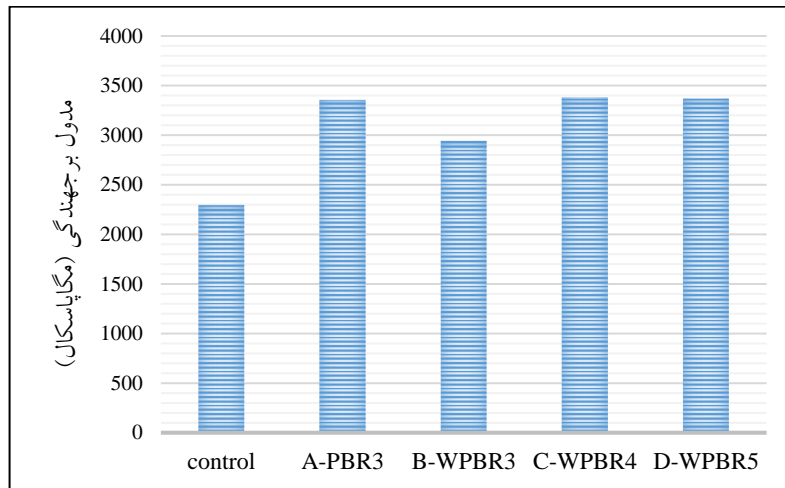
نوع آزمایش	کرنش ثابت (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین)
معیار شکست	کاهش ۵۰ درصدی در سختی اولیه نمونه
نوع بارگذاری	سینوسی
فرکانس بارگذاری	۱۰ Hz
دمای آزمایش	۲۰ درجه سلسیوس

<sup>1</sup> - Indirect Tensile Fatigue Test

### ۵. نتایج آزمایش ها و تحلیل آماری

برجهندگی مخلوط های بررسی شده از هر نوع ارائه گشته اند. طبق این جدول، مشخص می گردد که مخلوط های آسفالتی حاوی ۳ و ۵ درصد ضایعات پلیمر مشابه با مخلوط آسفالتی حاوی ۳٪ پلیمر رفتار کرده اند. مدول برجهندگی به دست آمده در نمونه های D و C با اختلاف ناچیزی بیشتر از نمونه A می باشد.

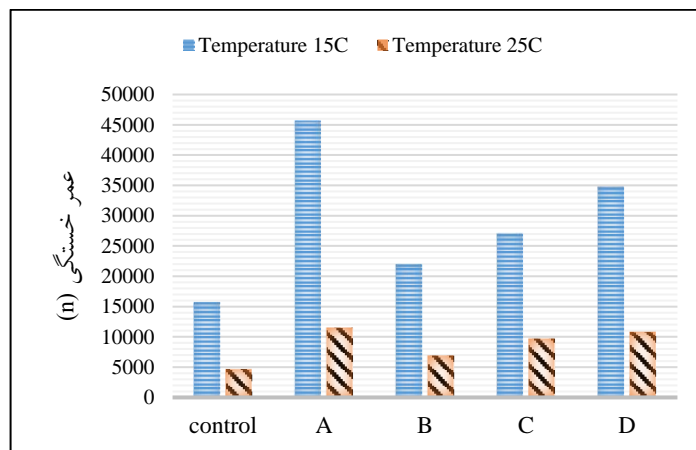
همانطور که در بخش قبل اشاره گردید، آزمایش مدول برجهندگی و خستگی قطری توسط دستگاه UTM آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. در شکل ۳، میانگین مقادیر مدول



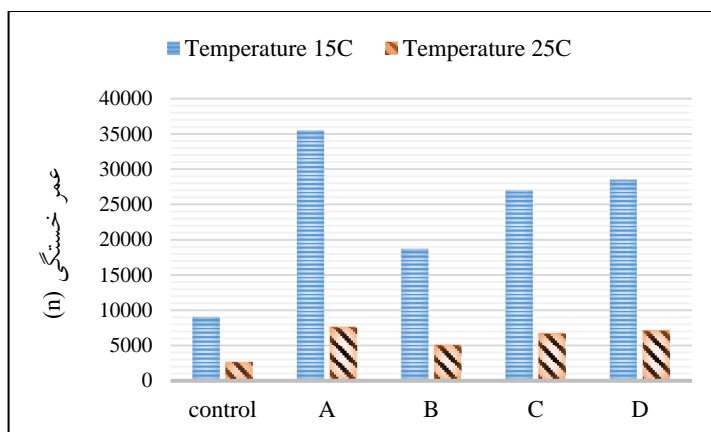
شکل ۳. نتایج تست مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

تنش ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال صورت پذیرفت. شکل های ۴ و ۵ نتایج عمر خستگی نمونه ها را در این آزمایش نشان می دهند.

