



Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Modified with Rubber Powder and a Crosslinking Agent at Medium and Low Temperatures

Hamid Jahanbakhsh^{1*}, Sadegh Ghavami², Alireza Farrokhi³

¹Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

²School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

³Department of Civil and Environmental Engineering, Alaodoleh Semnani Institute of Higher Education, Garmsar, Iran

ha.jahanbakhsh@asihe.ac.ir

Abstract

In recent years, the use of rubber powder in modifying bitumen and asphalt mixtures has yielded economic benefits, reduced environmental pollution, and enhanced the performance of flexible pavements. At the same time, the most significant disadvantage of modifying bitumen with rubber powder is the low storage stability of rubber powder-modified bitumen. This study investigates the laboratory results of modifying bitumen and asphalt mixtures with rubber powder at different percentages and in the presence of a crosslinking agent. High-temperature storage stability, indirect tensile tests, and semicircular bending tests were conducted at medium and low temperatures. The results show that the bitumen modified with rubber powder has low stability, and this phenomenon is further intensified by an increase in the percentage of rubber powder. It was also shown that by adding a small percentage of sulfur to the bitumen modified with rubber powder, the storage stability of the prepared bitumen could be significantly improved. According to the tests conducted, the modification of bitumen with rubber powder leads to an increase in indirect tensile strength and the critical strain energy release rate at intermediate temperatures. It also improves the cracking properties of the asphalt mixture at low temperatures, thereby increasing fracture energy. The improvement of asphalt mixture properties increased with the rising percentage of rubber powder; however, it resulted in a weakening of the storage stability of the modified bitumen. The addition of a crosslinking agent resulted in higher cracking resistance in asphalt mixtures containing bitumen modified with rubber powder, based on the results of fracture mechanics tests.

Keywords: Asphalt Mixture, Cracking, Rubber Powder, Crosslinking Agent.



ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک به همراه عامل ارتباط متقابل در دمای میانی و پایین

حمید جهان بخش^۱، صادق قوامی جمال^۲، علیرضا فرخی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- عضو هیئت علمی مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی

ha.jahanbakhsh@asihe.ac.ir

خلاصه

در سال‌های اخیر، استفاده از پودر لاستیک در اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی علاوه بر جنبه اقتصادی و کاهش آلودگی محیط زیست، بهبود عملکرد روسازی‌های انعطاف‌پذیر را نیز به همراه داشته است. در عین حال مهم‌ترین نقطه ضعف اصلاح قیر با پودر لاستیک ثبات ذخیره‌سازی کم قیر اصلاح شده با پودر لاستیک است. این پژوهش نتایج آزمایشگاهی اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی توسط پودر لاستیک با درصد‌های مختلف و نیز در حضور عامل ارتباط متقابل را مورد بررسی قرار داده است. آزمایش‌های ثبات ذخیره‌سازی دمای بالا، کشش غیر مستقیم و خمش نمونه نیم دایره‌ای در دو دمای میانی و پایین انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک از پایداری اندکی برخوردار است و این اتفاق با افزایش درصد پودر لاستیک نیز تشدید می‌گردد. همچنین نشان داده شد که با افزودن درصد اندکی سولفور به قیر اصلاح شده با پودر لاستیک می‌توان ثبات ذخیره‌سازی قیر تهیه شده را به میزان قابل توجهی بهبود داد. اصلاح قیر با پودر لاستیک مطابق آزمون‌های انجام شده، منجر به افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم و نرخ انرژی کرنشی بحرانی آزاد شده در دمای میانی و نیز بهبود خصوصیات ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین با افزایش انرژی شکست می‌گردد. بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی با افزایش درصد پودر لاستیک نیز افزایش یافته است در حالی که این امر منجر به تضعیف ثبات ذخیره‌سازی قیر اصلاح شده گردیده است. افزودن عامل ارتباط متقابل منجر به مقاومت بالاتر ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک بر اساس نتایج آزمون‌های بر پایه مکانیک شکست گردید.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی، ترک‌خوردگی، پودر لاستیک، عامل ارتباط متقابل

۱. مقدمه

مزیت قابل توجه استفاده از مخلوط آسفالتی به عنوان یک ساختار مهندسی برای روسازی‌های آسفالتی، قابلیت انعطاف‌پذیری آن است. قدرت باربری و انعطاف‌پذیری بالای مخلوط آسفالتی، آن را به ماده‌ای پرکاربرد برای ساخت روسازی‌هایی با دوام، صاف و ایمن تبدیل کرده است. مخلوط آسفالتی نیز مانند تمام روسازی‌های دیگر در طول عمر خود تحت بارگذاری ترافیکی و شرایط محیطی قرار دارد. این بارگذاری باعث خرابی‌هایی نظیر ترک‌خوردگی و تغییر شکل می‌گردد. ترک‌خوردگی اما یکی از خرابی‌های عمده روسازی‌های آسفالتی است. این ترک‌ها می‌توانند بر قابلیت باربری مخلوط آسفالتی تاثیر بگذارند و منجر به ایجاد خرابی‌های شدیدتر همچون چاله‌ها شوند. انتظار عمومی برای ساخت روسازی‌هایی با دوام بالا، بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی را به عنوان یک نیاز اساسی در این صنعت مطرح نموده است. اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی یک روش پرکاربرد برای تضمین عملکرد مناسب روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد. بیشتر اصلاح‌کننده‌ها عملکرد دمای بالا در مخلوط آسفالتی را بهبود می‌دهند. از آنجایی که مخلوط

^۱ سرپرست آزمایشگاه قیر و آسفالت و مدرس مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی

^۲ سرپرست آزمایشگاه مکانیک خاک و مدرس مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی

^۳ عضو هیئت علمی مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی



آسفالتی به عنوان ماده‌ای ویسکوالاستیک و ترموپلاستیک در معرض ترک خوردگی قرار دارد، ارزیابی مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده می‌بایست مورد توجه بیشتر قرار گیرد [1].

