



Semnan University



Research Article

Fatigue Analysis of Asphalt Mixtures Containing Waste Plastic and Rubber Powder

Ghanbari, M.^{a*} , Fakhri, M.^b , Gorgi, K.^c 

^a Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Professor, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^c Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-07-30

Revised: 2023-09-11

Accepted: 2023-09-14

Keywords:

Fatigue;

Asphalt mixture;

Rubber powder;

Energy method.

ABSTRACT

Dissemination of polymeric wastes in the environment is one of the most important concerns of the world today. Used plastics and worn tires are one of the most important sources of this type of waste. Chemically, these materials are very similar to bitumen as the most used and expensive component of asphalt mixtures. Therefore, using these waste materials as an additive in bitumen, while reducing environmental pollution, can improve the performance characteristics of the pavement. Investigating the effect of each type of additive on the fatigue performance of asphalt mixture, as one of the most important factors in causing pavement damage, is essential. Therefore, in this research, in addition to examining the physical properties of bitumen, the fatigue performance of asphalt mixture containing different percentages of waste plastic and rubber powder has been investigated using the four-point bending beam method. Results of this test were analyzed using the hardness method, normalized hardness and energy method. Results showed that waste plastic reduced the fatigue resistance of the asphalt mixture, which was compensated to a significant extent by adding rubber powder. So that the samples containing rubber powder and waste plastic simultaneously had a longer fatigue life than the control sample.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31392.1645>

* Corresponding author.

E-mail address: Mgheducational@gmail.com

How to cite this article: Ghanbari, M., Fakhri, M., & Gorji, K. (2023). Fatigue Analysis of Asphalt Mixtures Containing Waste Polyethylene and Rubber Powder. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 1-21. doi: [10.22075/jtie.2023.31392.1645](https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31392.1645)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

تحلیل خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی اتیلن ضایعاتی و پودر لاستیک

مرتضی قنبری^{۱*}، منصور فخری^۲، کوشا گرجی^۳

^۱دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۳دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸	انتشار زباله‌های پلیمری در محیط‌زیست یکی از دغدغه‌های مهم روز دنیا می‌باشد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰	پلاستیک‌های مصرف شده و تایرهای فرسوده از مهمترین منابع تولید این نوع زباله‌ها می‌باشند.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳	این مواد، به لحاظ شیمیایی، شباهت بسیاری به قیر به عنوان پرمصرف‌ترین و گران‌ترین جزء مخلوط‌های آسفالتی دارند. لذا، استفاده از این مواد زباله به عنوان افزودنی در قیر، ضمن کاهش آلودگی زیست‌محیطی، می‌تواند موجب بهبود خصوصیات عملکردی روسازی گردد.
واژگان کلیدی:	بررسی تأثیر هر نوع افزودنی بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی، به عنوان یکی از مهمترین عوامل ایجاد خرابی در روسازی، ضروری می‌باشد. لذا، در این پژوهش، علاوه بر بررسی خصوصیات فیزیکی قیر، با استفاده از روش تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای، به بررسی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک پرداخته شده است. نتایج حاصل از این آزمایش با استفاده از روش سختی، سختی نرمال شده و روش انرژی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که پلاستیک ضایعاتی باعث کاهش مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی شد که با افزودن پودر لاستیک تا حد قابل توجهی این ضعف جبران گردید. به طوری که نمونه‌های حاوی همزمان پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی، عمر خستگی بیشتری از نمونه شاهد داشتند.
مخلوط آسفالتی، پودر لاستیک، روش انرژی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31392.1645>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mgheducational@gmail.com

استناد به این مقاله: قنبری، مرتضی، فخری، منصور، & گرجی، کوشا. (۱۴۰۲). تحلیل خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی اتیلن ضایعاتی و پودر لاستیک. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۳)، ۲۱-۱. doi: 10.22075/jtie.2023.31392.1645

۱. مقدمه

سالانه میلیون‌ها تن زباله حاصل از مصرف پلاستیک در دنیا تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از آن وارد محیط‌زیست شده و سال‌ها بدون آنکه دچار تجزیه شود باعث آلودگی زمین می‌گردد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴؛ چین و دامن، ۲۰۱۹؛ وو و مونتالوو، ۲۰۲۱). آمارها نشان می‌دهد که مقادیر بسیاری از زباله‌های تولیدی بازیافت نمی‌گردند (گیر و همکاران، ۲۰۱۷؛ وو و مونتالوو، ۲۰۲۱؛ OECD، ۲۰۲۲). تولید این حجم از پلاستیک زباله آن را در زمره آلاینده‌ترین مواد زیست‌محیطی قرار می‌دهد. زباله‌های پلاستیکی، به دلیل آلودگی خاک، دریا و اتمسفر، به‌ویژه زمانی که به شکل میکرونانو پلاستیک باشند، نگرانی زیادی ایجاد کرده‌اند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). زباله‌های پلاستیکی که در دسته‌بندی پلیمرها در دسته ترموپلاستیک‌ها قرار می‌گیرند پلیمرهای هیدروکربنی بوده که شباهت بسیاری از لحاظ شیمیایی به قیر، به عنوان پرمصرف‌ترین فرآورده نفتی در صنعت روسازی دارد. همین امر باعث گردیده رویکرد استفاده از پلاستیک ضایعاتی در قیر روشی سودمند، هم برای محیط‌زیست، به دلیل کاهش انباشت زباله در طبیعت، و هم برای صنعت روسازی به دلیل بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی باشد (وارگاس و الهاننده، ۲۰۲۱). پلاستیک‌ها انواع مختلفی دارند که شامل پلی‌اتیلن با چگالی زیاد (HDPE^۱)، متوسط (MDPE^۲) و کم (MDPE^۳) می‌باشند. تفاوت آنها در ساختار و شاخه‌های فرعی آنها می‌باشد. نقطه نرمی آنها تقریباً در محدوده ۱۰۸ الی ۱۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد که شدیداً به نوع ساختار مولکولی آنها وابسته است (برازیلیرو و همکاران، ۲۰۱۹). پلی‌اتیلن با چگالی زیاد یکی از پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها در سراسر دنیا می‌باشد (محمود و همکاران، ۲۰۱۸) که در تولید درپوش‌های

پلاستیکی، فنجان‌های پلاستیکی نوشیدنی، کلاه‌های سخت، لوله‌ها، بطری‌ها، اسباب‌بازی‌ها و سایر وسایل مورد استفاده قرار می‌گیرد (بهنود و مدیری، ۲۰۱۹؛ برازیلیرو و همکاران، ۲۰۱۹؛ وو و مونتالوو، ۲۰۲۱). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از انواع پلاستیک‌های ضایعات در قیر و مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است (هینیسلی‌اُغلو و آگار، ۲۰۰۴؛ پونیث و همکاران، ۲۰۱۱؛ احمدی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ جوهری و گیوستونزی، ۲۰۲۰؛ محمود و همکاران، ۲۰۱۸؛ ما و همکاران، ۲۰۲۱). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که افزودن پلاستیک ضایعاتی به طور قابل توجهی سفتی و مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط پایه را افزایش می‌دهد (جان و همکاران، ۲۰۱۱؛ خان و همکاران، ۲۰۱۶؛ نصر و پاک-شیر، ۲۰۱۷؛ آپیا و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعه اتلمنان و همکاران (۲۰۱۱)، مخلوط آسفالتی حاوی پلی‌اتیلن سنگین عملکرد بهتری از نظر مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی نسبت به نمونه معمولی نشان داد. هینیسلی اوغلو و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی امکان استفاده از HDPE در مخلوط‌های آسفالتی نشان دادند که مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های حاوی پلاستیک ضایعاتی افزایش می‌یابد. حیدر و همکاران (۲۰۲۰) از LDPE و HDPE ضایعاتی به دو روش خشک (جایگزین سنگ‌دانه‌ها) و تر (افزودن به قیر) استفاده کردند. در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های کمی و کیفی نشان دادند که مخلوط آسفالتی حاوی پلاستیک ضایعاتی حساسیت رطوبتی کمتری دارد. برخی مطالعات نشان می‌دهند که بر خلاف عملکرد دمای زیاد مخلوط آسفالتی حاوی پلی‌اتیلن، عملکرد دمای کم و متوسط ضعیفی دارند (ال عبدالوهاب و همکاران، ۲۰۱۷؛ دو و همکاران، ۲۰۲۰؛ دوارته و فاکسینا، ۲۰۲۱ a)؛ اگرچه گی و همکاران (۲۰۱۶) ادعایی خلاف این موضوع را در

