ارزیابی عملکرد قیر حاوی میکرو الیاف سلولزی و پلیمر اس بی اس و اس بی آر

مقاله علمی - پژوهشی

شاهین شعبانی*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ص.پ. ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵ ، تهران، ایران
سمیه محمدیان گزاز، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، ص.پ. ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران
حامد سیفی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸- پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵
صفحه ۲۵۶-۲۳۹

چکیده

یکی از مشکلات استفاده از قیرهای اصلاح‌شده، هزینه بالای افزودنی‌ها از جمله انواع الیاف است که به نوبه خود می‌تواند هزینه قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده را افزایش دهد؛ بنابراین در این تحقیق از مواد ضایعاتی ارزان‌قیمت کارخانه‌های تولید کاغذ شامل لیکور و میکرو الیاف سلولزی (حاصل از آسیاب خمیرکاغذ ضایعاتی) استفاده شده است تا برخلاف سایر تحقیقات انجام‌شده، علاوه بر بهبود خصوصیات قیر و مزایای زیست‌محیطی استفاده از مواد ضایعاتی، هزینه تولید قیر اصلاح‌شده نیز کاهش یابد. همچنین در این تحقیق، خصوصیات قیرهای پلیمری شامل استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر به دلیل کاربرد بیشتر در روسازی‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است تا امکان مقایسه و ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح شده با لیکور و میکرو الیاف سلولزی فراهم گردد. بدین منظور، آزمایش‌های شارپ از جمله آزمایش رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی بر روی نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر و الیاف انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش سختی قیر در تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده است. بااین‌حال مطابق با نتایج آزمایش‌های کلاسیک قیر و همچنین آزمایش ویسکوزیته دورانی، پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر تأثیر بیشتری بر روی افزایش سختی و افزایش ویسکوزیته قیر داشته‌اند. به طوری که دمای اختلاط و تراکم نمونه‌های اصلاح‌شده با این دو افزودنی افزایش چشم‌گیری داشته است. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، علی‌رغم بهبود دمای عملکردی بالای قیر حاوی لیکور، این افزودنی تأثیر منفی بر روی دمای عملکردی پایین قیر داشته است. همچنین میکرو الیاف سلولزی در مقایسه با پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر تأثیر کمتری بر روی بهبود خصوصیات قیر داشته است، بااین‌حال، مزایای استفاده از میکرو الیاف سلولزی در اصلاح خصوصیات قیر از جمله کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی در مقایسه با قیرهای پلیمری و کاهش هزینه‌های ساخت و اجرای روسازی‌های آسفالتی به دلیل استفاده مواد ضایعاتی ارزان‌قیمت را نمی‌توان نادیده گرفت.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های شارپ، دمای عملکردی، قیر اصلاح‌شده پلیمری، لیکور، میکرو الیاف سلولزی

۱- مقدمه

روند شهرنشینی و صنعتی‌شدن سریع جهان در قرن اخیر سبب شده است تا ساخت و نگهداری راه‌ها به یک تقاضای ثابت در مناطق شهری و روستایی تبدیل گردد. با افزایش نیاز به ساخت راه‌های جدید و همچنین کاهش طول عمر مفید روسازی‌های آسفالتی به دلیل افزایش بیش از حد بارهای ترافیکی و عوامل مخرب محیطی، ضروری است تا کیفیت روسازی راه‌ها افزایش‌یافته و از تحمیل هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری راه‌ها کاسته شود (Siriwardane, Gondle, and Kutuk,

2010)؛ در حال حاضر بخش عظیمی از بودجه عمرانی کشورها صرف ترمیم و نگهداری و بهسازی راه‌ها می‌شود. به طور مثال در کشور ایالات متحده آمریکا، هر ساله حدود ۱۰ تا ۲۵ میلیارد دلار به تعمیر و نگهداری از روسازی‌های آسفالتی اختصاص داده می‌شود (Asphalt Institute and Federal Highway Administration, 2007; Epps and Johnson, 2021). در کشور ایران نیز علی‌رغم نیاز کشور به تعمیر و نگهداری و همچنین ساخت راه‌های جدید، افزایش قیمت قیر به عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی باعث کاهش قابل‌توجه مقدار تولید آسفالت در کشور شده است که خود نشان‌دهنده ضرورت بهبود کیفیت روسازی راه‌ها به عنوان سرمایه ملی است. در چند دهه اخیر تحقیقات بسیاری جهت بهبود خواص قیر صورت‌گرفته و طیف گسترده‌ای از مواد اصلاح‌کننده به‌منظور بهبود خواص و رفتارِ قیر، مورداستفاده قرار گرفته‌اند که از مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به الیاف و پلیمرها اشاره کرد.

تحقیقات انجام شده توسط محققان نشان‌دهنده مزایای قابل‌توجه استفاده از پلیمرها در مخلوط‌های آسفالتی است که از آن جمله می‌توان به بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی به دلیل مقاومت بیشتر در برابر شیار افتادگی و ترک‌های حرارتی، کاهش ترک‌های ناشی از خستگی و بهبود حساسیت حرارتی مخلوط‌های آسفالتی اشاره کرد (Porto et al., 2019; Yildirim, 2007). امروزه از قیرهای اصلاح شده پلیمری در مکان‌هایی تحت بار و تنش زیاد از جمله تقاطع خیابان‌های شلوغ، فرودگاه‌ها، محل توزین ماشین‌های سنگین و پیست‌های اتومبیل‌رانی استفاده می‌شود. از پلیمرهای مورداستفاده به جهت اصلاح خصوصیات قیر می‌توان به استایرن بوتادین استایرن (SBS)، استایرن بوتادین رابر (SBR)، پودر لاستیک، اتیلن وینیل استات (EVA) و پلی‌اتیلن اشاره کرد. قیرهای اصلاح شده پلیمری دارای خصوصیات مطلوبی از جمله بازیابی الاستیک و نقطه نرمی بالاتر و همچنین کشش‌پذیری بیشتری در مقایسه با قیر فاقد افزودنی هستند (Porto et al., 2019; Yildirim, 2007). در مطالعه انجام شده توسط ارتش آمریکا در سال ۲۰۰۳ میلادی، قیرهای اصلاح شده با پلیمر، مقاومت بیشتری در مقایسه با قیرهای اصلاح نشده در برابر خرابی‌ها از جمله شیار افتادگی، ترک‌های خستگی و ترک‌خوردگی ناشی از دمای پایین از خود نشان دادند (Newman, 2003; Yildirim, 2007). باوجود مزایای قابل‌توجه استفاده از قیرهای پلیمری، مشکلاتی مانند پیرشدگی و هزینه تولید بسیار بالاتر از قیرهای معمولی، استفاده از قیرهای پلیمری را تحت‌الشعاع قرار داده است؛ بنابراین مطالعات زیادی دررابطه‌با سایر افزودنی‌های اصلاح‌کننده قیر صورت گرفته است. دراین‌بین، استفاده از الیاف‌ها به‌خصوص، الیاف به‌دست‌آمده از گیاهان را می‌توان چشم‌انداز نسبتاً جدیدی برای اصلاح خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی دانست که استفاده از آن‌ها در بخش‌های مختلف صنعت ساخت‌وساز، به طور روزافزونی افزایش یافته است. از میان انواع الیاف مورداستفاده به جهت اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی، الیاف سلولزی را می‌توان از منابع مختلفی ازجمله گیاهان، درختان و حتی ضایعات کارخانه‌های تولید کاغذ تهیه کرد، این خصوصیت سبب دردسترس‌بودن این الیاف و قیمت کمتر آن در مقایسه با سایر انواع الیاف مورداستفاده به جهت اصلاح خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی شده است. در تحقیقات انجام شده، استفاده از الیاف سلولزی به‌عنوان یک افزودنی سازگار با محیط‌زیست، توانسته است علاوه بر جلوگیری از جداشدن قیر از سنگ‌دانه‌ها (ریزش قیر)، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل‌های دائمی افزایش دهد. از دیگر مزایای استفاده از میکرو الیاف سلولزی به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر می‌توان به بهبود خصوصیات قیر حاوی الیاف اشاره کرد، به‌طوری‌که دمای عملکردی بالا و پایین قیر حاوی میکرو الیاف سلولزی در تحقیقات گذشته بهبود یافته است (Li et al., 2021)؛ بنابراین در این تحقیق، باتوجه‌به نتایج تحقیقات گذشته و همچنین قیمت کمتر الیاف سلولزی در مقایسه با سایر انواع الیاف، از میکرو الیاف سلولزی حاصل از آسیاب خمیرکاغذ ضایعاتی به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر استفاده شده است.