طبق بیان رییس مرکز تحقیقات صنایع لاستیک ایران، پیش‌بینی می‌شود در افق ۱۴۰۴ سالانه یک میلیون و ۴۰۰ هزار تن لاستیک فرسوده در کشور به وجود آید. لاستیک عمدتاً از مواد شیمیایی و پلیمری تهیه شده و به حالت طبیعی تجزیه نمی‌گردد. از این رو موجب تخریب محیط زیست خواهد شد. یکی از کاربردهای لاستیک پس از پودر شدن، در صنعت راهسازی است. پودر لاستیک به عنوان یکی از پرکاربردترین اصلاح‌کننده‌های قیر و آسفالت، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی (کاهش آلودگی صوتی و زیست محیطی) می‌تواند خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی را بهبود داده و هزینه‌های مدیریت و نگهداری راه را کاهش دهد [2, 3]. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک عملکرد بهتری از قیر خالص نشان داده است [4, 5]. در عین حال مهم‌ترین نقطه ضعف اصلاح قیر با پودر لاستیک ثبات ذخیره‌سازی کم قیر و مخلوط آسفالتی حاصل از قیر اصلاح شده با پودر لاستیک است [6].

پودر لاستیک ماده‌ای است که بخش اعظم آن را پلیمرها تشکیل داده‌اند. به دلیل ناهمگونی در وزن مولکولی، چگالی، ویسکوزیته بین قیر و پلیمر، بیش‌تر قیرهای اصلاح شده با این ماده به دست آمده از اختلاط مکانیکی دارای دو فاز مجزا تحت قانون استوکس می‌باشند. نتیجه این طبیعت چند فازی، حالت ناپایداری ترمودینامیکی قیر اصلاح شده و تمایل به جدایی پلیمر از قیر در حین ذخیره‌سازی در دمای بالا در مخلوط است [7]. برخی اصلاح‌کننده‌ها مانند اسیدهای غیر آلی خصوصاً فسفریک اسید و پلی‌فسفریک اسید، دوده و مالئیک آنهیدرید (بی‌آب) جهت بهبود سازگاری پلیمر و قیر به کار رفته است؛ اما روش رایج و مشترک جهت برطرف کردن مشکلات اصلاح قیر با پلیمر، نانو ترکیبات پلیمری و روش ولکانیزاسیون است که عمدتاً با افزودن درصد اندک سولفور به قیر اصلاح شده انجام می‌گیرد [7-9].

در این پژوهش تأثیر عامل ارتباط متقابل بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های ثبات ذخیره‌سازی دمای بالا بر قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و تست‌های مقاومت کششی غیر مستقیم، خمش نمونه نیم دایره‌ای در دمای میانی و پایین بر نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

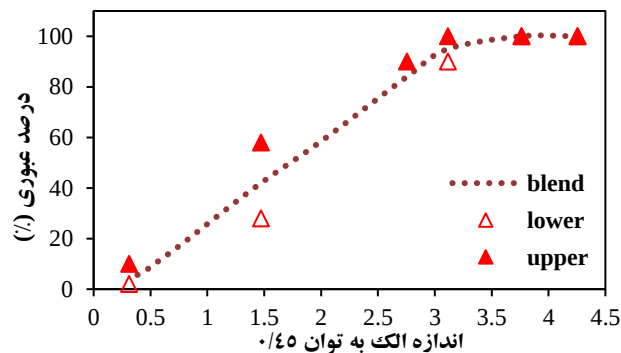
قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص با رده‌بندی درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ تولیدی پالایشگاه اصفهان است که خصوصیات آن در جدول ۱ ارائه گردیده است. پودر لاستیک تولیدی مجتمع لاستیک یزد جهت ساخت قیرهای لاستیکی در اندازه ۰/۴ میلی‌متر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. طبق استاندارد ASTM D 6114 مقدار آهن موجود در پودر لاستیک‌ها بررسی شد که مقدار جذب شده ناچیز بوده و شرایط استفاده را فراهم می‌نمود. بر اساس استاندارد ASTM D 5644 پودر لاستیک مورد استفاده کاملاً از الک شماره ۸ عبور نمود. همچنین میزان رطوبت پودر لاستیک استفاده شده کمتر از حد مجاز اعلام شده در استاندارد ASTM D 1864 بود. در انتها در این پژوهش به عنوان عامل ارتباط متقابل، از پودر سولفور استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات قیر مورد استفاده