به منظور انجام آزمایش خستگی قطری، مخلوط های آسفالتی حاوی ۴ نوع قیر اصلاح شده و یک نمونه کنترل فاقد اصلاح کننده قیر تهیه شده است. این آزمایش در دو دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس و در دو سطح



شکل ۴. عمر خستگی مخلوط های آسفالتی تحت تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۵. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی تحت تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال

نشان‌دهنده مقدار خرابی در نمونه آسفالتی می‌باشد (کارپتر، ۲۰۰۶).

$$RDEC = \frac{DE_b - DE_a}{DE_a(b-a)} - 57 \quad (7)$$

در این رابطه،  $DE_a$  انرژی تلف شده سیکل a،  $DE_b$  انرژی تلف شده سیکل b ام و a و b نیز شماره سیکل‌های مورد نظر می‌باشند. شکل ۶ به عنوان نمونه، نحوه تغییرات نسبت انرژی تلف شده را در برابر تعداد دفعات بارگذاری برای نمونه A حاوی ۳٪ PBR را در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین نشان می‌دهد که به منظور به دست آوردن این نمودار، مقدار زمان بارگذاری تا بیش از دو برابر مقدار n در کاهش سختی به اندازه ۵۰٪ مقدار اولیه (Nf50)، ادامه داده شده است تا نمونه وارد مرحله سوم نیز بشود.

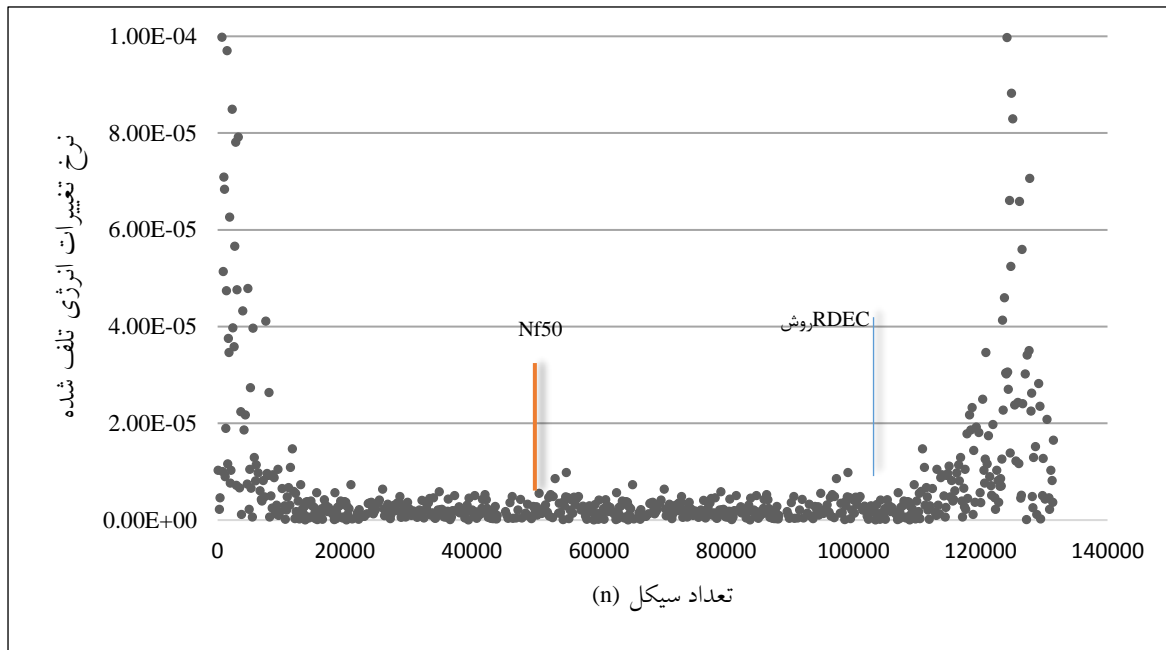
در روش نسبت انرژی ER (روش Rowe و Bouldin)، برای هر دو حالت تنش و کرنش ثابت، با ترسیم منحنی نسبت انرژی بر حسب تعداد تکرار بار، نقطه حداکثر منحنی به عنوان معیار شروع ترک تعیین می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل از این رویکرد، عمر خستگی بر اساس این روش متناظر با ۳۵ الی ۶۵ درصد میزان سختی اولیه است. به عنوان نمونه، شکل ۷ نمودار نرخ انرژی  $(N \times S_i)$  در مقابل تعداد سیکل بارگذاری را برای نمونه A حاوی ۳٪ PBR در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین

مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، نمونه‌های حاوی پلیمر خالص در دمای ۱۵ درجه سلسیوس در هر دو حالت تنش ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بهتر از نمونه‌های حاوی ضایعات پلیمر عمل کرده‌اند. این در حالیست که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، نمونه‌های حاوی ۵٪ ضایعات، عمر خستگی نزدیک به نمونه‌های حاوی پلیمر را نشان می‌دهند.

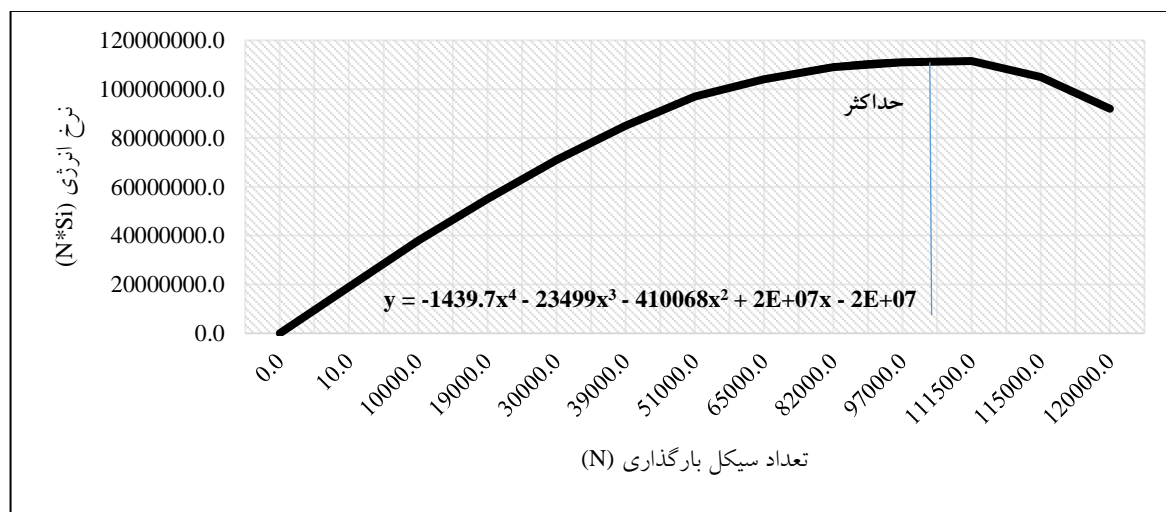
همان‌طور که در بخش مقدمه نیز بیان گردید، به منظور بررسی دقیق‌تر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، تست تیر خمشی چهارنقطه‌ای نیز روی نمونه‌ها صورت پذیرفته است. این آزمایش در سه سطح کرنش (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین)، با فرکانس ۱۰ هرتز و بارگذاری سینوسی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شده است. معیار کاهش ۵۰٪ سختی اولیه بر اساس استاندارد AASHTO-T321، به منزله پایان آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

محققان زیادی از رویکرد انرژی تلف شده برای مدل کردن رفتار خستگی در بتن آسفالتی استفاده کردند. آخرین مدل ارائه شده از این دسته، مدل نسبت تغییرات انرژی تلف شده (رابطه ۷) می‌باشد. تغییرات انرژی تلف شده در طول سیکل‌های متوالی آزمایش خستگی