باتوجه‌به سهم قابل‌توجه روسازی‌های آسفالتی از مجموع روسازی راه‌های کشور، استفاده از پسماند کارخانه‌های کاغذسازی در اصلاح این نوع از روسازی‌ها می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، نقش مؤثری در کاهش مشکلات زیست‌محیطیِ ناشی از دپو این ضایعات ایفا کند؛ لذا هدف از انجام این تحقیق بررسی استفاده از پسماند کارخانه‌های تولید کاغذ شامل لیکور و میکرو الیاف سلولزی حاصل از آسیاب خمیرکاغذ و مقایسه آن با قیرهای اصلاح‌شده پلیمری شامل دو افزودنی استایرن بوتادین استایرن (SBS) و استایرن بوتادین

رابر (SBR) است. در این راستا خصوصیات قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده با انجام آزمایش‌های کلاسیک قیر و آزمایش‌های شارپ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

استفاده از الیاف به‌منظور تقویت و بهبود رفتار مواد سابقه طولانی داشته و بر اساس نظر هونگو و فیلیپس، برای اولین‌بار ٤٠٠٠ سال قبل در کشور چین از ترکیب الیاف و خاک رس استفاده شده بود (Hongu and Philips, 1990). بااین‌حال استفاده از الیاف به منظور اصلاح خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی به اواسط دهه ١٩٦٠ میلادی بازمی‌گردد (Mahrez et al., 2003).

هدف اصلی از افزودن الیاف به قیر را می‌توان افزایش مقاومت کششی قیر و درنتیجه افزایش توانایی قیر در جذب انرژی کرنشی در طی فرایند خستگی و شکست دانست (Mahrez et al., 2003). استفاده از الیاف به دلیل مقاومت کششی بالاتر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی، می‌تواند موجب افزایش مقاومت کششی و چسبندگیِ مخلوط‌های آسفالتی گردد. به طور کلی، انواع الیاف را می‌توان باتوجه به روش ساخت به دو دسته طبیعی و مصنوعی دسته‌بندی کرد. از الیاف طبیعی می‌توان به آزبست، سلولز و پشم سنگ اشاره کرد و از الیاف مصنوعی می‌توان از پلی‌پروپیلن، پلی آستر و آرامید نام برد. در تحقیقات انجام شده برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی، از هر دو نوع الیاف طبیعی و مصنوعی استفاده شده است. استفاده از الیاف در آسفالت ماستیک سنگ‌دانه‌ای موجب تقویت و سختی مخلوط آسفالتی شده و واکنش شیمیایی با افزودن الیاف صورت نمی‌گیرد. از مزایای استفاده از الیاف در روسازی آسفالتی می‌توان به کاهش ترک‌های خستگی و حرارتی، کاهش ترک‌های انعکاسی و مزایای اقتصادی باتوجه‌به افزایش عمر مفید روسازی آسفالتی اصلاح شده با الیاف اشاره کرد (Mahrez and Karim, 2007).

وو و همکارانش (۲۰۰۷)، در مطالعه‌ای، مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با سه نوع الیاف سلولز، پلی‌استر و الیاف معدنی (به ترتیب با مقادیر ۰/۳ درصد، ۰/۳ درصد و ۰/٤ درصد) را با آزمایش مدول دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمایش مدول دینامیکی آسفالت شامل مدول دینامیکی و زاویه فاز نتیجه گرفتند که مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف دارای مدول دینامیکی بالاتری در مقایسه با مخلوط آسفالتی اصلاح نشده است. همچنین مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی در مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف بهبود یافته است (S. Wu et al., 2007).

در تحقیق انجام شده توسط جِنک و همکارانش، از روش مکانیک شکست به‌منظور بررسی تأثیر الیاف بر مقاومت در برابر رشد ترک در مخلوط آسفالتی استفاده شد (Jenq et al., 1993). بدین‌منظور مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با دو نوع الیاف پلی استر و پلی‌پروپیلن از نظر مدول الاستیسیته، انرژی شکست و مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان دهنده افزایش چقرمگی با افزایش ۵۰ تا ۱۰۰ درصدی انرژی شکست است، در حالی‌که افزایش انرژی شکست تأثیر کمی بر روی الاستیسیته و مقاومت کششی داشته است. افزایش میزان پارامتر چقرمگی شکست می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی اصلاح شده در برابر بارهای وارده و مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک باشد (Cleven, 2000).

سیمپسون و محبوب (١٩٩٤)، در مطالعه‌ای به بررسی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف و پلیمرهای پلی‌پروپیلن و پلی‌استر با انجامِ آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و یخ‌زدگی، مدول الاستیسیته و شیارشدگی پرداختند. در تحقیق آن‌ها، مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن از خود مقاومت کششی و مقاومت ترک‌خوردگی بیشتری نشان دادند. بااین‌وجود الیاف پلی‌پروپیلن تأثیری بر روی بهبود مقاومت در برابر رطوبت و خرابی ناشی از یخ‌زدگی و ذوب شدن نداشته است. همچنین برخلاف مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف پلی‌استر و پلیمرها، مخلوط آسفالتی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن مشکلی از نظر ترک‌خوردگی حرارتی نداشته است. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته نشان داد که مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن از سختی بیشتری برخوردار بوده و کاهش شیارشدگی نیز فقط برای نمونه اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شده است (Cleven, 2000; Simpson and Mahboub, 1994). در تحقیقات گذشته، استفاده از الیاف سلولزی به جهت اصلاح خصوصیات قیر سبب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی قیر شده است (Mohammed et al., 2018; M.-M. M. Wu et al., 2015). در تحقیق انجام شده توسط محمد و همکارانش،

درجه نفوذِ قیرهای اصلاح‌شده با الیاف شیشه و الیاف سلولز کاهش یافته است؛ بااین‌حال، الیاف شیشه تأثیر بیشتری بر کاهش درجه نفوذِ قیر داشته است. آن‌ها طول کوتاه‌تر الیاف سلولز نسبت به الیاف شیشه را در تأثیر کمتر آن بر روی کاهش درجه نفوذ مؤثر دانستند (Mohammed et al., 2018). با کاهش درجه نفوذِ قیرِ اصلاح‌شده با الیاف سلولز، نقطه نرمی آن افزایش یافته است؛ بنابراین استفاده از الیاف سلولز می‌تواند خصوصیات قیر را دمای بالا بهبود بخشد. با پراکنده شدن الیاف در قیر و جذب قیر توسط الیاف، به دلیل ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در قیر، نیروی اتصال قوی بین سطح الیاف و قیر به وجود می‌آید؛ بنابراین، با حفظ این شبکه در دمای بالا، خصوصیات قیر حاوی الیاف نیز، در دمای بالا بهبود یافته است (Mohammed et al., 2018; M.-M. M. Wu et al., 2015)؛ بااین‌حال میزان تأثیر الیاف بر روی خصوصیات قیر به مشخصات الیاف از جمله طول و نوع الیاف وابسته می‌باشد (Chen and Lin, 2005).

در تحقیق وو و همکارانش، برای تعیین حداقل مقدارِ الیاف، از نتایج آزمایش نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده با الیاف استفاده شده است. به‌طوری‌که با درنظرگرفتن حداکثر دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای روسازی آسفالتی در تابستان، حداقل مقدار الیاف سلولز بر اساس دمای نقطه نرمی، یک درصد تعیین شده است. حداقل مقدار الیاف مصرفی به خصوصیات قیر خالص و نوع الیاف وابسته بوده و بنابراین نمی‌توان حداقل مقدار الیاف لازم به جهت اصلاح خصوصیات قیر را بر اساس نتایج تحقیقات گذشته تعیین کرد. یکی از دلایل تأثیر نوع الیاف بر نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند، درهم‌تنیدگی و درگیری متفاوت انواع الیاف با قیر باشد (M.-M. M. Wu et al., 2015). نتایج تحقیقات گذشته نشان‌دهنده افزایش ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده با الیاف است. بالتبع با افزایش ویسکوزیته و سختی قیر، مقاومت در برابر شیارشدگیِ قیرهای اصلاح شده نیز، افزایش می‌یابد (Chen and Lin, 2005; Mohammed et al., 2018)؛ بنابراین، استفاده از الیاف از جمله الیاف سلولزی، صرفه نظر از دمای آزمایش، می‌تواند باعث افزایش پارامتر شیارشدگی نسبت به قیر فاقد افزودنی شود (Mohammed et al., 2018; Shaopeng et al., 2006; M.-M. M. Wu et al., 2015)؛ بااین‌حال، میزان افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده به مقدار الیاف مصرفی وابسته بوده است. به طور مثال، شائوپنگ و همکارانش در تحقیقی، با مقایسه قیرهای اصلاح شده با مقدار الیاف متفاوت، به این نتیجه رسیدند که در صورتِ کاهش الیاف موجود در قیر، آن‌ها با یکدیگر تعامل و برهم کنش کافی نداشته و الیاف به عنوان مواد پرکننده در قیر عمل می‌کند. بنابراین استفاده از مقدار کم الیاف، تأثیر چندانی بر افزایش مقدار مدول مختلط نداشته است (Shaopeng et al., 2006).