³- Low Density Polyethylene

¹- High Density Polyethylene

²- Medium Density Polyethylene

محض پایان یافتن، شکل اولیه خود را بازیابی کنند (برازیلرو و همکاران، ۲۰۱۹). لذا، استفاده از پودر لاستیک (CR)^۱ برای بهبود قیر و مخلوط آسفالتی مورد توجه پژوهشگران و صنعت قرار گرفته است. از جمله فواید استفاده از پودر لاستیک ضایعاتی در قیر، بهبود خصوصیات شیارشدگی، خستگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای کم و بهبود حساسیت رطوبتی می باشد (دوارته و فاکسینا، ۲۰۲۱ a). برخی از پژوهشگران به منظور بهبود نقاط ضعف پلیمرها، استفاده ترکیبی از آنها (به ویژه ترکیب الاستومر- پلاستومر) را مورد مطالعه قرار داده اند (ناوارو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژانگ و هو، ۲۰۱۵؛ گی و همکاران، ۲۰۱۶؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ یان و همکاران، ۲۰۲۱). ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی عملکرد دمای زیاد و کم قیر اصلاح شده و مخلوط آسفالتی با ترکیبی از پودر لاستیک و پلی اتیلن پرداختند. مخلوط آسفالتی تهیه شده با CR و PE عملکرد قابل توجهی نسبت به SBS را در دماهای زیاد و کم نشان داد.

یائو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی نشان دادند که استفاده از ترکیب پلی اتیلن و پودر لاستیک، خصوصیات قیر در دمای زیاد و کم را بهبود بخشیده است. حسن پور و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد قیر اصلاح شده با ترکیبی از مواد بازیافتی شامل پلی اتیلن، پودر لاستیک و تیوب (EPDM) را با استفاده از آزمایش های سنتی و جدید LAS و MSCR مورد بررسی قرار دادند. براساس گزارش آنها، خصوصیات رئولوژی قیر بهبود یافته، اگرچه مقاومت خستگی قیر اصلاح شده کاهش یافت. گی و همکاران (۲۰۱۶) با مطالعه خصوصیات رئولوژی قیر اصلاح شده با پلی اتیلن بازیافتی و پودر لاستیک ضایعاتی نشان دادند که افزودن هم زمان این دو ماده منجر به کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی شده و همچنین درجه عملکرد دمای زیاد به طور قابل توجهی افزایش می یابد؛

تحقیق خود نشان دادند. عبدالوهاب و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود نشان دادند که قیر اصلاح شده با پلاستیک ضایعاتی HDPE و LDPE فاقد توانایی بازیابی کرنش کافی می باشد. برخی نیز با مقایسه عملکرد دمای کم HDPE و LDPE گزارش کرده اند که عملکرد دمای کم HDPE به دلیل توزیع وزن مولکولی محدودتر به خوبی LDPE نمی باشد (هو و همکاران، ۲۰۰۶). جونگ و همکاران (۲۰۱۱) با PE زباله به عنوان اصلاح کننده قیر کار کردند و عملکرد مکانیکی را مشخص نمودند. نتایج مقاومت شیارشدگی بهتری را نشان داد. در پژوهشی که توسط کوستا و همکاران (۲۰۱۹) صورت گرفت مشخص گردید که قیر اصلاح شده با HDPE بازیافتی در مقایسه با قیر اصلاح شده با SBS دارای سفتی بیشتر، درجه نفوذ کمتر و قابلیت ارتجاعی و بازیابی خزش بدتری بود که نشان می داد HDPE عملکرد دمای زیاد قیر را بهبود داده، اما باعث ضعف آن در دمای متوسط می گردد. لیانگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی همبستگی بین ساختار انواع پلی اتیلن ها و عملکرد قیر اصلاح شده پرداختند. در این پژوهش، نشان داده شد که پلیمر HDPE موجب بهبود خصوصیات دمای زیاد قیر شده، در حالی که رفتار قیر در دمای کم و متوسط ضعیف می گردد.

لاستیک های فرسوده از دیگر زباله هایی است که سالانه با حجم میلیونی توسط صنعت حمل و نقل تولید می شوند. بخش زیادی از لاستیک های فرسوده وسایل نقلیه بدون آنکه مجدداً به روش های بازیافت در صنعت حمل و نقل مورد استفاده قرار گیرند روی زمین انباشته و یا سوزانده می شوند که باعث آلودگی و تولید گازهای گلخانه ای می گردند (فخری و صابری، ۲۰۱۶). لاستیک ها بخشی از گروه پلیمرهایی هستند که به عنوان الاستومر شناخته می شوند؛ به این معنی که آنها می توانند به طور قابل توجهی در اثر تنش های وارده تغییر شکل داده و به

¹- Crumb rubber

لاستیک و پلاستیک ضایعاتی از نوع HDPE پرداخته است. بدین منظور، ابتدا قیر با مقادیر صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی ساخته شد و به منظور بهبود خصوصیات آن از ۱۰ درصد پودر لاستیک استفاده گردید. ابتدا آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی برای بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر خصوصیات فیزیکی قیر و همچنین حساسیت دمایی آن انجام گردید. سپس، به منظور بررسی عملکرد خستگی با استفاده از تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای (4PB) روش‌های سختی و انرژی تلف شده برای تحلیل نتایج خستگی مورد استفاده قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد

۲-۱-۱. قیر خالص

قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ از شرکت نفت جی تهیه و به عنوان قیر پایه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات این قیر بر اساس استانداردهای ASTM D92، ASTM D5، ASTM D113، ASTM D36، ASTM D2170 و ASTM D7 در جدول ۱ آورده شده است.

اگرچه درجه عملکرد دمای کم پس از اصلاح تغییری نداشت. لیانگ و همکاران (۲۰۲۱) خصوصیات قیر و مخلوط اصلاح شده با پلی‌اتیلن سنگین را بررسی کردند. استفاده از دو افزودنی باعث کاهش درجه نفوذ و داکتیلیتی و افزایش نقطه نرمی قیر گردید. در مخلوط آسفالتی نیز باعث افزایش پایداری مارشال و سفتی گردید. همچنین، باعث بهبود مقاومت شیارشدگی و خرابی رطوبتی گردید (جبرئیل و فنگ، ۲۰۱۷).

با توجه به مرور ادبیات انجام شده می‌توان دریافت که استفاده از پودر لاستیک به همراه پلاستیک ضایعاتی در قیر ضمن جبران کاستی‌های یکدیگر در بحث عملکرد مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش مصرف زباله پلیمری در مخلوط آسفالتی گردیده و گامی مؤثرتر در راستای توسعه پایدار و کاهش آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد. با توجه به اینکه نتایج همسویی بین تحقیقات پیشین در مورد عملکرد قیر حاوی همزمان پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی، به‌ویژه در مورد خستگی، وجود ندارد و همچنین پژوهش‌های انجام شده روی مخلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی، به‌ویژه HDPE ضایعاتی، هم اندک هستند، این پژوهش به منظور تلاشی مضانف در راستای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک به بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی پودر