۵۰	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
۲۸۵	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)
۳۲۰	نقطه احتراق (درجه سلسیوس)
۱۰۰	انگمی در دمای ۱۵ درجه سلسیوس (سانتی متر)

در این پژوهش ۱۸ درصد پودر لاستیک به عنوان درصد بالا (CRM18) و ۱۰ درصد به عنوان درصد پایین (CRM10) انتخاب گردید. همچنین مقدار ۰/۱ درصد سولفور به عنوان عامل ارتباط متقابل به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک افزوده شد (CRM10-x). به منظور آماده‌سازی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک از دستگاه مخلوط کننده با برش بالا استفاده گردید. با توجه به این نکته که بیش‌ترین نرخ گیرایی پلیمرها و پودر لاستیک با قیر و سولفور در دماهای بین ۱۷۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد، در این پژوهش پس از گرم نمودن قیر تا دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، پودر لاستیک و سولفور به تدریج به قیر اضافه شده و ترکیب حاصل در همان دما برای مدت ۱ ساعت با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاط گردید.

مصلح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیلیسی بود. این مصلح دارای وزن مخصوص ۲/۶۵ بودند. به منظور آماده سازی مخلوط های آسفالتی، دانه بندی متراکم دارای اندازه حداکثر اسمی (NMA=12.5 mm) مطابق استاندارد ASTM D 3515 که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده گردید. درصد قیر بهینه به روش طرح اختلاط مارشال تعیین گردید که برای رسیدن به ۴ درصد هوا مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی ۴/۹ درصد به دست آمد. نمونه های مخلوط آسفالتی مطابق نتایج ویسکومتر چرخشی برای قیر در دمای ۱۵۱ درجه سلسیوس مخلوط و در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس متراکم گردیدند.



شکل ۱- منحنی دانه بندی با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر

۳. انجام آزمایش ها

۳.۱. آزمایش ثبات ذخیره سازی در دمای بالا

جهت تعیین میزان سازگاری قیر و ماده افزودنی، از این تست استفاده می گردد. به منظور انجام آزمایش، یک استوانه آلومینیومی به قطر ۲۵ و ارتفاع ۱۴۰ میلی متر آماده شد و قیر اصلاح شده درون آن ریخته شد. سپس نمونه آماده شده در دمای ۱۶۳ درجه به مدت ۴۸ ساعت درون اون^۱ قرار گرفت. پس از اعمال شرایط ذخیره سازی، نمونه ها از اون خارج گردیده و برای ۴ ساعت در دمای ۱۰- درجه سلسیوس قرار گرفت. تمام مراحل آماده سازی نمونه ها مطابق استاندارد ASTM D 7173-05 صورت گرفت. سپس این استوانه به سه قسمت مساوی تقسیم گردیده و روی قیر بخش بالایی و پایینی آزمون نقطه نرمی انجام می گیرد. مطابق مطالعات صورت گرفته، نمونه ای که اختلاف نقطه نرمی بخش بالا و پایین آن کمتر از ۲/۵ درجه سلسیوس باشد دارای ثبات ذخیره سازی مناسب در دمای بالاست [7, 9].

۳.۲. آزمایش کشش غیر مستقیم

مطالعه انجام شده بر آزمون کشش غیر مستقیم نشان داد که این تست روشی مناسب برای ارزیابی و شبیه سازی تنش های کششی و فشاری که به صورت ترکیبی و همزمان در محل اجرا بر مخلوط آسفالتی وارد می شوند، می باشد [10]. این تست بر نمونه های مخلوط آسفالتی استوانه ای به قطر ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ میلی متر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. نمونه ها مطابق استاندارد AASHTO T-322 به صورت شعاعی با نرخ ۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه بارگذاری شدند. نمونه ها قبل از انجام آزمون به مدت ۲ ساعت در دمای تست قرار گرفتند. برای هر نمونه به منظور در نظر گرفتن تکرار ۳ تست انجام گردید.

۳.۳. آزمایش خمش نمونه نیم دایره ای در دمای میانی

خرابی ترک خوردگی خستگی در دمای میانی یکی از اصلی ترین خرابی ها در روسازی های انعطاف پذیر است. تاکنون به منظور ارزیابی این خرابی، روش های متعددی توسط محققان مختلف توسعه داده شده است. در میان روش های ارزیابی متعدد، تست خمش نمونه نیم دایره ای به دلیل ارتباط

¹ Oven



مناسب نتایج آن با ترک خوردگی در محل اجراء مورد توجه قرار گرفت [11, 12]. به علاوه، این تست بسیار ساده بوده و ساخت نمونه برای آن از نمونه‌های مخلوط آسفالتی آماده شده با روش مارشال یا سوپرپیو و نیز خارج شده از محل اجراء به راحتی صورت می‌پذیرد. همچنین این تست تکرارپذیری مناسبی دارد [11, 13]. به همین منظور این آزمون در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. ساخت نمونه، قرار دادن نمونه در شرایط آزمون و نحوه انجام آن همگی مطابق استاندارد ASTM D8044-16 صورت پذیرفت.