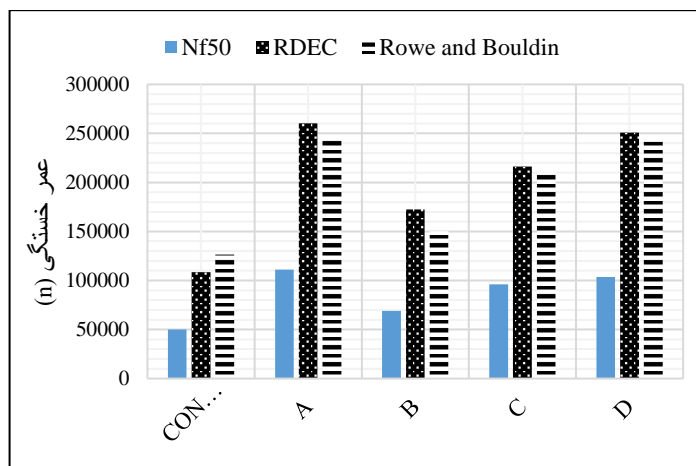
نشان می‌دهد. در این رابطه، S معرف سختی نمونه و n کرنش و برای سه روش تعیین عمر خستگی را نشان می‌دهند. تعداد تکرار بار است. همچنین، شکل های ۸، ۹ و ۱۰ مقدار عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در سه سطح



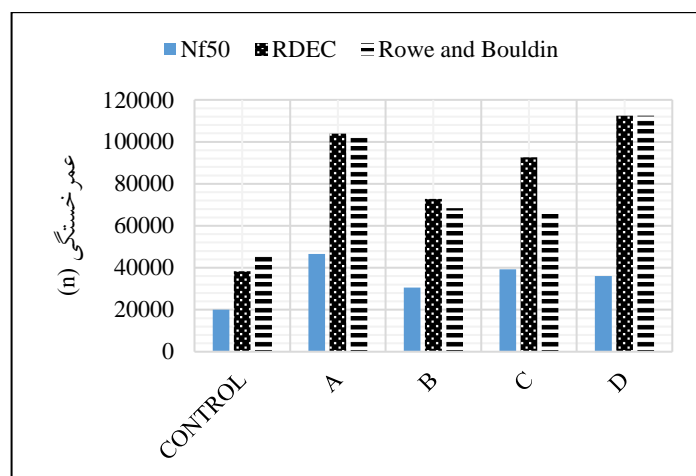
شکل ۶. نمودار نرخ تغییر انرژی تلف شده در برابر تعداد سیکل تحمل شده برای نمونه A (حاوی ۳٪ PBR) در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین



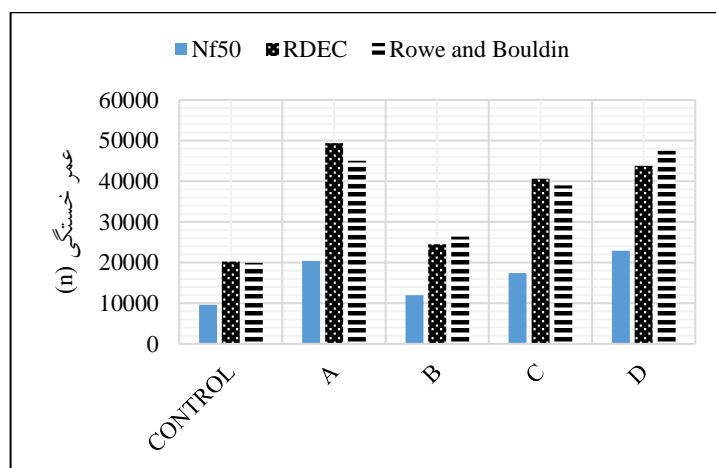
شکل ۷. نمودار نرخ انرژی تلف (N × Si) در مقابل تعداد سیکل بارگذاری، طبق روش رو و بولدین (۲۰۰۰) نمونه A حاوی ۳٪ PBR در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین



شکل ۸. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین.



شکل ۹. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین.



شکل ۱۰. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سطح کرنش ۱۰۰۰ میکرواسترین.

تفاوت بین میانگین‌ها معنی‌دار است یا خیر. در تحلیل این پژوهش، متغیرهای اولیه شامل نوع قیر (A, B, C و Control)، سطح کرنش (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین) و روش‌های تحلیل (RDEC، Nf50 و Rowe) می‌باشند. آزمون ANOVA ابتدا به منظور تعیین معنی‌دار بودن یا نبودن میانگین‌های نمونه‌ها طبق جدول ۱۱ انجام شد. در این مطالعه، مقدار سطح معنی‌داری برابر با ۵٪ است. با درک مشخص شدن وجود تفاوت بین میانگین نمونه‌ها، آزمون توکی HSD انجام شد و سپس همه میانگین نمونه‌ها به صورت دو به دو مقایسه گردید. طبق شکل‌های ۸ تا ۱۰ و جدول ۱۲، روش‌های RDEC و Rowe مقدار عمرخستگی بسیار بیشتری را در مقایسه با روش Nf50 نتیجه می‌دهند. این تفاوت‌ها مخصوصاً در سطح کرنش کمتر، بیشتر است.