در تحقیق انجام شده توسط وو و همکارانش، با افزایش مقدار الیاف سلولزِ مصرفی از ٤ به ٦ درصد، پارامتر مقاومت در برابر شیارشدگی قیر اصلاح‌شده افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین الیاف سلولز در مقایسه با الیاف کربن و الیاف معدنی تأثیر بیشتری بر روی بهبود پارامتر شیارشدگی داشته است. آن‌ها در تحقیق خود، به جذب بیشتر رزین و روغن‌های موجود در قیر، توسط الیاف سلولزی اشاره کردند که می‌تواند دلیل افزایش سختی و در نتیجه افزایش پارامتر شیارشدگی در قیرهای حاوی الیاف سلولز باشد (M.-M. M. Wu et al., 2015). از دیگر دلایل بهبود دمای عملکردی بالای قیرهای اصلاح شده با الیاف می‌توان به کاهش زاویه فاز اشاره کرد. بر اساس نتایج تحقیق انجام شده توسط محمد و همکارانش، الیاف سلولز تأثیر بیشتری بر کاهش زاویه نسبت به الیاف شیشه داشته است. که از دلایل آن، می‌توان به سطح ناهموارتر الیاف سلولز نسبت به الیاف شیشه و تشکیل الیاف سلولز از دسته‌های کوچک‌تر الیاف اشاره کرد (Mohammed et al., 2018).

از دیگر افزودنی‌های مورداستفاده به جهت اصلاح خصوصیات قیر می‌توان از لیکور نام برد. لیکور حاوی مقادیر قابل‌توجهی از لیگنین بوده که می‌توان از آن به‌عنوان جایگزین بخشی از قیر (تا ۲۵ درصد) و یا به‌عنوان افزودنی اصلاح‌کننده در روسازی آسفالتی استفاده کرد. در حال حاضر، لیگنین را می‌توان یکی از فراوان‌ترین بیوپلیمرهای روی زمین با تولید حدود ۵۰ تا ۷۰ میلیون تن در سال دانست که بخش قابل‌توجهی از این مقدار بدون استفاده مجدد سوخته و یا دور ریخته می‌شود (Boerjan and Ralph, 2003; Mandlekar et al., 2018).

مطابق با نتایج تحقیقات گذشته، استفاده از لیگنین می‌تواند موجب بهبود خصوصیات قیر گردد. قیر حاوی لیگنین دارای ویسکوزیته بیشتری نسبت به قیر خالص است. این افزایش، به مقدار لیگنین مصرفی وابسته بوده و متناسب با مقدار لیگنین، ویسکوزیته قیر افزایش یافته است (Sundstrom et al.,

1983; Terrel and Rimsritong, 1979). با افزایش ویسکوزیته، مقاومت در برابر شیارشدگی قیر اصلاح‌شده با لیگنین نیز، افزایش یافته است (McCready and Williams, 2008).

در تحقیق انجام شده توسط زارعی و همکاران، از لیکور سیاه با درصدهای وزنی مختلف (۲، ٤، ٦ و ۸ درصد) به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر ٦۰/۷۰ پالایشگاه اصفهان استفاده شد و تأثیر این افزودنی بر خواص مختلف قیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها، نشان‌دهنده بهبود خصوصیات و کارایی قیر اصلاح‌شده در دمای بالا است. افزودن لیکور سیاه به قیر خالص باعث کاهش درجه نفوذ، افزایش ویسکوزیته کینماتیک، افزایش نقطه نرمی و کاهش حساسیت حرارتی قیر شده است (Zarei et al., 2017). در تحقیقات گذشته، بهبود خصوصیات قیر، به مقدار افزودنی وابسته بوده و استفاده از لیگنین به مقدار کمتر از ۳ درصد، تأثیری بر روی خواص عملکردی قیر نداشته است. همچنین افزایش بیش از ٦ درصدی لیگنین موجب افزایش قابل‌توجه سختی قیر شده و تأثیر منفی بر روی دمای عملکردی پایین قیر داشته است (Zahedi et al., 2020).

در مطالعه‌ای دیگر وانگ و همکارانش به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی خواص رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده با لیگنین پرداختند. در این تحقیق، دو نوع قیر با درجه عملکردی PG ٦٤-۲۲ و PG ۲۲-۷٦ با دو درصد متفاوت از لیگنین (۵ و ۱۰ درصد وزنی) ترکیب شده و خواص رئولوژیکی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی نشان داد که افزایش مقدار لیگنین باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و افزایش دمای عملکردی بالای قیر شده است. آن‌ها بیان داشتند که لیگنین موجود در لیکور فقط مانند یک فیلر عمل نمی‌کند بلکه با قیر واکنش شیمیایی می‌دهد (Wang and Derewecki, 2013).

سو و همکاران (۲۰۱۷)، در تحقیقی به بررسی خواص رئولوژیکی و عملکرد ضد پیرشدگی قیر اصلاح‌شده با لیگنین پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از لیگنین موجب افزایش ویسکوزیته و همچنین افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی قیر شده است؛ بااین‌حال، مقدار ویسکوزیته مناسب برای اختلاط و تراکم قیر مطابق با مشخصات روسازی ممتاز برای تولید مخلوط آسفالتی داغ برآورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی و آزمایش جاروب دامنه خطی نشان داد که لیگنین، تأثیر منفی کمی بر روی دمای عملکردی پایین قیر و مقاومت در برابر خستگی داشته است. به‌طوری که عمر خستگی قیر اصلاح شده با لیگنین به‌خصوص در سطح کرنش پایین‌تر کاهش یافته است (Xu et al., 2017).

از دیگر دلایل استفاده از لیگنین به‌منظور اصلاح‌کننده قیر، می‌توان به خصوصیت آنتی‌اکسیدان لیگنین به دلیل ساختار پلی فنولیک موجود در آن و مهار رادیکال‌های آزاد اشاره کرد که باعث شده است محققان، از این افزودنی، به‌منظور بهبود پیری و یا شکنندگی قیر بر اثر اکسیداسیون و یا ازدست‌دادن مواد فرار استفاده کنند (Bishara et al., 2005).

مطابق با نتایج تحقیق سو و همکارانش، لیگنین می‌تواند به مقاومت در برابر تشکیل گروه‌های عملکردی کربونیل در قیر اصلاح شده پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت و پیرشدگی بلندمدت کمک کند؛ بنابراین می‌توان از لیگنین به‌عنوان آنتی‌اکسیدان برای کاهش اثرات منفی پیرشدگی در قیر و مخلوط آسفالتی استفاده کرد (Xu et al., 2017).

باتوجه‌به نقش پارامترهای اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی در ارزیابی پروژه‌های مهندسی، باید علاوه بر تأثیر مواد افزودنی بر اصلاح خصوصیات عملکردی قیر و افزایش مقاومت و دوام روسازی، در انتخاب مواد افزودنی به‌منظور اصلاح قیر، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را نیز مدنظر قرار داد. استفاده از الیاف به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی به دلیل قیمت کمتر و دمای کمتر موردنیاز برای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی، نسبت افزودنی‌های پلیمری ارجحیت دارد؛ بنابراین در این تحقیق علاوه بر و پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر، به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر پایه از پسماند کارخانه‌های کاغذسازی شامل الیاف سلولزی حاصل از آسیاب خمیرکاغذ، لیکور و همچنین ترکیب آن‌ها استفاده شده است تا با استفاده مجدد از مواد ضایعاتی ارزان‌قیمت علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، خصوصیات عملکردی قیر نیز بهبود یابد. باتوجه‌به نیاز کشور به احداث راه‌های جدید و همچنین افزایش هزینه‌های سوخت و آلودگی هوای ناشی از تولید و اجرای مخلوط آسفالتی، استفاده از الیاف به‌منظور اصلاح

خصوصیات قیر می‌تواند راه‌حلی مناسب و کم‌هزینه برای کاهش مشکلات و خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی باشد.

۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی در این پژوهش بهبود خصوصیات عملکردی قیر، با استفاده از دو افزودنی لیکور و میکرو الیاف سلولزی است. در کنار این هدف، صرفه‌جویی اقتصادی با استفاده مجدد از پسماند کارخانه‌های کاغذسازی و همچنین کاهش عوارض زیست‌محیطی ناشی از دپو این ضایعات، از دیگر اهداف این تحقیق می‌باشد. در این تحقیق برخلاف تحقیقات گذشته، از میکرو الیاف سلولزی حاصل از خمیر کاغذ ضایعاتی استفاده شده است که می‌تواند منجر به کاهش هزینه تولید و اجرای مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده در مقایسه با الیاف سلولزی گران‌قیمتِ مورد استفاده در سایر تحقیقات گردد. همچنین استفاده از این نوع الیاف و لیکور (به عنوان یکی از ضایعات کارخانه‌های تولید کاغذ) علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی به دلیل قیمت کمتر آن، می‌تواند به کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع ضایعات کارخانه‌های تولید کاغذ نیز کمک کند؛ بنابراین نوآوری این تحقیق را می‌توان استفاده از ضایعات کارخانه‌های تولید کاغذ شامل خمیر کاغذ ضایعاتی و لیکور دانست. همچنین در تحقیقات گذشته، ترکیب لیکور و الیاف سلولزی مورد بررسی قرار نگرفته است.

٤- مواد و مصالح

این پژوهش، علاوه بر تأثیر مواد افزودنی بر اصلاح خصوصیات عملکردی قیر، سایر پارامترهای دخیل در انتخاب مواد افزودنی از جمله جنبه‌های اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی را نیز مدنظر قرار داده است؛ لذا باتوجه‌به حجم قابل‌توجه پسماند کارخانه‌های کاغذسازی و باهدف استفاده مجدد از این ضایعات، مطابق با شکل ۱، از لیکور و خمیر کاغذ ضایعاتی به‌منظور اصلاح خصوصیات قیر پایه استفاده شده است. همچنین به‌منظور مقایسه عملکرد قیرهای اصلاح شده از پلیمرهای SBS و SBR استفاده شده است.

٤-١- قیر

در این تحقیق، باتوجه‌به اقلیم غالبِ گرم و خشک کشور، از قیر تولیدی شرکت نفت جی، با درجه نفوذ ٦٠/٧٠ (درجه عملکردی ٢٢-٦٤)، مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۱، به‌عنوان قیر پایه استفاده شده است.

٤-٢- مواد افزودنی

لیکور مصرفی در این تحقیق با مشخصات ارایه شده در جدول ۲، از پسماند کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه شده است. باتوجه‌به حالتِ مایع لیکور سیاه و ناخالصی موجود در آن، قبل از افزودن لیکور به قیر باید آن را به طور غیرمستقیم گرم کرده (حداکثر دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) و از پودر باقی‌مانده بعد از عبور از الک ۳۰ به‌عنوان افزودنی به قیر استفاده کرد. این پودر در مقایسه با حالت مایع دارای مقادیر قابل‌توجهی از لیگنین بوده که می‌تواند تأثیر بیشتری بر بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی داشته باشد. خمیرکاغذ ضایعاتی از شرکتِ برگ‌داران صنعت، با طول متوسط الیاف ۰/۲ میلی‌متر تهیه شده است. این افزودنی، مشابه با لیکور، در گرم‌خانه به مدت‌زمان ٢٤ ساعت و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک شده و پس از خشک‌شدن کامل، پس از آسیاب برای اختلاط با قیر مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق از استایرن بوتادین استایرن (SBS) تولیدی شرکت Dynasol کشور اسپانیا با ساختار مولکولی خطی و دارای ۳۰ درصد استایرن استفاده شد. دیگر پلیمر مورداستفاده در این تحقیق، استایرن بوتادین رابر (SBR) تولیدی شرکت پتروشیمی تخت‌جمشید با مشخصات ارایه شده در جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات قیر ٦٠/٧٠ مصرفی

قیر	شرکت سازنده	وزن مخصوص	درجه نفوذ	نقطه نرمی	خاصیت انگمی
٦٠-٧٠	شرکت پالایش نفت جی	١/٠٢	٦٦	٤٩/٦	>١٠٠

جدول ۲. آنالیز لیکور سیاه

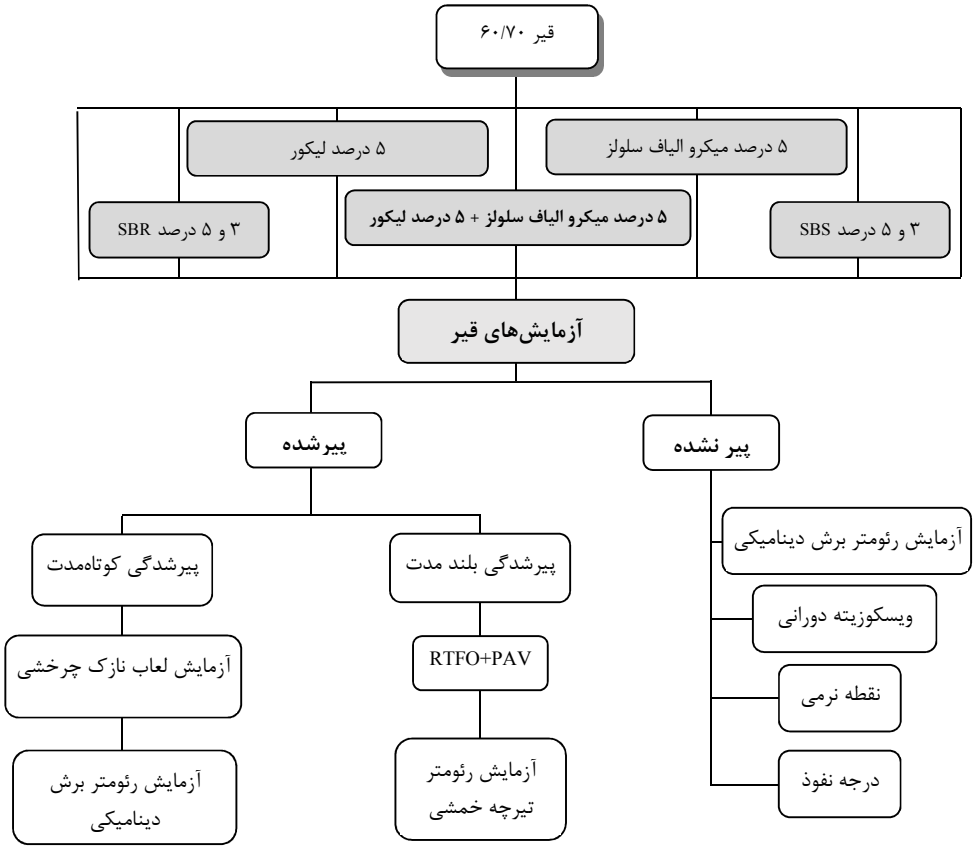
ترکیبات	کربن	هیدروژن	نیتروژن	گوگرد	خاکستر	اکسیژن
درصد ماده خشک	۶۲/۱۷	۵/۸۹	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۶۲	۳۱/۱۱

جدول ۳. مشخصات استایرن بوتادین رابر مورد استفاده در این تحقیق

نام محصول	درصد باند استایرن	ویسکوزیته مونی (ML 1+4 @ 100 °C)	محتوی روغن (phr)	نوع آنتی‌اکسیدان
TJPC 1712	۲۳/۵	۵۲-۴۲	۳۷/۵	بدون لکه

الف. لیکور ب. خمیر کاغذ ضایعاتی ج. SBS د. SBR

شکل ۱. مواد افزودنی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲. فلوچارت تحقیق

روش تحقیق

پژوهش حاضر، ازنظر هدف تأییدی - کاربردی و از نظر ماهیت، پژوهشی آزمایشگاهی است. در این تحقیق مطابق با شکل ۲، خصوصیات فیزیکی قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های لیکور، خمیرکاغذ، استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر، با آزمایش‌های کلاسیک قیر (درجه نفوذ و نقطه نرمی) و خصوصیات رئولوژی قیرهای اصلاح‌شده با آزمایش‌های شارپ (آزمایش ویسکوزیته دورانی، رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی) مورد بررسی قرار گرفته است.