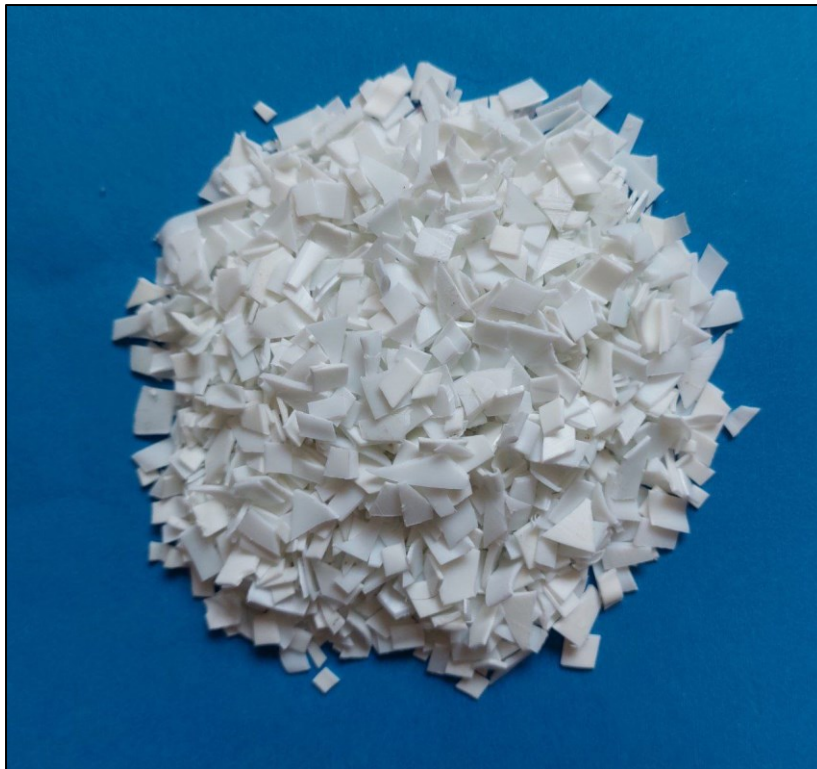
جدول ۱. خصوصیات قیر خالص

روش آزمایش	نتایج	آزمایش
ASTM D-7	۱/۰۴	دانسیته
ASTM D-5	۶۵	درجه نفوذ، mm/10، 25 °C
ASTM D-36	۵۰	نقطه نرمی، °C
ASTM D-113	۱۰۰	کشش‌پذیری در ۲۵ °C، cm
ASTM D-2170	۳۹۰	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ °C، cSt
ASTM D-92	۳۳۰	نقطه اشتعال، °C

۲-۱-۲. پلاستیک ضایعاتی

۰/۵ × ۰/۵ سانتی متر برش داده شد (شکل ۱). ماده اولیه در تولید این بطری‌ها پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPE) می‌باشد. اطلاعات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه گردیده است.

پلاستیک ضایعاتی در این پژوهش از بطری‌های مایع ظرف‌شویی زباله تهیه و به شکل پرک در ابعاد حداکثر



شکل ۱. پلاستیک ضایعاتی پرک شده

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی HDPE

مشخصه	مقدار	واحد	استاندارد
دانسیته	۰/۹۵۲	gr/cm ³	ASTM D 1505
سرعت جریان مذاب (۱۹۰°C/۲/۱۶ kg)	۱۸	g/10 min	ASTM D 1238
مقاومت کششی	۲۹۰	kg/cm ²	ASTM D 638
مدول خمشی	۱۳۵۰	MPa	ASTM D 790
نقطه نرمی ویکات	۱۲۲	°C	ASTM D 1525

۳-۱-۲. پودر لاستیک

شرکت مهرفانه تجارت تهیه گردید. به منظور تهیه پودر لاستیک مش ۵۰، از الک نمره ۵۰ عبور داده شد.

پودر لاستیک استفاده شده در این پژوهش (شکل ۲) که حاصل خرد کردن تایرهای فرسوده کامیون‌ها می‌باشد از



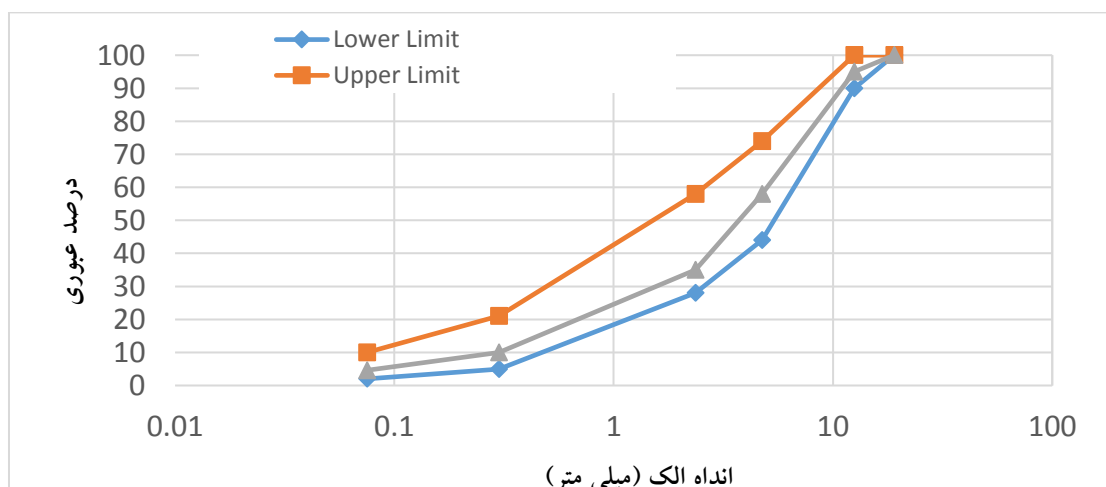
شکل ۲. پودر لاستیک

۴-۱-۲. سنگدانه

۲-۲. آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها

در منابع مختلف، روش‌های گوناگونی برای اختلاط قیر و پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک مورد استفاده قرار گرفته است (چن و سلیمانان، ۲۰۱۹؛ نظام‌الدین و همکاران، ۲۰۲۰؛ توسته مارتینز و همکاران، ۲۰۲۱؛ دوارته و فاکسینا، ۲۰۲۱ b). در این پژوهش، نحوه ساخت قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی با کمی اصلاح به روشی انجام گردید که توسط دوارته و فاکسینا (۲۰۲۱ b) مورد استفاده قرار گرفته است.

مصالح سنگی به عنوان یکی از مهمترین اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط‌های آسفالتی است که تقریباً ۹۵ درصد حجم آسفالت گرم را شامل می‌شود. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مطابق آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران کد ۲۳۴ بوده و دانه‌بندی استفاده شده در این تحقیق، مطابق دانه‌بندی شماره ۴ نشریه مذکور است. این دانه‌بندی هم در لایه بیندر و هم در لایه رویه برای تهیه مخلوط متراکم قابل استفاده است. دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد AASHTO-T27 در شکل ۳ ترسیم شده است.



شکل ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی

افزوده شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. سپس، پودر لاستیک به مقدار مشخص به قیر افزوده، دما تا ۱۸۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و به مدت ۱/۵ ساعت با دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه با همزن برش بالا هم زده شد. نمونه‌های ساخته شده با این دو پلیمر در جدول ۲ نشان داده شده است. بعد از ساخت قیرهای اصلاح شده، مخلوط آسفالتی برای انجام آزمایش خستگی با استفاده از متراکم‌کننده غلظتی (برای ساخت تیرچه‌های خستگی) متراکم گردید. به منظور کاهش متغیرهای تأثیرگذار بر نتایج، تمامی نمونه‌ها با درصد قیر مخلوط شاهد ساخته شدند.

این پژوهش در مقادیر صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد جهت بررسی انتخاب گردید. همچنین، با توجه به آنکه افزایش پودر لاستیک به بیش از ۱۰ درصد منجر به کاهش قایل توجه درجه نفوذ و در نتیجه باعث سفتی بیش از حد قیر اصلاح شده می‌گردد، به منظور کاهش اثرات منفی پلاستیک ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، به ویژه در دمای متوسط، از ۱۰ درصد پودر لاستیک استفاده گردید. برای ساخت قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی ابتدا قیر تا دمایی که بیشتر از نقطه نرمی بوده گرم شده و سپس دما تا ۱۶۰ درجه سلسیوس رسانده شد. پلاستیک ضایعاتی در مقادیر مشخص به قیر

جدول ۲. نمونه‌های ساخته شده

شماره نمونه	HDPE ^۲ درصد نسبت به وزن قیر	CR ^۱ درصد نسبت به وزن قیر	نام اختصاری
۱	۰	۰	A
۲	۲	۰	H2
۳	۴	۰	H4
۴	۶	۰	H6
۵	۰	۱۰	C10
۶	۲	۱۰	H2C10
۷	۴	۱۰	H4C10
۸	۶	۱۰	H6C10

می‌گردد. در این تست، میزان نفوذ سوزن تحت بار ۱۰ گرمی در مدت زمان ۵ ثانیه به صورت دهم میلی‌متر به عنوان درجه نفوذ گزارش می‌شود. آزمایش نقطه نرمی به منظور تعیین دمای نرم شدن قیر مطابق استاندارد ASTM D6 انجام گردید.