۴.۳. آزمایش خمشی نمونه نیم دایره‌ای در دمای پایین

در پژوهشی صورت گرفته توسط نویسنده، در مورد نقص‌های روش رده‌بندی موجود در دمای پایین بحث و تبادل نظر گردیده است [14]. همچنین آن‌ها در پژوهش دیگر خود نشان دادند که آزمون خمشی نمونه نیم دایره‌ای بر پایه مکانیک شکست الاستیک خطی قادر است به خوبی اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف بر مقاومت ترک‌خوردگی دمای پایین مخلوط آسفالتی را از هم تمیز دهد [1]. در آن مطالعه همچنین نشان داده شد که مخلوط‌های آسفالتی که بار شکست متناظر یکدیگر داشتند، انرژی شکست مختلف از خود نشان داده و نیز عملکرد متفاوتی نیز در محل اجراء داشتند. مطابق موارد ذکر شده، در پژوهش حاضر، روش ساخت نمونه‌ها، قرارگیری در شرایط آزمایش و انجام تست مطابق پژوهش Jahanbakhsh et al. [1] صورت پذیرفت. برای هر مخلوط به منظور در نظر گرفتن تکرار، ۳ نمونه ساخته شده و در دمای ۲۰- درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها به منظور قرارگیری در شرایط قبل از انجام آزمایش ۲ ساعت در دمای آزمون قرار گرفتند. جهت ارزیابی عملکرد نمونه‌ها نیز انرژی شکست آن‌ها مورد محاسبه قرار گرفت. پژوهشگران علاقه‌مند به منظور دستیابی به اطلاعات تکمیلی تر می‌توانند به پژوهش ذکر شده مراجعه کنند [1].

۴. نتایج و بحث

۴.۱. آزمایش ثبات ذخیره سازی در دمای بالا

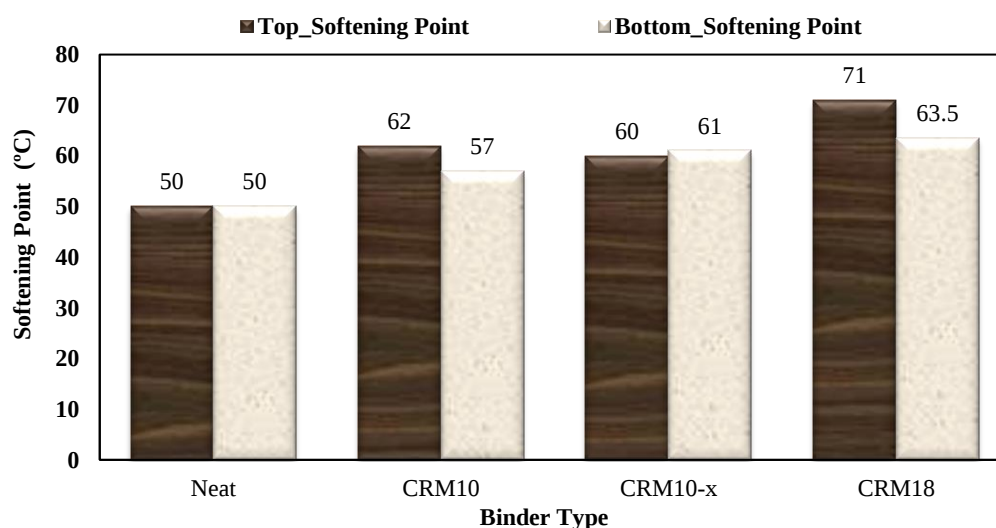
پودر لاستیک به منظور اختلاط با قیر نیاز به اختلاط برشی با نرخ بالا دارد. ناهمگونی‌های ذکر شده در بخش ۱ مقاله عامل جدایی پودر لاستیک و قیر در حین ذخیره‌سازی خواهد بود. برای جلوگیری از رویداد چنین اتفاقی یا می‌بایست قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک را به صورت دائم تا قبل از زمان استفاده، مخلوط نمود و یا از ماده‌ای به عنوان عامل ارتباط متقابل استفاده نمود که منجر به رویداد ولکانیزاسیون شده و از حرکت ذرات پودر لاستیک به سمت بالای محفظه ذخیره‌سازی جلوگیری کرد. در نتیجه آماده کردن قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک با ثبات ذخیره‌سازی بالا یکی از موارد مهم در استفاده از این قیرها خواهد بود. به این منظور در پژوهش حاضر آزمون ثبات ذخیره‌سازی در دمای بالا بر روی نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک به همراه سولفور انجام شد که نتایج آن در شکل ۲ ارائه گردیده است.

همانطور که از نتایج شکل ۲ مشخص است، با افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک به قیر اختلاف نقطه نرمی بخش‌های بالا و پایین بیش از ۲/۵ درجه سلسیوس است که به عنوان مقدار مورد نظر برای قیرهای اصلاح‌شده پایدار بیان گردیده است. در نتیجه افزودن پودر لاستیک به قیر، ثبات ذخیره‌سازی آن را تضعیف نموده است. زمانی که پودر لاستیک با قیر مخلوط می‌گردد، بخش‌های پودر لاستیک موجود در قیر نمی‌تواند در قیر حل گردد و تنها جذب بخش مالتین قیر می‌شود. هنگام ذخیره‌سازی در حالت سکون در دمای بالا، بخش‌های لاستیکی پخش شده در قیر معمولاً تمایل به یکی شدن داشته که موجب کاهش انرژی آزاد در ارتباط با کل مساحت سطحی مخلوط آسفالتی گردیده و به طور همزمان این بخش‌های معلق در قیر تمایل به حرکت به سمت سطح قیر اصلاح‌شده را دارند. به همین دلیل است که نقطه نرمی بخش بالایی به دلیل تجمع ذرات پودر لاستیک از بخش پایینی مقدار بزرگتری دارد.