اختلاط قیر و افزودنی‌ها

مقدار مناسب هرکدام از افزودنی‌های مورد بررسی در این تحقیق، بر اساس تحقیقات گذشته و همچنین نتایج آزمایش‌های اولیه انتخاب شده است. در این راستا، از ۳ و ۵ درصد پلیمر SBS و SBR به‌منظور اصلاح خواص قیر استفاده شد (Chen et al., 2002; Hanyu et al., 2005).

باتوجه به این موضوع که استفاده از لیکور و خمیر کاغذ به میزان کمتر از ۳ درصد نمی‌تواند تأثیر چندانی بر بهبود خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی داشته باشد و در صورت استفاده از لیکور و خمیر کاغذ به میزان بیش از ٦ درصد، سختی قیر نیز، افزایش‌یافته و می‌تواند علاوه بر شکنندگی قیر و ایجاد انواع ترک‌خوردگی در روسازی آسفالتی، یکپارچگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده را نیز کاهش دهد (Andrés-Valeri et al., 2018; Gupta et al., 2019; Zahedi et al., 2020)؛ لذا مقدار مناسب خمیرکاغذ و لیکور، بر اساس تحقیقات گذشته ۵ درصد انتخاب شد تا علاوه بر کاهش تأثیر منفی افزودنی‌ها بر سایر خصوصیات قیر، امکان مقایسه تأثیر افزودنی‌ها بر خصوصیات قیر پایه با یکدیگر نیز فراهم شود.

باتوجه‌به محدودیت اندازه ذرات مواد اصلاح‌کننده در آزمایش رئومتر برش دینامیکی، از آسیاب به‌منظور کاهش ابعاد مواد افزودنی (لیکور و خمیرکاغذ) به‌اندازه کمتر از ۲۵۰ میکرون استفاده شد تا امکان انجام این آزمایش بر روی قیرهای اصلاح شده فراهم شود (Read and Whiteoak, 2003). بدین منظور ابتدا مواد افزودنی به مدت ٢٤ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و پس از خشک شدن کامل، از آسیاب به‌منظور کاهش ابعاد مواد افزودنی استفاده شده است.

باتوجه‌به جامد و نامحلول بودن افزودنی‌ها، در تحقیقات گذشته برای اختلاط همگن لیگنین و قیر از همزن برش بالا استفاده شده است (Lynam et al., 2018)؛ بنابراین مشابه با تحقیقات انجام شده در این زمینه (Arafat et al., 2019; J. Wu et al., 2021)، در این تحقیق نیز، برای اختلاط قیر با افزودنی‌ها از همزن برش بالا مطابق با شکل ۳، با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است. دمای اختلاط و مدت‌زمان اختلاط قیر و افزودنی‌ها بر اساس نتایج تحقیقات گذشته تعیین گردیده است. بدین منظور مطابق با جدول شماره ٤، باتوجه‌به نوع افزودنی، دمای اختلاط، ١٦٠ تا ١٨٥ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان اختلاط قیر و افزودنی‌ها ۳۰ تا ٦٠ دقیقه در نظر گرفته شده است (Mohammed et al., 2018).

جدول ٤. شرایط اختلاط قیر و مواد افزودنی

به‌اختصار	ترکیب	دمای اختلاط (درجه سانتی‌گراد)	مدت‌زمان اختلاط (دقیقه)
CS	قیر پایه	-	-
L5	قیر پایه + ۵ درصد لیکور	١٦٠	۳۰
CM5	قیر پایه + ۵ درصد خمیرکاغذ	١٦٠	۳۰
L5+CM5	قیر پایه + ۵ درصد لیکور + ۵ درصد خمیرکاغذ	١٦٠	٦٠
SBS3	قیر پایه + ۳ درصد SBS	١٨٥	٦٠
SBS5	قیر پایه + ۵ درصد SBS	١٨٥	٦٠
SBR3	قیر پایه + ۳ درصد SBR	١٨٥	٦٠
SBR5	قیر پایه + ۵ درصد SBR	١٨٥	٦٠

شکل ۳. همزن برش بالا

آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی

آزمایش‌های متداول قیر، شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی مطابق با استانداردهای ASTM-D5 و ASTM-D36 برای تعیین خصوصیات فیزیکی قیر اصلاح‌شده انجام شد؛ علاوه بر این، با مقایسه مقدار شاخص نفوذ برای قیر پایه و نمونه‌های اصلاح‌شده، تأثیر افزودنی‌ها بر روی حساسیت حرارتی قیر مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین حساسیت دمایی قیر از معادله توسعه‌یافته توسط فایفر و ون دورمال استفاده شد:

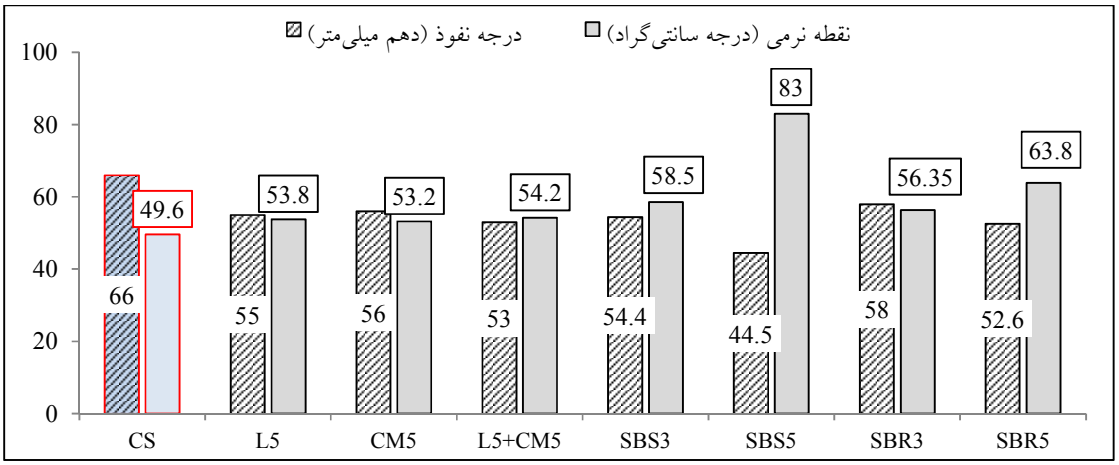
$$A = \frac{\log 800 - \log(\text{pen at } 25℃)}{T_{R\&B} - 25℃} \qquad (۱)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \qquad (۲)$$

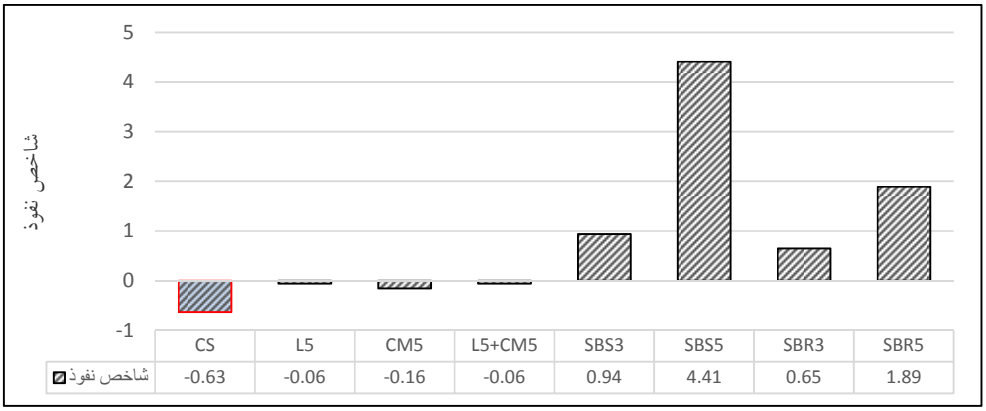
که در رابطه‌های ذکرشده در بالا:

A: حساسیت دمایی، PI: شاخص نفوذ و $T_{R\&B}$: دمای نقطه نرمی است.

نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی مطابق با شکل ٤، نشان‌دهنده افزایش سختی قیر در تمامی نمونه‌های اصلاح شده است.



شکل ٤. درجه نفوذ و نقطه نرمی



شکل ۵. شاخص نفوذ

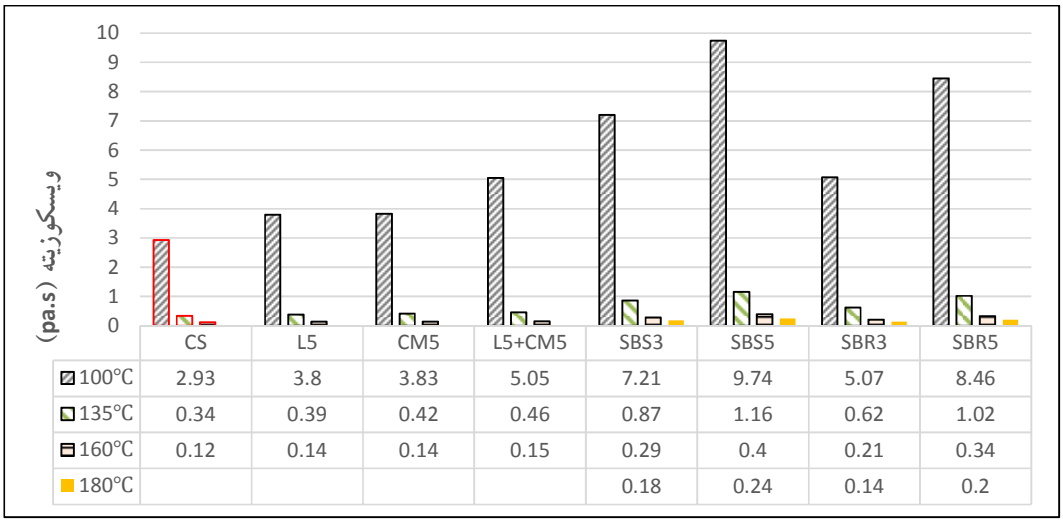
از میان افزودنی‌های مورد بررسی، استفاده از ۵ درصد پلیمر SBS بیشترین تأثیر را بر روی نقطه نرمی (افزایش حدود ٦٧ درصدی) نسبت به قیر پایه داشته است. افزایش سختی قیر با مقدار افزودنی رابطه مستقیم داشته و با افزایش مقدار افزودنی پلیمری از ۳ به ۵ درصد وزنی، سختی قیر نیز افزایش یافته است. سختی قیر در نمونه ترکیبی لیکور و الیاف نیز، در مقایسه با نمونه حاوی فقط لیکور و یا خمیرکاغذ افزایش یافته است. از دلایل افزایش سختی قیر پلیمری می‌توان به شبکه‌های سه‌بعدی ایجاد شده در طی فرایند پلیمریزاسیون اشاره کرد.

با کاهش درجه نفوذِ قیرِ اصلاح‌شده با میکرو الیاف سلولز، نقطه نرمی آن افزایش یافته است؛ بنابراین استفاده از الیاف سلولز می‌تواند خصوصیات قیر اصلاح‌شده را دمای بالا بهبود بخشد. با پراکنده شدن الیاف در قیر و جذب قیر توسط الیاف، به دلیل ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در قیر، نیروی اتصال قوی بین سطح الیاف و قیر به وجود می‌آید؛ بنابراین با حفظ این شبکه در دمای بالا، خصوصیات قیر حاوی الیاف نیز، در دمای بالا بهبود می‌یابد (Pamplona et al., 2012; M.-M. M. Wu et al., 2015).

یکی از کاربردهای نقطه نرمی در تعیین نشانه نفوذپذیری قیر (PI) است. حساسیت دمایی قیر به علامت و بزرگی شاخص نفوذ بستگی دارد که برای قیرهای مورداستفاده در راه‌سازی مقدار مناسب شاخص نفوذ در محدوده ۲ تا ۲- قرار دارد. افزایش شاخص نفوذ بیانگر بهبود حساسیت دمایی قیر است، در تمامی مقادیر افزودنی‌ها، مقدار شاخص نفوذ نسبت به قیر پایه افزایش‌یافته است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است شاخص نفوذِ قیرهای اصلاح شده، حدود ۹۰ تا ۸۰۰ درصد نسبت به قیر پایه افزایش یافته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح شده و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف دمایی بهبود یافته است.

آزمایش ویسکوزیته دورانی

برای ارزیابی کارایی و تعیین دمای مناسب اختلاط و تراکم قیر، از آزمایش ویسکوزیته دورانی مطابق با استاندارد AASHTO T316-04 استفاده شد. تعیین ویسکوزیته قیر به دلیل نقش آن در پمپاژ و جابه‌جایی قیر و همچنین در تعیین دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این آزمایش در چهار دمای ۱۰۰، ۱۳۵، ۱٦۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت تا تأثیر هرکدام از افزودنی‌ها بر ویسکوزیته قیر در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ٦ نشان داده شده است مطابق با انتظار، ویسکوزیته تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش یافته است. دراین‌بین، افزودنی‌های پلیمری تأثیر بیشتری بر افزایش ویسکوزیته قیر داشته‌اند. افزایش ویسکوزیته با درصد افزودنی رابطه مستقیم داشته و با افزایش درصد افزودنی، ویسکوزیته قیر به میزان بیشتری افزایش یافته است. از میان افزودنی‌های مورد بررسی، ۵ درصد پلیمر SBS (نمونه شماره ۵) با افزایش ۲٤۱ درصدی ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به قیر پایه، بیشترین تأثیر را بر افزایش ویسکوزیته قیر داشته است. مطابق با استاندارد ASTM D6926-04 و باتوجه‌به مقدار ۱۷۰±۲۰ و ۳۰±۲۸۰ سانتی استوکس، برای دمای اختلاط و تراکم مناسب قیر، می‌توان نتیجه گرفت که دمای اختلاط و تراکم تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه افزایش یافته است.



شکل ٦. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

جدول ٥. دمای اختلاط و تراکم قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده

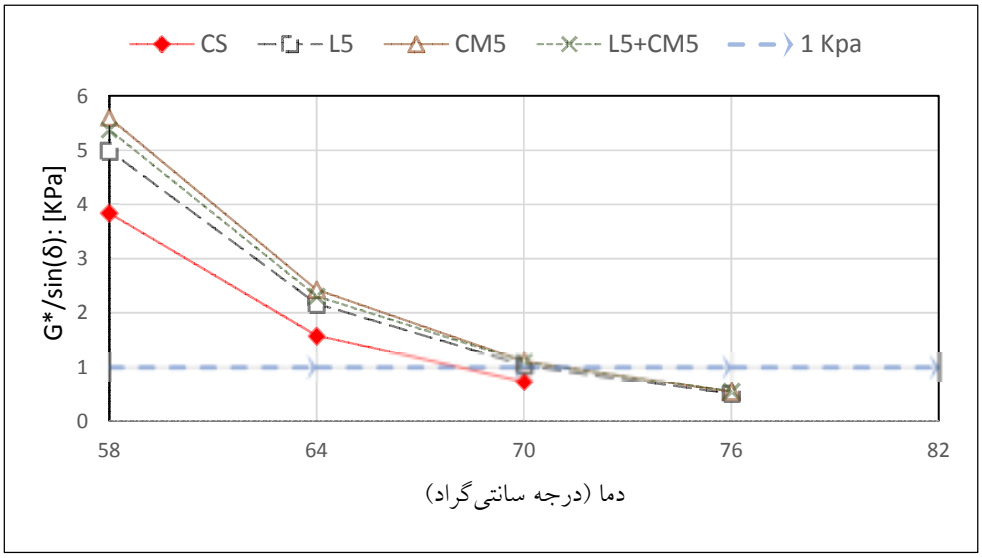
ترکیب	دمای اختلاط (°C)	تغییرات دمای اختلاط (°C)	دمای تراکم (°C)	تغییرات دمای تراکم (°C)
قیر پایه	۱۵۲–۱۵۷	–	۱۳۸–۱۴۵	–
قیر پایه + ۵ درصد لیکور	۱۵۵–۱۵۹	↑ +۳	۱۴۳–۱۴۹	↑ +۵
قیر پایه + ۵ درصد خمیرکاغذ	۱۵۶–۱۵۹	↑ +٤	۱۴۵–۱۵۰	↑ +۷
قیر پایه + ۵ درصد لیکور + ۵ درصد خمیرکاغذ	۱۵۷–۱۶۰	↑ +۵	۱۴۷–۱۵۲	↑ +۹
قیر پایه + ۳ درصد SBS	۱۷۸–۱۸۷	↑ +۲۶	۱۵۸–۱۶٤	↑ +۲۰
قیر پایه + ۵ درصد SBS	۱۸۶–۱۹۱	↑ +۳٤	۱۷۱–۱۷۹	↑ +۳۳
قیر پایه + ۳ درصد SBR	۱۶۶–۱۷۷	↑ +۱٤	۱۵٤–۱۵۸	↑ +۱۶
قیر پایه + ۵ درصد SBR	۱۸۱–۱۸۷	↑ +۲۹	۱۶٤–۱۷۳	↑ +۲۶