۳-۲. روش آزمایش

۳-۲-۱. درجه نفوذ و نقطه نرمی

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی قیرهای اصلاح شده، آزمایش‌های درجه نفوذ مطابق ASTM D5 انجام گردید. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام

^۱- Crumb Rubber

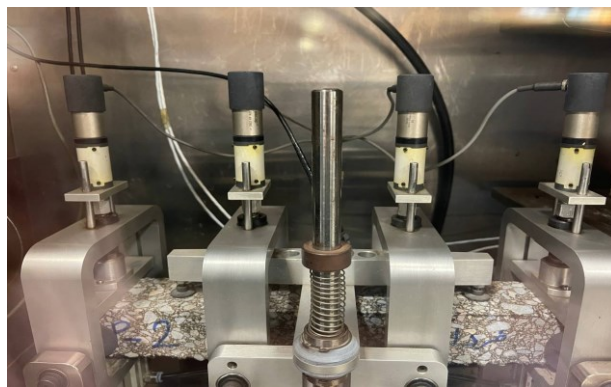
^۲- High Density Polyethylene

غلظتی، نمونه‌ها در ابعاد $50 \times 40 \times 300$ میلی‌متر ساخته شدند. پس از آماده شدن دال‌ها، آنها به ابعاد $385 \times 60 \times 50$ میلی‌متر برش داده شدند. از هر دال، چهار تیرچه جهت آزمایش ساخته می‌شود. نمونه‌های تیرچه شکل (شکل ۴) پس از ساخت با استفاده از دستگاه UTM تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای قرار گرفتند (شکل ۵). اگرچه به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دمای میانی، رفتار خستگی به سطح تنش و کرنش اعمالی وابسته است اما به دلیل محدودیت زمانی و امکانات در این پژوهش خستگی تنها در حالت کنترل کرنش و در کرنش ۶۰۰ میکرو استرین و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردید.

۲-۳-۲. آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای
آزمایش خستگی خمشی جهت توصیف و تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای میانی روسازی استفاده می‌شود. این آزمایش امکان برآورد عمر خستگی روسازی تحت بارگذاری تکراری ترافیک را میسر می‌سازد. استانداردهای انجام آزمایش خستگی تیرچه خمشی ASTM D7460 و AASHTO T321 است. آزمایش خستگی خمشی با قرار دادن تیرچه آسفالتی تحت بارگذاری تکراری چهارنقطه‌ای در یک سطح کرنش یا تنش ثابت با فرکانس ۱۰ هرتز در طی آزمایش انجام می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از متراکم کننده



شکل ۴. تیرچه‌های آزمایش خستگی



شکل ۵. نمونه تحت آزمایش 4PB

درجه نفوذ و نقطه نرمی از آزمایش‌های ابتدایی و متداول برای بررسی خصوصیات فیزیکی قیر می‌باشد. به

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی

داشته است.

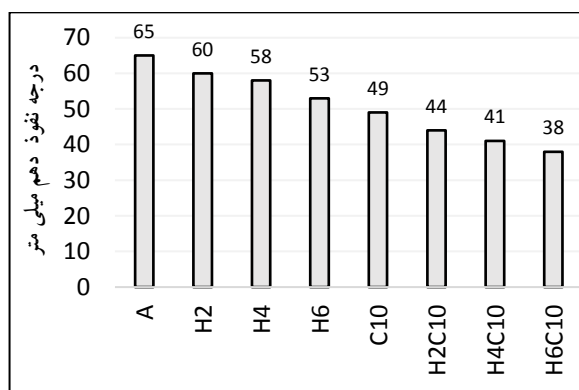
با استفاده از درجه نفوذ و نقطه نرمی، پارامتر مهمی تحت عنوان شاخص نفوذ (PI)^۱ معرفی می‌گردد. این شاخص میزان حساسیت قیر^۲ به تغییرات دمایی را نشان می‌دهد و از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. با افزایش PI، حساسیت قیرها به دما کاهش می‌یابد (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵؛ مینگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبدالواحد و همکاران، ۲۰۲۰). همانطور که در شکل ۶- ج به تصویر کشیده شده است، افزودن پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک حساسیت دمایی را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد. بیشترین PI مربوط به نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعات و ۱۰ درصد پودر لاستیک می‌باشد که با شاخص نفوذ ۰/۵۷۱+ نسبت به نمونه شاهد با شاخص نفوذ ۰/۵۶۷- افزایش قابل توجهی داشته است.

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (1)$$

$$A = \frac{\log 800 - \log(\text{pen}@25^\circ)}{T_{R\&B} - 25^\circ} \quad (2)$$

که $\text{pen}@25^\circ$ درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس و $T_{R\&B}$ نقطه نرمی قیر می‌باشد.

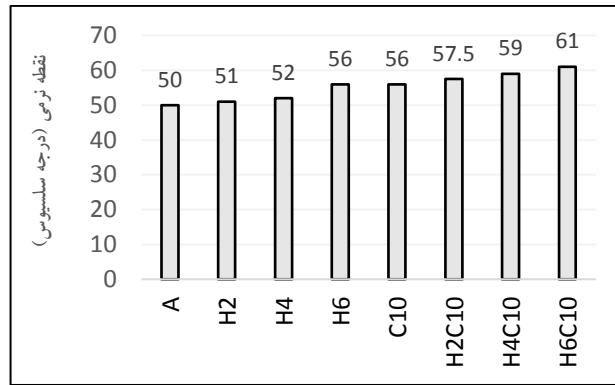
طور کلی، کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی بیانگر ویسکوزیته زیاد و سفت‌تر شدن قیر می‌باشد. در نتیجه، مخلوط حاصل از آن مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل نشان می‌دهد. افزودن پلاستیک و پودر لاستیک به قیر با جذب روغن‌های سبک قیر و تورمشان منجر به افزایش سفتی قیر گردیده و در نتیجه درجه نفوذ آن را کاهش می‌دهند. همچنین، بیشتر بودن نقطه نرمی پلاستیک HDPE از دمای آزمایش، یعنی ۲۵ درجه سلسیوس، و دمای نقطه نرمی قیر خالص نیز از دلایل دیگر کاهش درجه نفوذ نمونه‌های حاوی پلاستیک می‌باشد. نتایج درجه نفوذ و نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پلاستیک ضایعاتی، درجه نفوذ کاهش یافته و نقطه نرمی افزایش می‌یابد. افزودن پودر لاستیک به قیر نیز منجر به کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی می‌گردد. افزودن همزمان پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک تأثیر بیشتری بر درجه نفوذ و نقطه نرمی داشته به طوری که قیر حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک با درجه نفوذ ۳۸ و نقطه نرمی ۶۱ کمترین درجه نفوذ و بیشترین نقطه نرمی را بین نمونه‌ها



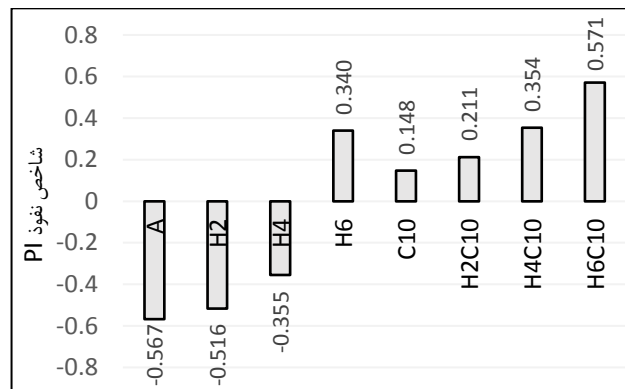
(الف)

²- Temperature Susceptibility

¹- Penetration Index



ب.



ج.

شکل ۶. نتایج تست قیر: الف) درجه نفوذ، ب) نقطه نرمی و ج) شاخص نفوذ

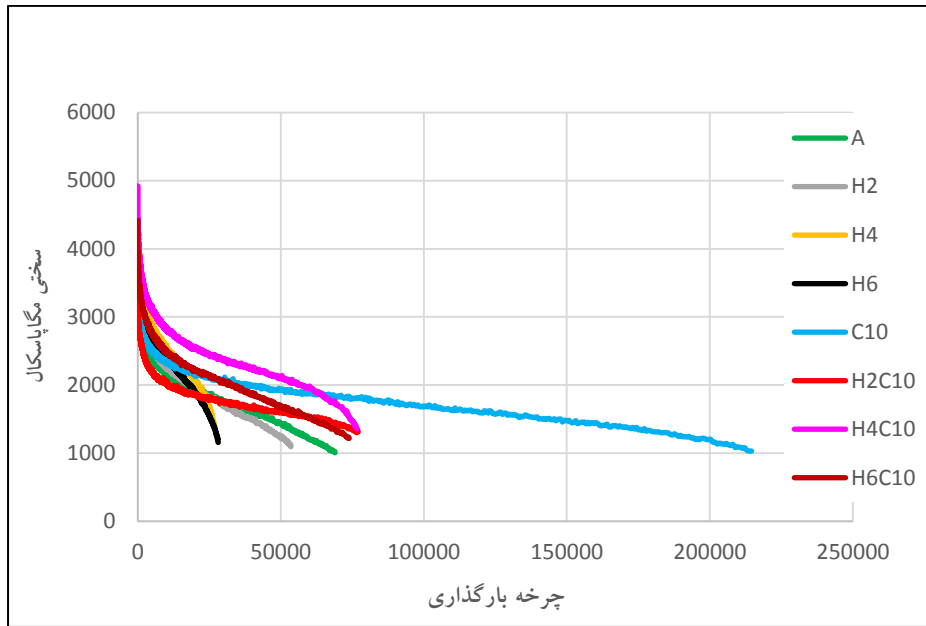
می‌شود.