در هنگام اختلاط، پودر لاستیک در قسمت‌های کوچک به صورت یکنواخت در قیر پراکنده شده و بخش‌هایی از قیر چون مواد اشباع و آروماتیک‌ها به وسیله قسمت‌هایی از پودر لاستیک جذب شده و مرز بین قیر و پودر لاستیک شکل می‌گیرد. با افزایش درصد پودر لاستیک و کاهش بخش آروماتیک و مواد اشباع قیر، لایه مرزی نازک‌تر شده و قدرت پیوند قیر و پودر لاستیک کاهش پیدا خواهد کرد و در نتیجه در درصد بالای پودر لاستیک (۱۸ درصد) قیر و پودر لاستیک راحت‌تر از هم جدا خواهند شد. همین نتیجه را می‌توان در شکل ۲ ملاحظه نمود، جایی که نمونه قیری اصلاح‌شده با ۱۸ درصد پودر لاستیک اختلاف دمای نقطه نرمی بخش بالا و پایین برابر ۷/۵ درجه سلسیوس داشت که از قیر اصلاح‌شده با ۱۰ درصد پودر لاستیک بیشتر بود.

زمانی که ۰/۱ درصد وزنی قیر، سولفور به قیر اصلاح شده با پودر لاستیک اضافه می گردد، اختلاف نقطه نرمی برابر ۱ درجه سلسیوس است. این امر بدین معنا است که سازگاری قیر اصلاح شده با پودر لاستیک به میزان قابل توجهی با افزودن سولفور بهبود می یابد. این اتفاق می تواند به دلیل ارتباط شیمیایی مولکول های پودر لاستیک با یکدیگر از طریق پیوند پلی سولفید باشد که منجر به شکل گیری یک شبکه پیوسته لاستیکی می گردد. طبق این واکنش ها، زنجیره مولکول های لاستیکی، گسترش یافته و یک شبکه رشته ای درون قیر ایجاد خواهد شد. در نتیجه ثبات ذخیره سازی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک به میزان قابل توجهی بهبود می یابد.

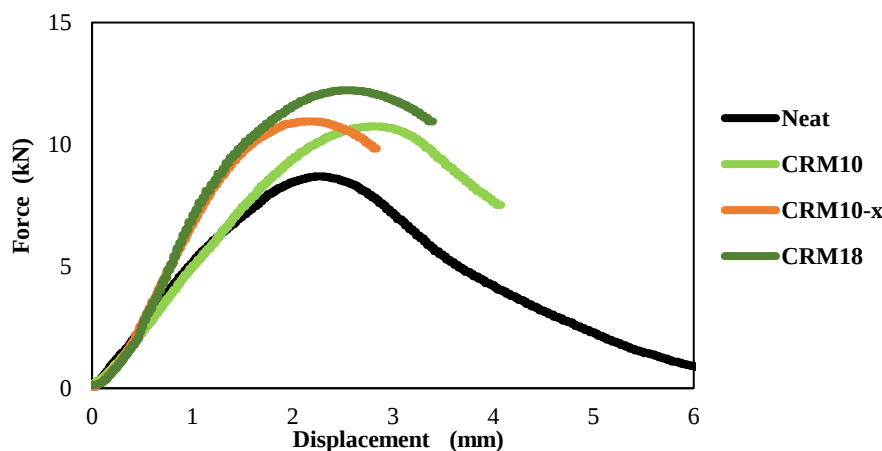
مقایسه نتایج نقطه نرمی قیر های اصلاح شده در شکل ۲ نسبت به قیر خالص نشان می دهد که تمام قیر ها نقطه نرمی بیشتری از قیر خالص داشته اند که نشان از بهبود خصوصیات دمای بالای قیر اصلاح شده با این اصلاح کننده ها دارد.



شکل ۲- نتایج آزمون نقطه نرمی در تعیین ثبات ذخیره سازی دمای بالا

۲.۴. آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمون کشش غیر مستقیم مطابق استاندارد AASHTO T-322 بر نمونه های مخلوط آسفالتی انجام شد. نمودار تنش- کرنش به دست آمده در این تست برای مخلوط های آسفالتی خالص و اصلاح شده با پودر لاستیک در شکل ۳ نشان داده شده است. این نمودار از متوسط گیری برای سه تکرار در هر نوع مخلوط آسفالتی به دست آمده است. مقاومت کششی غیر مستقیم با توجه به تنش های عمودی و افقی که در حالت فشاری و کششی بر نمونه اعمال می شود، به دست می آید؛ بنابراین، این پارامتر که حداکثر بار خرابی است، به عنوان پارامتری مناسب برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که مخلوط آسفالتی حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک بدون عامل ارتباط متقابل ۲۳ درصد و به همراه آن ۲۵ درصد مقاومت کششی مخلوط آسفالتی را بهبود داده اند. همچنین نمونه حاوی ۱۸ درصد پودر لاستیک، مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط را ۴۰ درصد افزایش داده است. در این تست اثر سولفور به عنوان عامل ارتباط متقابل بر خصوصیت مقاومت کششی مخلوط آسفالتی ناچیز بوده است.