همان‌طور که گفته شد، یکی از مشکلات اساسی استفاده از قیرهای پلیمری، افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی ساخته شده با این نوع از قیرها است که می‌تواند علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی، موجب افزایش هزینه ساخت و اجرای مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده گردد؛ مطابق با جدول ۵، میزان افزایش دمای اختلاط و تراکم در نمونه‌های اصلاح‌شده با میکرو الیاف سلولز و لیکور بسیار کمتر از دمای اختلاط و تراکم در قیرهای پلیمری است. به‌طوری‌که دمای اختلاط قیرهای پلیمری ١٤ تا ٣٤ درجه سانتی‌گراد و دمای تراکم نیز ١٦ تا ٣٣ درجه سانتی‌گراد نسبت به قیر پایه افزایش داشته است. از دلایل افزایش ویسکوزیته قیرهای پلیمری می‌توان به پیرشدگی و جذب بیشتر مواد روغنی توسط پلیمر اشاره کرد.

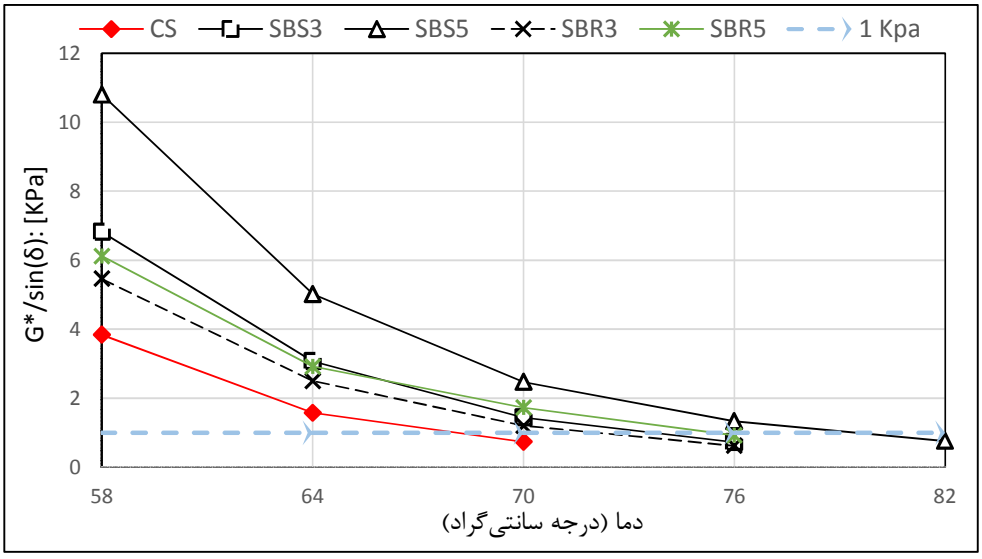
دمای عملکردی بالا

برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک قیر در محدوده دمای ۳ تا ۸۸ درجه سانتی‌گراد (دمای میانی و بالا) از دستگاه رئومتر برش دینامیکی مطابق با استاندارد AASHTO M-320 استفاده می‌شود. در این آزمایش، از دو پارامتر مدول کل تنش برشی (G*) و زاویه فاز (δ) که بر مبنای نیروی برشی اعمال شده توسط دستگاه تعیین می‌شوند برای توصیف هر دو رفتار ویسکوز و الاستیک قیر، استفاده می‌شود. دمای عملکردی بالا و میانی قیر، بر مبنای پارامتر شیار افتادگی G*/sinδ (به‌عنوان معیاری در برابر تغییر شکل و سفتی قیر) و مقایسه مقدار آن با حدود مشخص شده در استاندارد تعیین خواهد شد. برای دمای عملکردی بالا، مقدار این پارامتر نباید از ۱۰۰۰ پاسکال

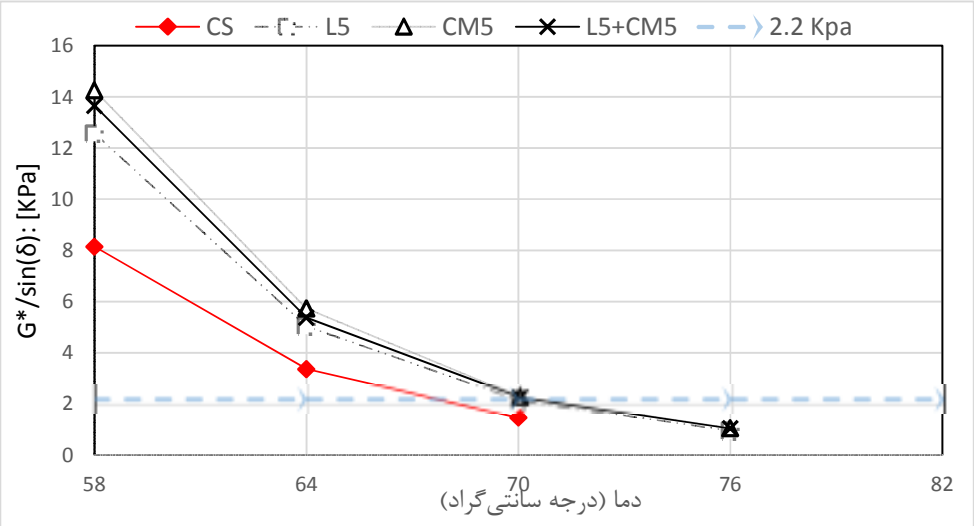
برای قیر پیر نشده و ۲۲۰۰ پاسکال برای قیر پیر شده در آزمایش لعاب نازک چرخشی کمتر باشد. لازم به ذکر است که انجام این آزمایش و نتایج قابل‌قبول آن، در گِرو رعایت محدودیت ابعاد ذرات قیر است؛ بنابراین قیر مورد بررسی نباید حاوی ذراتی با ابعاد بیشتر از ۲۵۰ میکرون (= 250 µm ¼ mm) باشد. مطابق با شکل‌های ۷ تا ۱۰، تمامی افزودنی‌های مورد بررسی در این تحقیق، باعث بهبود دمای عملکردی بالا شده‌اند. به‌غیراز نمونه حاوی ۵ درصد SBS، دمای عملکردی بالای نمونه‌های اصلاح شده یک رده افزایش یافته است. این افزایش برای نمونه حاوی ۵ درصد SBS دو رده عملکردی (از ٦٤ به ٧٦ درجه سانتی‌گراد) بوده است. افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای SBS و SBR می‌تواند به دلیل ایجاد شبکه الاستومری توسط بلوک‌های پلی‌استایرن از طریق زنجیرهای انعطاف‌پذیر (بلوک‌های بوتادین) باشد (Pamplona et al., 2012). مقاومت در برابر شیارافتادگی در نمونه ترکیبی حاوی لیکور و الیاف نیز، افزایش یافته است. استفاده از الیاف در نمونه ترکیبی توانسته است با افزایش مقدار پارامتر شیار افتادگی، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارافتادگی در دمای بالا را افزایش دهد.