۲-۳. تست خستگی

برای ارزیابی مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه یک شاخص برای تعیین نقطه شکست و عمر خستگی ضروری می‌باشد. تا کنون چندین معیار برای شناسایی نقطه شکست خستگی مخلوط آسفالتی ارائه شده است که بر اساس آنها عمر خستگی مخلوط تعریف می‌شود (چنگ و همکاران، ۲۰۲۲). در این بخش، به ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی حاوی پلیمرهای ضایعاتی با روش‌های کاهش سختی، سختی نرمال شده- تکرار و روش انرژی تلف شده پرداخته

۱-۲-۳. روش کاهش سختی

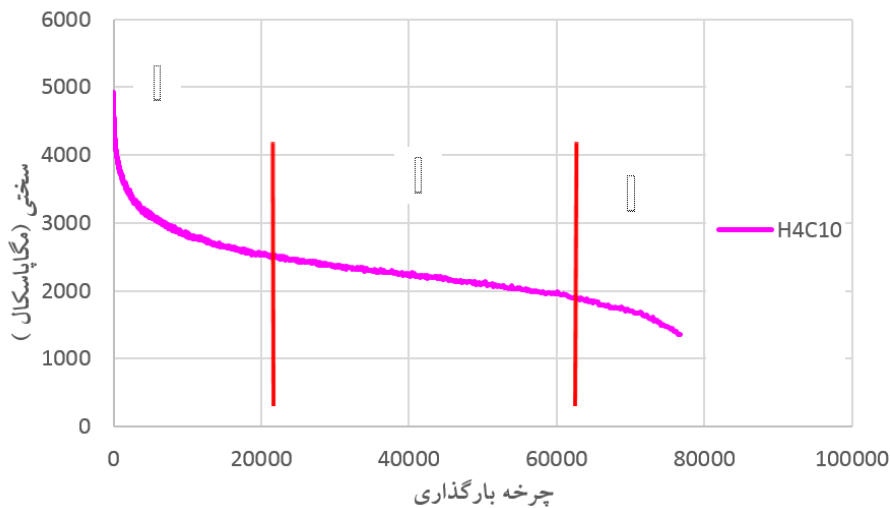
یکی از معیارهای متداول جهت تعیین نقطه شکست، معیار کاهش سختی به مقدار ۵۰ درصد سختی اولیه می‌باشد. این روش در AASHTO T321 مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق تعریف استاندارد، خستگی یک نمونه تعداد سیکل‌های لازم برای رسیدن سختی خمشی نمونه به مقدار ۵۰ درصد مقدار اولیه آن می‌باشد. نتایج آزمون خستگی به صورت نمودارهای چرخه بارگذاری- سختی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار چرخه بارگذاری - سختی نمونه‌ها

قسمت شکل‌گیری ترک‌های ریز (میکروتُرک) است که بیشترین مقدار سیکل (عمر) را به خود اختصاص می‌دهد. در آخر، با گسترش ترک‌های ریز و شکل‌گیری ترک‌های بزرگتر، سختی نمونه به سرعت کاهش یافته و خرابی اتفاق می‌افتد.

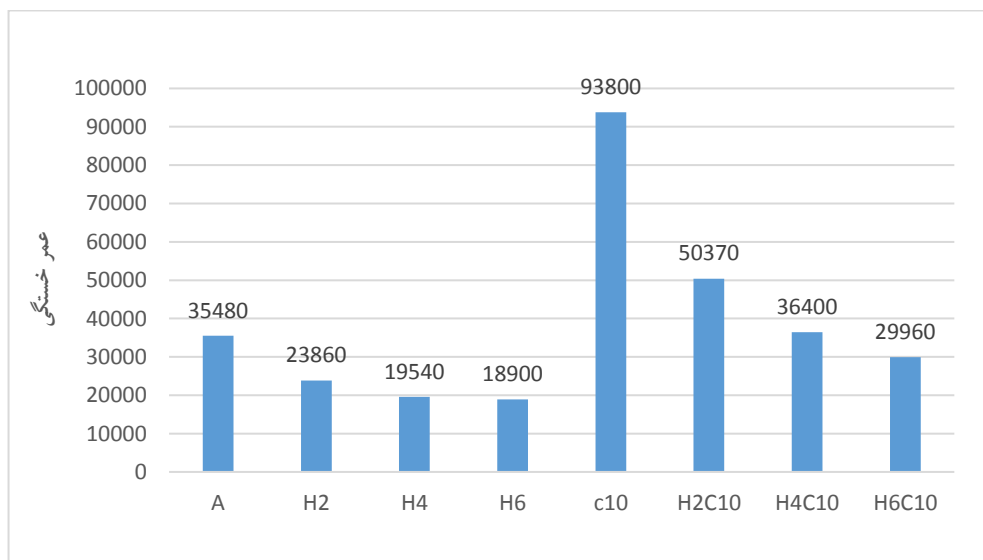
همانطور که به عنوان نمونه در نمودار شکل ۸ برای نمونه حاوی ۴ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک نشان داده شده است، هر نمودار خستگی شامل سه قسمت می‌باشد. قسمت اول که در سیکل‌های اولیه اتفاق می‌افتد، انرژی وارد شده به نمونه منجر به تولید گرما و کاهش سریع سختی می‌شود. به دنبال آن،



شکل ۸. مراحل شکل‌گیری و گسترش ترک‌های خستگی نمونه H4C10

آن مخلوط آسفالتی شکننده‌تر شود. افزودن پودر لاستیک به قیر به تنهایی تأثیر بسیار زیادی بر عملکرد خستگی نمونه می‌گذارد، به طوری که عمر خستگی را در مخلوط به طور قابل توجهی (حدود ۶۸ درصد) افزایش می‌دهد. افزودن پودر لاستیک باعث می‌گردد مخلوط آسفالتی رفتار الاستیک بیشتری داشته باشد و در برابر خستگی مقاومت بهتری بیاید. با افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک به نمونه‌های حاوی ۲ الی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی، کاهش مقاومت خستگی آنها را تا حد قابل توجهی جبران می‌کند، به طوری که افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک به نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد پلاستیک ضایعاتی عمر خستگی آنها را به ترتیب به میزان ۵۰۳۷۰ و ۳۶۴۰۰ سیکل افزایش می‌دهد. افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک به نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی اگرچه عمر خستگی آن را به نسبت همان نمونه بدون پودر لاستیک افزایش می‌دهد، اما همچنان عمر خستگی آن از نمونه شاهد با عمر ۲۹۹۶۰ سیکل کمتر می‌باشد.