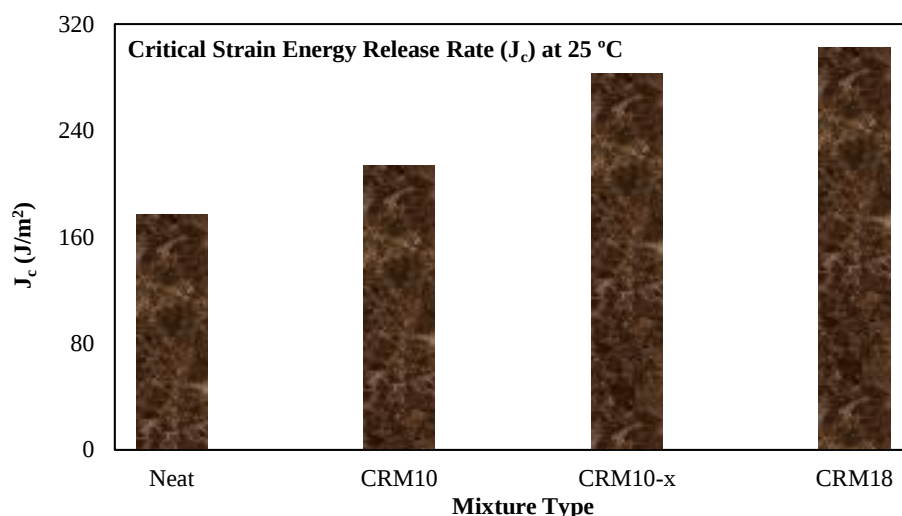


شکل ۳- نمودار تنش- کرنش در آزمون کشش غیر مستقیم مخلوط آسفالتی

۳.۴. آزمایش خمش نمونه نیم دایره‌ای در دمای میانی

به منظور ارزیابی مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس آزمون خمش نمونه نیم دایره‌ای بر روی مخلوط‌های آسفالتی خالص و اصلاح شده با پودر لاستیک انجام شد. [15] Huang et al. در مطالعه خود نشان داد که تغییر شکل‌های ماندگار در محل‌های بارگذاری در آزمون کشش غیر مستقیم بیش از حد بوده و همچنین تحت بارگذاری در این تست تنش اعمالی بر نمونه با تنش اعمال شده بر مخلوط آسفالتی در محل اجراء تفاوت زیادی دارد. علاوه بر این، پژوهشی دیگر نشان داد که خصوصیتی همچون بار و یا تغییر شکل در هنگام خرابی نمی‌تواند پارامترهایی مناسب برای ارزیابی گسترش ترک در مخلوط آسفالتی باشند [13]. لذا برای ارزیابی توانایی مقابله با گسترش ترک در مخلوط آسفالتی نیاز به تعریف پارامتری دیگر بود. در همین باب، نرخ انرژی کرنشی بحرانی آزاد شده (J_c) در تست خمش نمونه نیم دایره‌ای مطرح گردید. این پارامتر به خوبی خصوصیات ترک خوردگی مخلوط آسفالتی متناظر با عملکرد آن‌ها در محل اجراء را نشان داد [11]. همچنین پژوهش‌هایی در این زمینه نشان داد که هیچ ارتباطی میان نتایج تست خمش نمونه نیم دایره‌ای و کشش غیر مستقیم وجود ندارد که نشان از ارزیابی خصوصیتی متفاوت توسط پارامترهای به دست آمده در این دو تست است [16].