به منظور بررسی و مقایسه روش‌های تعیین عمر خستگی، سه روش کاهش ۵۰٪ سختی اولیه، روش محاسبه نرخ تغییر انرژی تلف شده (RDEC) و روش نسبت انرژی ER (روش رو و بولدین)، مورد تحلیل آماری ANOVA قرار گرفته‌اند. تحلیل آماری شامل تحلیل واریانس (ANOVA) با آزمون توکی با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. در تحلیل واریانس، برای مقایسه میانگین گروه‌ها از واریانس استفاده می‌شود. بدین صورت که ابتدا میانگین و واریانس نمونه‌های هر کدام از گروه‌ها تعیین می‌شود. سپس، مشخص می‌شود که این واریانس بین گروه‌ها، ناشی از متغیر یا متغیرهای مستقل است، یا ناشی از شانس و خطا است. در تحلیل واریانس یک طرفه، تأثیر یک متغیر مستقل اسمی روی یک متغیر وابسته فاصله‌ای بررسی می‌شود. این روش نشان می‌دهد که تفاوت‌های مشاهده شده در میانگین نمونه آماری در جامعه آماری نیز وجود دارد یا خیر. به عبارت دیگر،

جدول ۱۱. تحلیل آماری (ANOVA)

		Pairwise Tukey statistical analysis				
		Control	A	B	D	C
600 Microstrain	Control	-	S	S	S	S
	A		-	S	S	N
	B			-	S	S
	C				S	S
	D					S
800 Microstrain	Control	-	S	S	S	S
	A		-	S	S	S
	B			-	S	S
	C				-	N
	D					-
1000 Microstrain	Control	-	S	N	S	S
	A		-	S	S	N
	B			-	S	S
	C				-	S
	D					-

Notes: a=0.05, N: Not significant, S: Significant



Anova Pairwise Tukey statistical analysis for a comparison between three used methods																		
		Control			A			B			C			D				
		Nf50	RDEC	Rowe	Nf50	RDEC	Rowe	Nf50	RDEC	Rowe	Nf50	RDEC	Rowe	Nf50	RDEC	Rowe		
Control	Nf50	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
	RDEC		-	S	N	S	S	S	S	S	N	S	N	N	S	N		
	Rowe			-	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
A	Nf50				-	S	S	S	S	S	N	S	N	N	S	N		
	RDEC					-	S	S	S	S	N	S	S	N	S			
	Rowe						-	S	S	S	N	S	S	N	S			
B	Nf50							-	S	S	S	S	S	S	S	S		
	RDEC								-	S	S	S	S	S	S	S		
	Rowe									-	S	S	S	S	S	S		
C	Nf50												-	S	N	S	S	
	RDEC													-	S	S	S	
	Rowe														-	S	S	
D	Nf50															-	N	S
	RDEC																-	S
	Rowe																	-

Notes: a=0.05, N: Not significant, S: Significant

تحلیل آماری مطابق جدول ۱۳ ارائه کرد تا میزان همبستگی نتایج این دو آزمایش که دارای ماهیتی مشابه اما روش‌های متفاوتی هستند، مشخص گردد.

در ادامه، به منظور امکان بررسی دقیق‌تر نتایج و مقایسه آماری بین داده‌های به دست آمده، از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. این نرم‌افزار به کمک تحلیل نتایج آزمایش‌های خمشی چهارنقطه‌ای و خستگی قطری

### جدول ۱۳. تحلیل آماری - تعیین میزان همبستگی نتایج آزمایش‌های تیر خمشی چهارنقطه‌ای و خستگی قطری

Bivariate correlations analysis between the results of ITFT and 4PB tests - Correlations								
		Strain 600	Strain 800	Strain 1000	T15-S300	T15-S400	T25-S300	T25-S400
Strain 600	Correlation Coefficient	1	.981	.966	.959	.943	.987	.925
	Sig.		.000	.000	.001	.001	.000	.003
Strain 800	Correlation Coefficient		1	.944	.916	.937	.972	.945
	Sig.			.001	.004	.002	.000	.001
Strain 1000	Correlation Coefficient			1	.896	.891	.943	.896
	Sig.				.006	.007	.001	.006
T15-S300	Correlation Coefficient				1	.944	.981	.908
	Sig.					.001	.000	.005
T15-S400	Correlation Coefficient					1	.952	.984
	Sig.						.001	.000
T25-S300	Correlation Coefficient						1	.941
	Sig.							.002
T25-S400	Correlation Coefficient							1
	Sig.							