روند تغییرات سختی در زمان‌های اولیه بارگذاری نشان می‌دهد نمونه‌هایی که تنها حاوی پلاستیک ضایعاتی می‌باشند شیب بیشتری دارند که بیانگر این واقعیت است که مقاومت نمونه با سرعت بیشتری کاسته می‌شود. شکل ۹، عمر خستگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. افزودن پلاستیک ضایعاتی عمر خستگی را کاهش می‌دهد. اگرچه تفاوت زیادی بین عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی وجود نداشت، اما نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی با تحمل ۱۸۹۰۰ تکرار بارگذاری برای رسیدن به نصف سختی اولیه خود کمترین عمر خستگی را بین نمونه‌ها داشت. علت کاهش عمر خستگی، تردی و شکنندگی مخلوط حاوی پلاستیک ضایعاتی می‌باشد که مرحله مقاومت در برابر رشد میکروتکرک‌ها (مرحله دوم از نمودار سختی-سیکل) کاهش یافته و به دلیل رشد سریع ترک‌ها نمونه سریع‌تر خراب می‌شود. علاوه بر این، پلاستیک HDPE با جذب روغن‌های بخش مالتن قیر منجر به افزایش نسبت آسفالتین به مالتن گشته و موجب می‌گردد قیر و به تبع



شکل ۹. عمر خستگی بر اساس ۵۰ درصد سختی

۲-۲-۳. روش سختی نرمال شده- تکرار

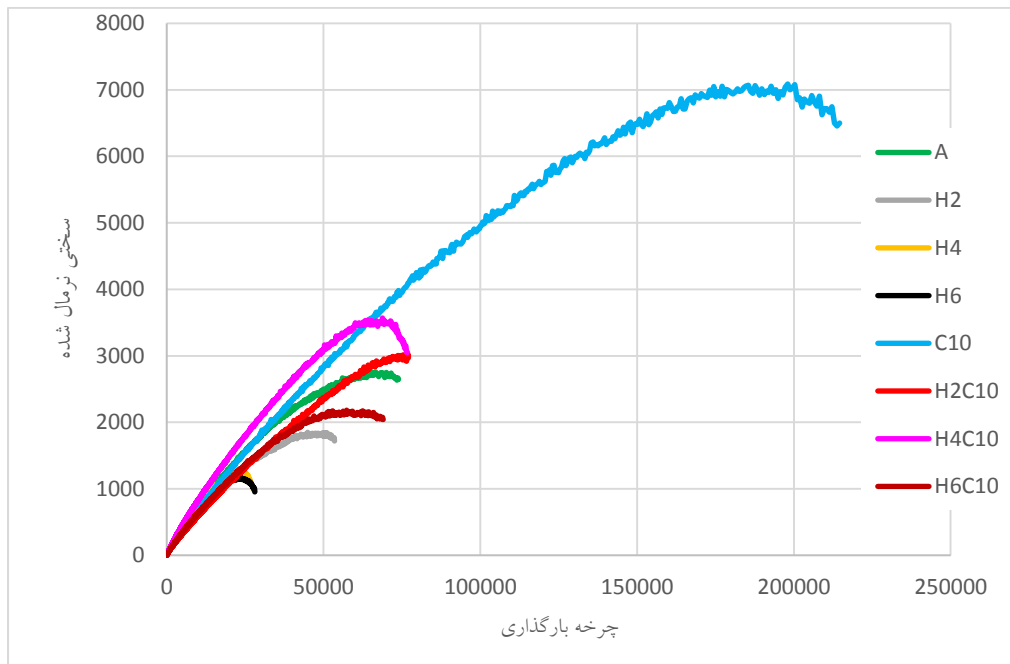
ASTM D7460 روش دیگری تحت عنوان مدول سختی نرمال شده- تکرار (NM) را برای تعیین نقطه خرابی مخلوط اتخاذ می‌کند. در این روش، که توسط رو و بولدین (۲۰۰۰) پیشنهاد شده است مدول سختی نرمال شده- تکرارها (NM) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. پس از رسم مقدار NM در مقابل تکرار بارگذاری، نقطه اوج منحنی به عنوان محل شکست و تعداد تکرار معادل آن عمر خستگی مخلوط تعیین می‌گردد.

تکرارهای مدول سختی نرمال شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NM = \frac{S_i N_i}{S_0 N_0} \quad (3)$$

که در آن S_i سختی مخلوط در تکرار i ، N_i تعداد

تکرارها، S_0 مدول اولیه (MPa) و N_0 تکرار بار است، جایی که سختی اولیه تخمین زده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، روند تغییرات مقاومت خستگی در این روش مشابه روش قبلی می‌باشد. مطابق جدول ۳، با افزودن پلاستیک ضایعاتی از ۲ الی ۶ درصد، مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد. افزودن پودر لاستیک، مقاومت خستگی را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. پودر لاستیک کاهش مقاومت ناشی از افزودن پلاستیک ضایعاتی را به طور قابل ملاحظه‌ای جبران می‌کند. در این روش تحلیل نیز عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک و ۲ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک و ۴ درصد پلاستیک ضایعاتی به ترتیب با ۷۶۴۴۰ و ۶۹۳۶۰ سیکل بیشتر از عمر خستگی نمونه شاهد با ۶۷۰۹۰ سیکل بارگذاری می‌باشد.



شکل ۱۰. نمودار چرخه بارگذاری-NM

¹- The normalized stiffness modulus _ repetitions (NM) criterion

جدول ۳. عمر خستگی به روش NM

مخلوط	عمر خستگی
A	۶۷۰۹۰
H2	۴۹۸۶۰
H4	۲۴۷۳۰
H6	۲۳۹۲۰
C10	۱۹۳۴۹۰
H2C10	۷۶۴۴۰
H4C10	۶۹۳۶۰
H6C10	۶۱۹۷۰

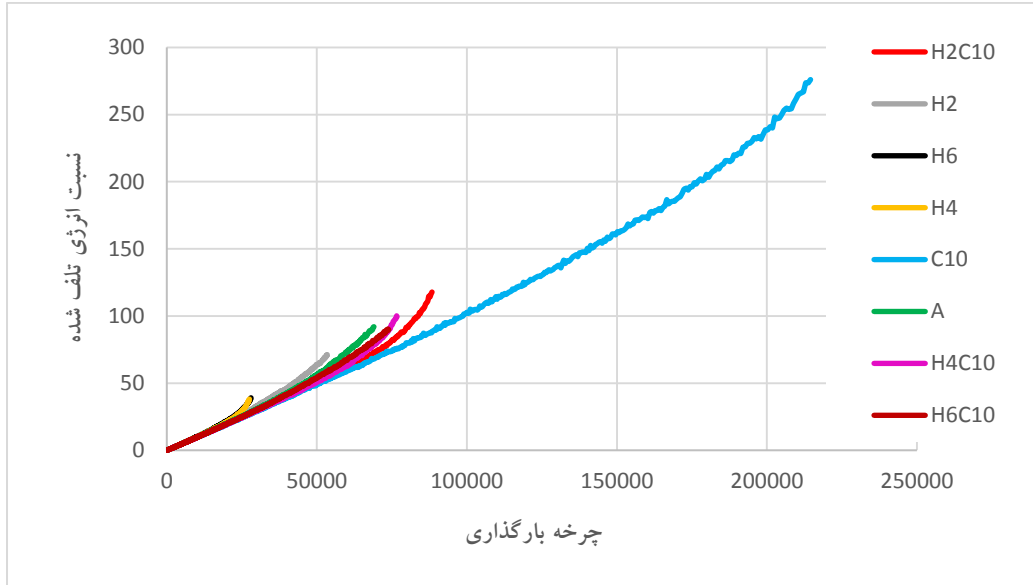
۳-۲-۳. روش انرژی تلف شده

مشخص گردیده که نسبت انرژی تلف شده مخلوط با افزایش چرخه‌های بارگذاری در ابتدای آزمایش تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن به پایان آزمایش، نرخ افزایش نسبت انرژی تلف شده غالب‌تر می‌شود و در نتیجه منحنی چرخه بارگذاری نسبت انرژی تلف شده از خط مستقیم منحرف می‌شود. نقطه انحراف اولیه به عنوان نقطه شکست خستگی برای مخلوط در نظر گرفته می‌شود (هافمن و همکاران، ۱۹۸۹؛ پرونک و هافمن، ۱۹۹۱). نسبت انرژی تلف شده (DER) از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (پرونک و هافمن، ۱۹۹۱):

$$DER = \frac{\sum_{j=1}^i W_j}{W_i} \quad (۴)$$

که در آن، i تکرار بارگذاری، W_i انرژی تلف شده در بارگذاری i و W_j انرژی تلف شده در تکرار بارگذاری j است.

نمودار نسبت انرژی تلف شده- چرخه بارگذاری برای نمونه‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، نمونه‌هایی که مقاومت خستگی کمتری داشته‌اند در تعداد چرخه‌های بارگذاری کمتری از خط مستقیم نسبت انرژی تلف شده منحرف شده‌اند. نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک بیشترین و نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی کمترین عمر خستگی را نشان دادند.



شکل ۱۱. نسبت انرژی تلف شده- چرخه بارگذاری

کاهش عمر خستگی مخلوط گردیده و افزودن پودر لاستیک به دلیل داشتن خاصیت ارتجاعی، مقاومت خستگی را به مقدار قابل توجهی افزایش داده است.

عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی با معیار DER در جدول ۴ نشان داده شده است. روند تغییرات مقاومت خستگی مشابه روش‌های کاهش سختی و سختی نرمال شده می‌باشد. افزودن پلاستیک ضایعاتی به تنهایی باعث

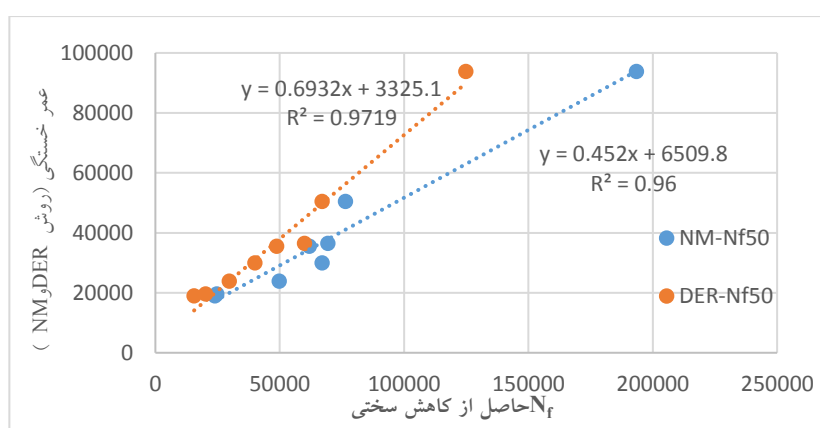
جدول ۴. عمر خستگی مخلوط آسفالتی بر اساس DER

نمونه	عمر خستگی
A	۴۸۸۵۰
H2	۲۹۷۳۰
H4	۲۰۲۰۰
H6	۱۵۵۶۰
C10	۱۲۴۹۲۰
H2C10	۶۷۰۹۰
H4C10	۵۹۹۴۰
H6C10	۴۰۱۱۰

۳-۲-۴. مقایسه نتایج خستگی

پژوهشگران استفاده از روش سختی نرمال شده به جای معیار کاهش سختی تا ۵۰ درصد را برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلیمر پیشنهاد داده‌اند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۶). همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، همبستگی بسیار خوبی بین هر دو روش سختی نرمال شده و روش انرژی تلف شده با روش کاهش سختی وجود دارد.

برای مقایسه سه روش مذکور در تعیین عمر خستگی می‌توان اذعان داشت که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده بر اساس معیار ۵۰ درصد سختی کمترین مقدار عمر خستگی را نسبت به دو روش قبلی داشته است که این برداشت با نتایج حاصل از تحقیقات چنگ و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. برخی



شکل ۱۲. همبستگی بین نتایج خستگی سختی نرمال شده و انرژی تلف شده با روش کاهش سختی

درصد پلاستیک ضایعاتی بیشتر می‌باشد. در بین نمونه‌های حاوی پلاستیک ضایعاتی، قیر حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی دارای کمترین درجه نفوذ با مقدار ۵۳ و بیشترین نقطه نرمی با مقدار ۵۶ می‌باشد. افزودن پودر لاستیک به قیر نیز روند مشابهی را داشته است. استفاده همزمان از پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک منجر به تغییر چشمگیرتر درجه نفوذ و نقطه نرمی نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک کمترین درجه نفوذ و بیشترین نقطه نرمی با مقادیر به ترتیب ۳۸ و ۶۱ را داشت.

۲- با بررسی شاخص نفوذ به عنوان معیاری برای ارزیابی حساسیت دمایی قیرها می‌توان دریافت که افزودن پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک، PI را افزایش می‌دهد

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی حاوی پلاستیک ضایعاتی از نوع HDPE و پودر لاستیک انجام گردید. بدین منظور، نمونه‌های قیر اصلاح شده با درصدهای مختلف پلاستیک ضایعاتی (صفر، ۲، ۴ و ۶) و پودر لاستیک (صفر و ۱۰) ساخته شد. با توجه به آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی روی قیر اصلاح شده، آزمایش خستگی (4PB) و تحلیل نتایج خستگی از سه روش کاهش سختی، سختی نرمال شده- تکرار و روش انرژی روی مخلوط آسفالتی نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد:

۱- افزودن پلاستیک ضایعاتی منجر به کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی قیر می‌گردد. این تغییرات با افزایش

۴- نتایج حاصل از تحلیل خستگی به روش کاهش سختی، سختی نرمال شده- تکرار و روش انرژی تلف شده با یکدیگر همسو بوده و نشان دادند که استفاده همزمان از پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی، عملکرد خستگی بهتری نسبت به زمانی که از پلاستیک ضایعاتی به تنهایی استفاده می‌شود دارد. به طور کلی، روش کاهش سختی عمر خستگی کمتری نسبت به دو روش مذکور نشان داد.

۵- استفاده همزمان از پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک تلاشی مضاعف جهت کاهش آلودگی زیست محیطی و همچنین جبران ضعف‌های عملکردی این دو پلیمر، زمانی که هر کدام جداگانه استفاده می‌شوند، می‌باشد. برای ادامه تحقیقات در آینده، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- بررسی انواع دیگر پلاستیک‌ها به همراه پودر لاستیک
- استفاده از تکنولوژی آسفالت نیم گرم برای کاهش دمای تولید مخلوط حاوی پلاستیک ضایعاتی و پودر لاستیک
- انجام آنالیز شیمیایی به منظور درک بهتر فعل و انفعالات بین قیر و پلیمرهای ضایعاتی

که بیانگر حساسیت دمایی کمتر قیر نسبت به نمونه خالص می‌باشد. در بین نمونه‌های اصلاح شده، بیشترین PI مربوط به نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک می‌باشد که با PI برابر ۰/۵۷۱+ نسبت به نمونه شاهد با PI برابر ۰/۵۶۷- افزایش قابل توجهی داشته است.

۳- با استفاده از آزمایش خمش چهارنقطه‌ای، خستگی مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. افزودن پلاستیک ضایعاتی باعث کاهش عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد گردید. تفاوت چشمگیری بین عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی وجود نداشت. با این حال، نمونه حاوی ۶ درصد پلاستیک ضایعاتی کمترین عمر خستگی را در بین نمونه‌ها داشت. افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک به قیر خالص و قیر حاوی پلاستیک ضایعاتی عمر خستگی مخلوط را در مقایسه با نمونه شاهد به طور قابل توجهی افزایش داد، به طوری که کاهش مقاومت خستگی ناشی از افزودن پلاستیک ضایعاتی را جبران کرد. نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد پلاستیک ضایعاتی و ۱۰ درصد پودر لاستیک عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشتند.

۵. مراجع

- AASHTO T321. 2017. "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*.
- Abdel-Wahed, T., Rashwan, N. K. and Maurice, A. E. 2020. "The physical properties of bitumen modified with ilmenite and bentonite nanoparticles". *HBRC J.*, 16(1): 335-350. doi: 10.1080/16874048.2020.1834904
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Shafiq, P. 2011. "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt". *Mater. Design*, 32(10): 4844-4849. doi: 10.1016/j.matdes.2011.06.016
- Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A. and Habib, M. A. 2017. "Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic". *Road Mater. Pavement Design*, 18(5): 1117-1134. doi: 10.1080/14680629.2016.1207554
- ASTM D7460. 2010. "Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending", *American Society of Testing and Materials*.
- Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N. and Tagbor, T. A. 2017. "Use of waste plastic materials for road construction in Ghana". *Case Stud. Constr. Mater.*, 6: 1-7. doi: 10.1016/J.CSCM.2016.11.001
- Attaelmanan, M., Feng, C. P. and AI, A. 2011. "Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene