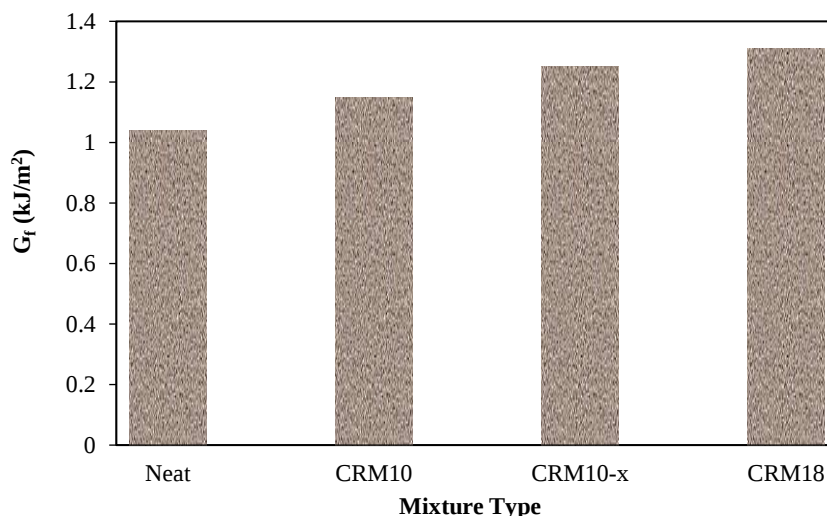
در این پژوهش مطابق استاندارد ASTM D8044-16، نرخ انرژی کرنشی بحرانی آزاد شده (J_c) برای هر یک از نمونه‌های مخلوط آسفالتی محاسبه گردید. برای هر نمونه سه تکرار انجام گرفت و متوسط مقدار J_c برای هر کدام از نمونه‌های مخلوط آسفالتی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل می‌توان دریافت که افزودن پودر لاستیک به قیر کاملاً توانایی مخلوط آسفالتی در مقابله با گسترش ترک خوردگی در دمای میانی را بهبود داده است. این بهبود خصوصیت با افزایش درصد پودر لاستیک نیز افزایش یافته است؛ اما نکته حائز اهمیت نقش انکارناپذیر عامل ارتباط متقابل در بهبود خصوصیت مقاومت در برابر گسترش ترک در مخلوط آسفالتی حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک است. افزودن عامل ارتباط متقابل منجر به توزیع یکنواخت تر پودر لاستیک در قیر و مخلوط آسفالتی و همچنین با تشکیل شبکه زنجیری لاستیکی به واسطه پیوندهای پلی سولفید منجر به بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی حاصل در برابر گسترش ترک خستگی شده است. این خصوصیت به خوبی توسط آزمون خمش نمونه نیم دایره‌ای نشان داده شد؛ با اینکه آزمون کشش غیر مستقیم نتوانست این اختلاف عملکرد را به خوبی نمایان سازد.



شکل ۴- نرخ انرژی کرنشی بحرانی آزاد شده در دمای میانی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

۴.۴. آزمایش خمش نمونه نیم دایره‌ای در دمای پایین

در پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۰- درجه سلسیوس توسط آزمون خمش نمونه نیم دایره‌ای صورت گرفت. انرژی شکست (G_f) به عنوان یک خصوصیات ماده که مستقل از اندازه نمونه و هندسه آن است، در این تحقیق به عنوان پارامتر ارزیابی در نظر گرفته شد. این پارامتر نمایانگر مناسبی از مقاومت مخلوط آسفالتی در دمای پایین است و همان‌طور که در پژوهش صورت گرفته نشان داده شد قابلیت تفکیک اثر همه اصلاح‌کننده‌ها را نیز به خوبی دارد [1]. شکل ۵ انرژی شکست را که برای ۳ تکرار در هر نمونه محاسبه گردیده و متوسط گرفته شده است، نشان می‌دهد. مطابق نتایج این شکل می‌توان به وضوح درک کرد که افزودن پودر لاستیک اثر مثبت بر مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین دارد. جایی که با افزودن ۱۰ و ۱۸ درصد پودر لاستیک انرژی شکست مخلوط به ترتیب ۱۱ و ۲۵ درصد افزایش داده است. در نتیجه افزودن پودر لاستیک منجر به بهبود تحمل تنش توسط مخلوط آسفالتی و در نتیجه کاهش تنش القاء شده در مخلوط به واسطه دمای پایین می‌گردد که عملکرد بهتر در برابر ترک خوردگی را حاصل می‌کند. این نتایج کاملاً با نتایج عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای پایین در محل اجراء هم‌خوانی دارد [17, 18]. بحث قابل توجه دیگر مربوط به تأثیر عامل ارتباط متقابل قیر و پودر لاستیک است که در شکل ۵ نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک پس از افزودن عامل ارتباط متقابل به آن و پیوند شیمیایی متقابل بین مولکول‌های پودر لاستیک و قیر از طریق پیوندهای سولفید و یا پلی‌سولفید بهبود چشم‌گیری در عملکرد دمای پایین قیر اصلاح‌شده، در آزمون خمش نمونه نیم دایره‌ای را موجب می‌گردد. طوری که نتایج نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک همراه ۰/۱ درصد سولفور با نتایج نمونه حاوی ۱۸ درصد پودر لاستیک تقریباً مشابه به دست آمده و نشان می‌دهد که با استفاده از عامل ارتباط متقابل قیر و پودر لاستیک می‌توان در درصد استفاده از این اصلاح‌کننده صرفه‌جویی کرد.



شکل ۵- انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی مختلف در دمای ۲۰- درجه سلسیوس

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر پودر لاستیک بر ثبات ذخیره‌سازی قیر اصلاح‌شده و عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر مشاهده شد:

۱- زنجیره مولکول‌های لاستیکی گسترش یافته در قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک به همراه عامل ارتباط متقابل به دلیل پیوندهای پلی‌سولفید درون قیر منجر به بهبود قابل توجه ثبات ذخیره‌سازی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک گردید.

۲- مقایسه نتایج نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده نشان داد که تمام قیرها نقطه نرمی بیشتری از قیر خالص داشته‌اند که نشان از بهبود خصوصیات دمای بالای قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک دارد.

۳- مخلوط آسفالتی حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک با و بدون عامل ارتباط متقابل به ترتیب ۲۵ و ۲۳ درصد مقاومت کششی غیر مستقیم بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی خالص داشت. همچنین نمونه حاوی ۱۸ درصد پودر لاستیک مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط را ۴۰ درصد افزایش داده است.