T: Temperature, S: Stress

طول عمر بیشتر آن و در نتیجه صرفه اقتصادی این اقدام خواهد بود. همانطور که در بخش ۲-۳ نیز اشاره گردید، هزینه اولیه تولید و استفاده از قیر اصلاح شده پلیمری در آسفالت بیش از آسفالت معمولی خواهد بود که طول عمر بیشتر، کیفیت مطلوب‌تر روسازی در این عمر و

### ۶. توجیه اقتصادی

مبحث اقتصاد در توجیه یک طرح و میزان هزینه و فایده آن به عنوان یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در تصمیم‌گیری‌ها شناخته می‌شود. یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از پلیمرها در صنعت روسازی نیز دستیابی به

بالا رفتن مقاومت مارشال نسبت به نمونه های شاهد می - شود. به طوری که با افزایش میزان ضایعات پلیمر تا ۰/۵٪، بهترین نتیجه حاصل گردید.

- درصد فضای خالی در نمونه های حاوی ضایعات پلیمر نسبت به نمونه های حاوی پلیمر خالص به واسطه افزایش درصد وزنی و حجمی قیر، کمتر است. اگرچه بخشی از بهبود رفتار خستگی حاصل از استفاده از ضایعات پلیمر را می توان به افزایش درصد قیر بهینه به مقدار ۰/۱ نسبت به ترکیبات حاوی پلیمر خالص نسبت داد. با این حال، میزان بهبود رفتار خستگی مخلوط های حاوی ضایعات پلیمر بسیار بیشتر از مخلوط های شاهد می باشد. همچنین، در درصد های بیشتر افزودنی ضایعات پلیمر به قیر، نتایج آزمایش و تحلیل ها برتری نسبی مخلوط های حاوی ضایعات با درصد بیشتر را نسبت به مخلوط های حاوی پلیمر خالص نشان می دهد. لذا، می توان عنوان نمود که نه تنها پلیمر پی بی آر در افزایش عمر خستگی مؤثر بوده، بلکه می توان به منظور کاهش هزینه های اصلاح قیر از ضایعات تولید این محصول نیز با درصد های بیشتر استفاده نمود.

- نتایج حاصل از آزمایش خستگی قطری انجام شده در دو دما و دو سطح تنش متفاوت مشخص می نماید که به طور کلی نمونه های حاوی ضایعات پلیمر نتیجه قابل قبولی را در مقایسه با نمونه های شاهد و حاوی پلیمر خالص از خود نشان دادند.

- بررسی مقادیر به دست آمده از آزمایش تیرخمشی چهارنقطه ای که از روش های متفاوتی به منظور تحلیل مقادیر آن استفاده گردید، بیانگر این مطلب است که به طور کلی افزودن این ضایعات پلیمر، مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی را، به خصوص در سطح کرنش بالا، افزایش می دهد. همچنین، نشان داده شد که ۰/۵٪ وزنی از این ضایعات در سطح کرنش بالاتر دارای عملکرد بهتری نسبت به پلیمر خالص است که به طور میانگین افزایش عمر خستگی تا ۱۳۱٪ را در کرنش ۱۰۰۰ میکرواسترین نشان می دهد.