- as a modifier". *Constr. Build. Mater.*, 25(5): 2764-2770. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.12.037
- Behnood, A. and Modiri Gharehveran, M. 2019. "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders". *Eur. Polym. J.*, 112: 766-791. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049
- Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J. and del Carmen Rubio-Gámez, M. 2019. "Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review". *Sustain.*, 11(3): 646. doi: 10.3390/su11030646
- Chen, X. and Solaimanian, M. 2019. "Evaluating fracture properties of crumb rubber modified asphalt mixes". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 12(4): 407-415. doi: 10.1007/s42947-019-0048-6
- Cheng, H., Liu, J., Sun, L., Liu, L. and Zhang, Y. 2021. "Fatigue behaviours of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests". *Constr. Build. Mater.*, 273: 121675. doi: 10.1016/j.conbuilmat.2020.121675
- Cheng, H., Sun, L., Wang, Y., Liu, L. and Chen, X. 2022. "Fatigue test setups and analysis methods for asphalt mixture: A state-of-the-art review". *J. Road Eng.*, 2(4): 279-308. doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.002
- Chin, C. and Damen, P. 2019. "Viability of using recycled plastics in asphalt and sprayed sealing applications". *Pavement*, Publication No. AP-T351-19.
- Costa, L. M. B., Silva, H. M. R. D., Peralta, J. and Oliveira, J. R. M. 2019. "Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment". *Constr. Build. Mater.*, 198: 237-244. doi: 10.1016/j.conbuilmat.2018.11.279
- Du, Z., Jiang, C., Yuan, J., Xiao, F. and Wang, J. 2020. "Low temperature performance characteristics of polyethylene modified asphalts – A review". *Constr. Build. Mater.*, 264: 120704. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120704
- Duarte, G. M. and Faxina, A. L. 2021a. "Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review". *Constr. Build. Mater.*, 312. doi: 10.1016/j.conbuilmat.2021.125408
- Duarte, G. M. and Faxina, A. L. 2021b. "High-temperature rheological properties of asphalt binders modified with recycled low-density polyethylene and crumb rubber". *Constr. Build. Mater.*, 298. doi: 10.1016/j.conbuilmat.2021.123852.
- Fakhri, M. and Saberi K., F. 2016. "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement". *J. Clean. Prod.*, 129: 521-530. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.017
- Ge, D., Yan, K., You, Z. and Xu, H. 2016. "Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene". *Constr. Build. Mater.*, 126:66–76. doi: 10.1016/j.conbuilmat. 2016.09.014
- Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. 2017. "Production, use, and fate of all plastics ever made". *Sci. Adv.*, 3(7). doi: 10.1126/SCIADV.1700782/SUPPL
- Gibreil, H. A. A. and Feng, C. P. 2017. "Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 142: 101-108. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.062
- Haider, S., Jamal, I. H. and Ullah, R. 2020. "Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 235:117496. doi: 10.1016/j.conbuilmat.2019.117496
- Hassanpour-Kasanagh, S., Ahmedzade, P., Fainleib, A. M. and Behnood, A. 2020. "Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with styrene-butadiene-styrene (SBS)". *Constr. Build. Mater.*, 230: 117047. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117047
- Hinislioglu, S. and Agar, E. 2004. "Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix". *Mater. Lett.*, 58(3-4): 267-271. doi: 10.1016/S0167-577X(03)00458-0
- Ho, S., Church, R., Klassen, K., Law, B., MacLeod, D. and Zanzotto, L. 2006. "Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers". *Can. J. Civ. Eng.*, 33(8): 968-981. doi: 10.1139/L06-044
- Hopman, P. C., Kunst, P. A. J. C. and Pronk, A. C. 1989. "A renewed interpretation method for fatigue measurements-verification of min rule". *Proceedings of the 4th Eurobitume Symposium, Madrid*, pp. 557-561.
- Huang, M., Wen, X., Huang, W. and Xu, J. 2016. "Fatigue performance of asphalt mixtures with different design goals". *Tongji Daxue Xuebao/J. Tongji University*, 44(4): 572-579. doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.04.011
- Jeong, K. D., Lee, S. J. and Kim, K. W. 2011. "Laboratory evaluation of flexible pavement materials containing waste polyethylene (WPE) film". *Constr. Build. Mater.*, 25(4): 1890-1894. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.068
- Joohari, I. B. and Giustozzi, F. 2020. "Chemical and high-temperature rheological properties of recycled

- plastics-polymer modified hybrid bitumen". *J. Clean. Prod.*, 276: 123064. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123064
- Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A. and Almansoor, F. F. 2016. "Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction". *Proc. Eng.*, 145: 1557-1564.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Zhang, J., Jiang, H. and Yao, Z. 2021. "Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene". *Int. J. Pavement Eng.*, 22(1): 11-20. doi: 10.1080/10298436.2019.1575968
- Ma, Y., Wang, S., Zhou, H., Hu, W., Polaczyk, P. and Huang, B. 2021. "Recycled polyethylene and crumb rubber composites modified asphalt with improved aging resistance and thermal stability". *J. Clean. Prod.*, 334: 130102. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130102
- Mahmoud, M. E., El-Khatib, A. M., Badawi, M. S., Rashad, A. R., El-Sharkawy, R. M. and Thabet, A. A. 2018. "Recycled high-density polyethylene plastics added with lead oxide nanoparticles as sustainable radiation shielding materials". *J. Clean. Prod.*, 176: 276-287. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.100
- Ming, L. Y., Feng, C. P. and Siddig, E. A. 2018. "Effect of phenolic resin on the performance of the styrene-butadiene rubber modified asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 181: 465-473. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.076
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. and Hamedi, G. H. 2014. "Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – A laboratory study". *Road Mater. Pavement Design*, 15(3): 746-756. doi: 10.1080/14680629.2013.876443
- Nasr, D. and Pakshir, A. H. 2017. "Rheology and storage stability of modified binders with waste polymers composites". *Road Mater. Pavement Design*, 20(4): 773-792. doi: 10.1080/14680629.2017.1417152
- Navarro, F. J., Partal, P., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C. 2010. "Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications: Thermo-mechanical properties". *Polym. Test.*, 29(5): 588-595. doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2010.03.010
- Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R. and Giustozzi, F. 2020. "Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen". *J. Clean. Prod.*, 266: 121988. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121988
- OECD. 2022. "Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short". Retrieved July 24, 2022. <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>.
- Pronk, A. C. and Hopman, P. C. 1991. "Energy dissipation: The leading factor of fatigue". In: *Highway Research: Sharing the Benefits* (pp. 255-267), Thomas Telford Publishing.
- Punith, V. S., Veeraragavan, A. and Amirkhani, S. N. 2011. "Evaluation of reclaimed polyethylene modified asphalt concrete mixtures". *Int. J. Pavement Res. Tech.* 4(1): 1-10.
- Rowe, G. M. and Bouldin, M. G. 2000. "Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures". 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, Vol. 2000.
- Shafabakhsh, Gh., Jafari Ani, O. and Talebsafa, M. 2015. "Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 85: 136-143. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.03.060
- Tauste-Martínez, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M. and Rubio-Gámez, M. C. 2021. "Multiscale evaluation of the effect of recycled polymers on the long-term performance of bituminous materials". *Road Mater. Pavement Design*, 22(S1): S99–S116. doi: 10.1080/14680629.2021.1906737.
- Vargas, C. and El Hanandeh, A. 2021. "Systematic Literature Review, Meta-Analysis and Artificial Neural Network Modelling of Plastic Waste Addition to Bitumen". *J. Clean. Prod.*, 280: 124369. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124369
- Wang, J., Emmerich, L., Wu, J., Vana, P. and Zhang, K. 2021. "Hydroplastic polymers as eco-friendly hydrosetting plastics". *Nat. Sustain.*, 4(10): 877-883. doi: 10.1038/s41893021-00743-1
- Wu, S. and Montalvo, L. 2021. "Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review". *J. Clean. Prod.*, 280: 124355. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124355
- Yan, K., Hong, Z., You, L., Ou, J. and Miljković, M. 2021. "Influence of ethylene-vinyl acetate on the performance improvements of low-density polyethylene-modified bitumen". *J. Clean. Prod.*, 278: 123865. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123865
- Yan, K., Xu, H. and You, L. 2015. "Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene". *Constr. Build. Mater.*, 83: 143-149. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.092
- Yao, Z., Zhang, J., Gao, F., Liu, S. and Yu, T. 2018. "Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 170: 217-224.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.080

Zhang, F. and Hu, C. 2015. "The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt". J. Therm. Anal. Calorim., 124(2): 729-741. doi: 10.1007/S10973-015-5198-4

Zhang, J., Yao, Z., Yu, T., Liu, S. and Jiang, H. 2019. "Experimental evaluation of crumb rubber and polyethylene integrated modified asphalt mixture upon related properties". Road Mater. Pavement Design, 20(6): 1413-1428. doi: 10.1080/14680629.2018.1447505

Zhang, X., Han, C., Otto, F. and Zhang, F. 2021. "Evaluation of properties and mechanisms of waste plastic/rubber-modified asphalt". Coatings, 11(11): 1365. doi: 10.3390/COATINGS11111365