۴- افزودن پودر لاستیک به قیر کاملاً توانایی مخلوط آسفالتی در مقابله با گسترش ترک خوردگی در دمای میانی را بهبود داده است. این بهبود خصوصیت با افزایش درصد پودر لاستیک نیز افزایش یافته است.

۵- افزودن ۱۰ و ۱۸ درصد پودر لاستیک انرژی شکست مخلوط را به ترتیب ۱۱ و ۲۵ درصد افزایش داده است. در نتیجه افزودن پودر لاستیک منجر به بهبود تحمل تنش توسط مخلوط آسفالتی و در نتیجه کاهش تنش القا شده در مخلوط به واسطه دمای پایین می‌گردد که عملکرد بهتر در برابر ترک خوردگی را حاصل می‌کند.

۶- آزمون‌های بر پایه مکانیک شکست به خوبی نقش انکارناپذیر عامل ارتباط متقابل در بهبود خصوصیت مقاومت در برابر گسترش ترک خوردگی در مخلوط آسفالتی را نشان دادند. براساس نتایج این آزمون‌ها هم در دمای میانی هم در دمای پایین، نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک همراه ۰/۱ درصد سولفور نتایج تقریباً مشابه با نمونه حاوی ۱۸ درصد پودر لاستیک داشت. این امر نشان می‌دهد که با استفاده از عامل ارتباط متقابل قیر و پودر لاستیک می‌توان در درصد استفاده از این اصلاح‌کننده صرفه‌جویی کرد.

۶. مراجع

1. Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M. and Tabatabaee, N. (2016), "Experimental and numerical investigation of low-temperature performance of modified asphalt binders and mixtures", Road Materials and Pavement Design, 1-22.



2. Kim, H., Lee, S. and Amirkhanian, N. (2010), "Rheology Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders", *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp.839–843.
3. Wang, H., Dang, Z., Li, L. and You, Z. (2013), "Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, 47, 1342–1349.
4. Mashaan, N., Asim, H., Karim, M. and Abdelaziz, A. (2012), "An Overview of Crumb Rubber Modified Asphalt", *International Journal of the Physical Sciences*, Vol 7, pp.166–170.
5. Wang, H., You, Zh., Mills-Beale, J. and Hao, P. (2012), "Laboratory Evaluation on High Temperature Viscosity and Low Temperature Stiffness of Asphalt Binder with High Percent Scrap Tire Rubber", *Construction and Building Materials*, 26, pp.583–590.
6. Liu, Sh., Cao, W., Fang, J. and Shang, Sh., (2009), "Variance Analysis and Performance Evaluation of Different Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt", *Construction and Building Materials*, 23, pp.2701–2708.
7. Sun, D., Ye, F., Shi, F. and Lu, W. (2007), "Storage Stability of SBS-Modified Road Asphalt: Preparation, Morphology, and Rheological Properties", *Petroleum Science and Technology*, 24, pp.1067–1077.
8. Zhang, F., Yu, J. and Han, J. (2011), "Effects of Thermal Oxidative Ageing on Dynamic Viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS/sulfur-Modified Asphalts", *Construction and Building Materials*, 25, pp.129–137.
9. Zhang, F. and Hu, Ch. (2013), "The Research for SBS and SBR Compound Modified Asphalts with Polyphosphoric acid and Sulfur", *Construction and Building Materials*, 43, pp.461–468.
10. Karimi, M. M., Tabatabaee, N., Jahanbakhsh, H. and Jahangiri, B. (2016), "Development of a stress-mode sensitive viscoelastic constitutive relationship for asphalt concrete: Experimental and numerical modeling", *Mechanics of Time Dependent Materials*.
11. Kim, M., Mohammad, L. and Elseifi, M. (2012), "Characterization of fracture properties of asphalt mixtures as measured by semicircular bend test and indirect tension test", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2296, 115–124.
12. Mohammad, L. N., Kabir, M. D. and Saadeh, S. (2008), "Evaluation of fracture properties of HMA", 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Chicago.
13. Walubita, L., Jamison, B., Das, G., Scullion, T., Martin, A., Rand, D. and Mikhail, M. (2011), "Search for a Laboratory Test to Evaluate Crack Resistance of Hot-Mix Asphalt", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2210, 73–80.
14. Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Moghadas Nejad, F. and Jahangiri, B. (2016), "Viscoelastic-based approach to evaluate low temperature performance of asphalt binders", *Construction and Building Materials*, 128, 384–398.
15. Huang, B., Shu, X. and Tang, Y. (2005), "Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures", In *Advances in Pavement Engineering*, Geo-Frontiers Congress, January 24–26, Austin, Texas, United States, 1–12.
16. Moghadas Nejad, F., Habibi, M., Hosseini, P. and Jahanbakhsh, H. (2017), "Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable cement emulsified asphalt mortar", *Journal of Cleaner Production*, 156, 717–728.
17. Cooper, S. B. Jr., Mohammad, L. N. and Abadie, C. (2007), "Evaluation of field projects using crumb rubber modified asphaltic concrete", (No. FHWA/LA. 04/393).
18. McDaniel, R. and Shah, A. (2003), "Asphalt additives to control rutting and cracking", (Publication FHWA/IN/JTRP-2002/29), West Lafayette, IN: Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University.