هزینه های کمتر نگهداری آن باعث توجیه اقتصادی آن در مجموع خواهد شد. همچنین، بایستی توجه داشت که یکی از دلایل عمده هزینه اولیه، تهیه قیر پلیمری قیمت مواد پلیمری خام می باشد. لذا، استفاده از پلیمری که با کارایی مشابه بتواند با هزینه کمتری تهیه شود می تواند مزیت آن محصول باشد که یکی از اهداف بررسی تأثیر ضایعات پلیمر پی بی آر نیز در این تحقیق این موضوع بوده است. لذا، در بررسی های اقتصادی صورت گرفته، با توجه به اختلاف قیمت پلیمر خالص و پلیمر ضایعات می توان به برتری نسبی استفاده از این مواد اشاره نمود. مطابق برآوردهای صورت گرفته و با توجه به قیمت قیر، آسفالت، پلیمر و ضایعات این پلیمر در کشور، تهیه قیر پلیمری با توجه به افزوده شدن درصد قیر مصرفی و همچنین لحاظ نمودن قیمت پلیمر خالص (به میزان ۰/۳٪) باعث افزایش هزینه اولیه تولید آسفالت به میزان ۸/۹ درصد نسبت به تولید آسفالت معمولی خواهد بود. حال، با در نظر گرفتن عملکرد یکسان روسازی تهیه شده با "قیر حاوی ۰/۳٪ پلیمر خالص" و "قیر حاوی ۰/۵٪ ضایعات پلیمر"، برآوردها نشان می دهد که علی رغم افزایش درصد پلیمر ضایعات نسبت به پلیمر خالص و حتی افزوده شدن ۰/۱ درصد در میزان قیر بهینه، به دلیل قیمت بسیار کمتر ضایعات پلیمر، افزایش هزینه تولید قیر با پلیمر ضایعات برابر با ۶/۶ درصد نسبت به تولید آسفالت معمولی خواهد بود. از آنجایی که از لحاظ عملکردی و هزینه های نگهداری، صرفه اقتصادی استفاده از قیرهای پلیمری مشخص شده است، در صورت استفاده از ضایعات پلیمر مذکور به جای پلیمر خالص، منجر به کاهش ۲/۳ درصدی در هزینه های تولید آسفالت با قیر پلیمری خواهد شد.

## ۷. بحث و نتیجه گیری

بر مبنای تحقیقات انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر ارائه می گردد:

- به کارگیری ضایعات پلیمر نام برده، تا حد زیادی باعث

- همانطور که در بخش مطالعات پیشین اشاره گردید، گرچه هزینه اولیه تولید قیرهای پلیمری و به تبع آن آسفالت پلیمری بیشتر از آسفالت معمولی است، اما با بررسی هزینه‌های نگهداری روسازی در طول عمر آن (که معمولاً بیشتر از هزینه‌های احداث اولیه می‌باشد) می‌توان مقرون به صرفه بودن آسفالت‌های پلیمری را ادعان نمود. با توجه به نتایج آزمایش‌های صورت گرفته و همچنین برآوردهای اقتصادی انجام شده، استفاده از ضایعات پلیمری به جای پلیمر خالص می‌تواند موجب کاهش هزینه تولید قیر اصلاح شده شود.

- در مقایسه روش‌های تحلیل عمر خستگی، روش نرخ تغییرات انرژی تلف شده، بیشترین میزان عمر خستگی را ارائه نمود که به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها مورد استفاده پژوهشگران قرار می‌گیرد. در مرتبه بعدی، روش نسبت انرژی (ER) بیشترین عمر خستگی را نتیجه داد که روش آسان‌تری محسوب می‌شود. تحلیل آماری انجام شده نشان داد که اختلاف مقادیر معنی‌داری در سطح ۵٪ بین نتایج حاصل از سه روش ذکر شده وجود دارد.

- طبق تحلیل آماری صورت گرفته، نتایج عمر خستگی حاصل از نتایج آزمایش خستگی قطری و آزمایش تیرخمش چهار نقطه‌ای همبستگی خوبی دارند و می‌توان از آزمایش خستگی قطری به منظور مقایسه رفتار خستگی مخلوط‌ها حاوی پلیمر نیز استفاده نمود.

## ۷. مراجع

- آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران. ۱۳۸۱. نشریه شماره ۲۳۴.
- آریا، ا. ح. ۱۳۹۱. "قیر و آسفالت پاسارگاد". جلد ۱، چاپ اول، انتشارات دانش نوین، تهران.
- طباطبایی، ا. م. ۱۳۸۳. "روسازی راه". چاپ دهم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- عامری، م.، چاووشیان، ف. و وامق، م. ۱۳۹۷. "ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آمیخته پلیمری". مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ۴(۱): ۱۶-۱.
- عامری، م.، وامق، م.، روح‌الامینی، ح. و بمانا، ک. ۱۳۹۴. "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانورس". فصل‌نامه مهندسی حمل‌ونقل، ۶(۴): ۶۲۶-۶۱۳.
- AASHTO T-PP5. 1993. "The laboratory evaluation of modified asphalt systems". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO TP8-94. 2002. "Method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending". AASHTO Provisional Standards.
- AASHTO T321. 2007. "Method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending". AASHTO Standards.
- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R. and Yousefi, A. A. 2017. "Low-temperature adhesion performance of polymer-modified bitumen emulsion in chip seals using different SBR latexes". Petrol. Sci. Technol., 35(1): 59-65.
- Al-Khateeb, G.G. and Ghuzlan, K.A., 2014. "The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration". International Journal of Fatigue, 59: 254-261.
- Al-Khateeb, G. and Shenoy, A. 2004. "A distinctive fatigue failure criterion". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 73: 585-622.
- Ameri, M., Seif, M. R., Abbasi, M. and Khavandi Khiavi, A. 2017. "Viscoelastic fatigue resistance of asphalt binders modified with crumb rubber and styrene butadiene polymer". Petrol. Sci. Technol., 35(1): 30-36.
- Ameri, M., Vamegh, M., Rooholamini, H. and Haddadi, F. 2018. "Investigating effects of nano/SBR polymer on rutting performance of binder and asphalt mixture". Adv. Mater. Sci. Eng., <https://doi.org/10.1155/2018/5891963>.

- ASTM D4123-82. 1995. "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Buncher, M. and Rosenberger, C. 2005. "Understanding the true economics of using polymer modified asphalt through life cycle cost analysis". Asphalt Pavement Alliance, IM029.
- Button, J. W., Little, D. N., Kim, Y. and Ahmed, J. 1987. "Mechanistic evaluation of selected asphalt additives". Assoc. Asphalt Paving Technol., 56: 62-90.
- Carpenter, S. H. 2006. "Fatigue performance of IDOT mixtures". Research Report FHWA-ICT-07-007.
- Cleven, M. A. 2000. "Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures". Master Thesis, Michigan Technological University.
- Ghuzlan, K. and Carpenter, S. 2000. "Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1723: 141-149.
- Harrigan, T., Leahy, R. and Youtcheff, J. 1994. "The superpave mix design system". Manual of Specifications, Test Methods and Practices, SHRP A-379.
- Himisloğlu, S. and Açar, E. 2004. "Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix". Mater. Lett., 58(3-4): 267-271.
- Huang, H. and White, T. 1996. "Dynamic properties of fiber-modified overlay mixture". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1545: 98-104.
- Liang, P., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C. and Ren, S. 2017. Improving thermorheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA)". Constr. Build. Mater., 139: 183-192.
- Loulizi, A., Al-Qadi, I., Bhutta, S. and Flintsch, G. 1999. "Evaluation of geosynthetics used as separators". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1687: 104-111.
- Maggiore, C. 2014. "A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue". Doctoral Dissertation, University of Nottingham.
- 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.
- Pell, P. S. 1962. "Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes". In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, 203(1).
- Pell, P. S. 1973. "Characterization of fatigue behavior". Highway Research Board Special Report.
- Pronk, A. C. and Hopman, P. C. 1990. "Energy dissipation: The leading factor of fatigue". Proceedings of Strategic Highway Research Program: Sharing the Benefits, London.
- Rowe, G. M. and Bouldin, M. G. 2000. "Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures". In: 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona.
- Salehfarid, 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.
- Sargand, S. M. and Kim, S. S. 2003. "Performance evaluation of polymer modified superpave mixes using laboratory tests and accelerated pavement load facility". In: 82<sup>nd</sup> Transportation Research Board Annual Meeting.
- Shen, S. and Carpenter, S. 2005. "Application of the dissipated energy concept in fatigue endurance limit testing". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1929: 165-173.
- Silva, H. M. R. D., Machado, A. V., Oliveira, J. and Costa, L. M. B. 2011. "Waste polymers recycling in high performance asphalt mixtures". In: WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, First International Conference.
- Soudani, K., Cerezo, V. and Haddadi, S. 2017. "Effect of NBR-waste on rheological properties of modified bitumen and mechanical characteristics of the asphalt mix". In: International Congress and Exhibition, Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology, Springer, Cham, pp. 203-213.
- Tayebali, A. A., Rowe, G. M. and Sousa, J. B. 1992. "Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures (with discussion). In: Proceedings of Asphalt Paving Technology Conference, pp. 333-360.
- Yildirim, Y. 2007. "Polymer modified asphalt binders". Constr. Build. Mater., 21(1): 66-72.
- Yousefi, A. A. 2002. "Rubber-modified bitumens". Iran. Polym. J., 11: 303-309.
- Yu JM, Li Z, Wang SH and Xhang XN. 2005. "A study of the fatigue performance of asphalt mixes based on the uniform design method". SATC 2005 Jul.