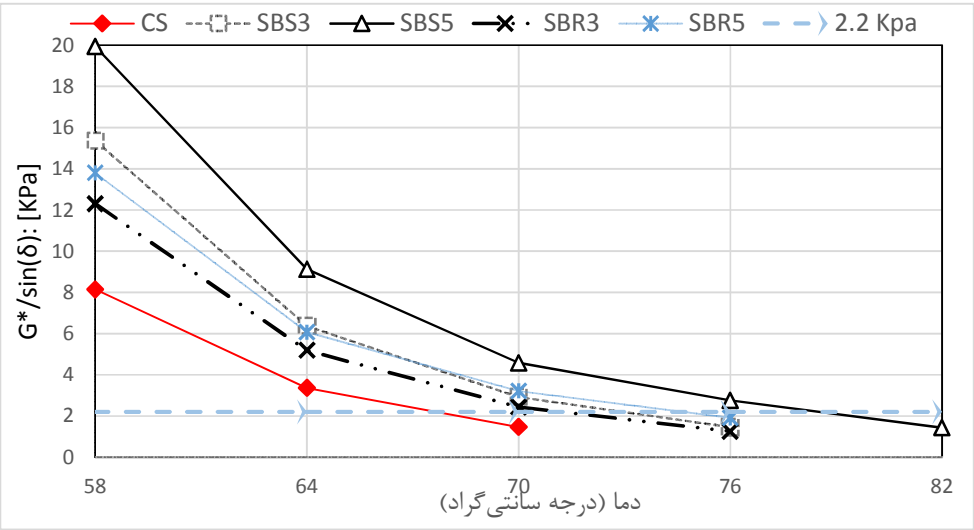
شکل ۷. پارامتر شیار افتادگی نمونه‌های اصلاح‌شده با لیکور و خمیرکاغذ در حالت پیر نشده



شکل ۸. پارامتر شیار افتادگی قیر اصلاح‌شده با درصدهای متفاوت SBS و SBR در حالت پیر نشده



شکل ۹. پارامتر شیار افتادگی نمونه‌های اصلاح‌شده با لیکور و خمیرکاغذ در حالت پیر شده کوتاه‌مدت

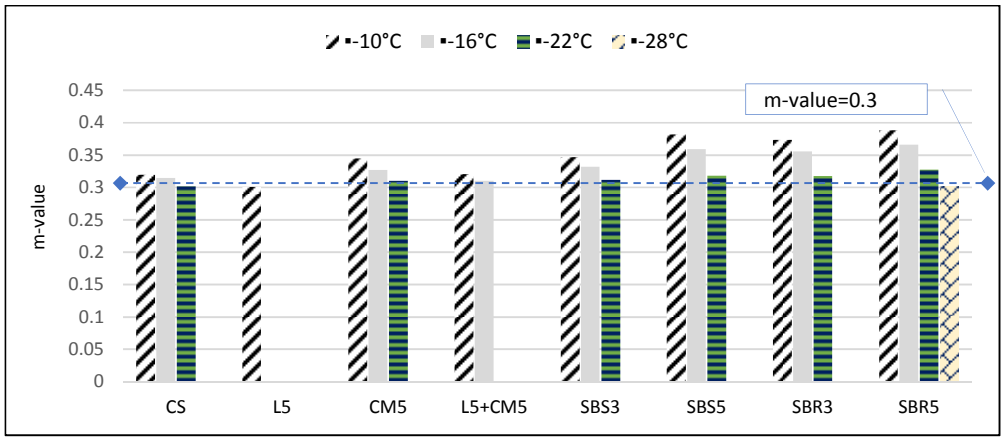


شکل ۱۰. پارامتر شیار افتادگی قیر اصلاح‌شده با درصدهای متفاوت SBS و SBR در حالت پیر شده کوتاه‌مدت

دمای عملکردی پایین

آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به‌منظور اندازه‌گیری مقدار افت‌وخیزها یا خزش قیر در زیر بار ثابت و دمای ثابت، بر روی قیر پیر شده تحت پیرشدگی کوتاه‌مدت و پیرشدگی بلندمدت انجام می‌گردد. در این آزمایش مقادیر دو پارامتر سختی خزشی و m-value (به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت قیر در مقابل بارگذاری خزشی و تغییرات سختی قیر در حین بارگذاری) در زمان‌های ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه اندازه‌گیری و گزارش می‌شوند. مطابق با استاندارد AASHTO T313، مقدار m-value در ۶۰ ثانیه، باید بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۳ و مقدار سختی خزشی نیز نباید در ۶۰ ثانیه از ۳۰۰ مگاپاسکال تجاوز نماید. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده مقدار سختی خزشی در تمامی نمونه‌ها کمتر از حد استاندارد ۳۰۰ مگاپاسکال بوده است؛ بنابراین در این تحقیق تنها به ارایه نتایج پارامتر m-value اکتفا شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، به‌غیراز لیکور که تأثیر منفی بر روی دمای عملکردی پایین داشته است، مقدار m-value در نمونه‌های اصلاح شده با سایر افزودنی‌ها افزایش یافته است.



شکل ۱۱. تغییرات مقدار پارامتر m-value برای هرکدام از ترکیب‌ها

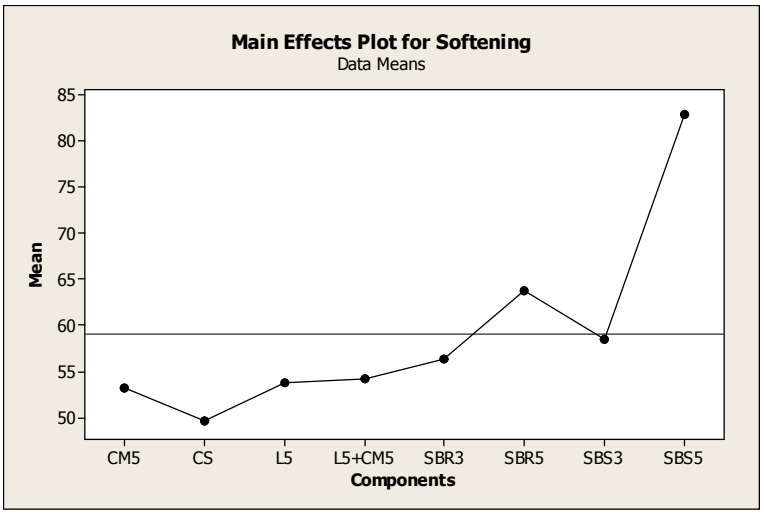
از میان نمونه‌های مورد بررسی، استفاده از ۵ درصد پلیمر SBR بیشترین تأثیر مثبت را بر روی دمای عملکردی پایین داشته است، به‌طوری‌که دمای عملکردی پایین این ترکیب نسبت به قیر پایه یک رده (از ۲۲- درجه سانتی‌گراد به ۲۸- درجه سانتی‌گراد) بهبود یافته است. استفاده از خمیرکاغذ در نمونه ترکیبی با لیکور توانسته است تأثیر منفی لیکور بر روی دمای عملکردی پایین را تا حدودی کاهش دهد. سختی خزشیِ نمونه‌های اصلاح‌شده با خمیرکاغذ، متناظر با نتایج به‌دست‌آمده برای درجه نفوذ و نقطه نرمی، افزایش یافته است؛ اما برخلاف انتظار، باوجودِ افزایش سختی قیر اصلاح شده با خمیرکاغذ، به دلیل افزایش پارامتر m-value، دمای عملکردی پایین قیرهای اصلاح شده با خمیرکاغذ بهبود یافته است.

بحث

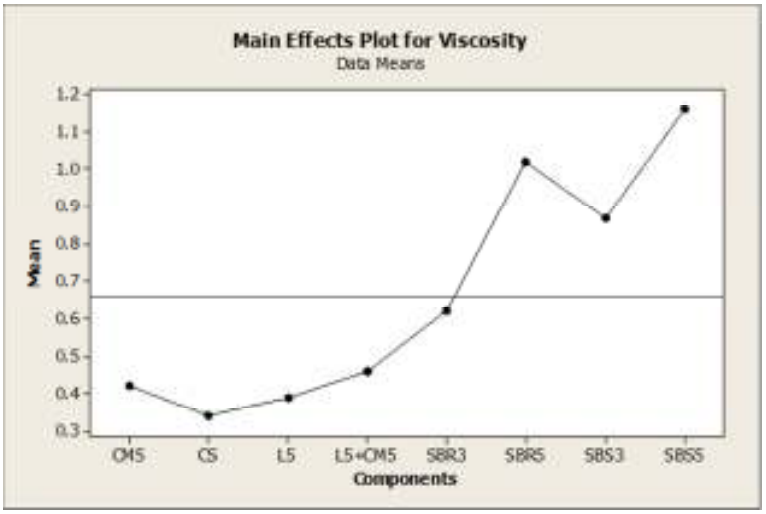
تمامی افزودنی‌های مورد بررسی در این تحقیق باعث افزایش سختی قیرهای اصلاح شده گردیده‌اند، نتایج آزمایش‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ (شکل ۱۲) نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه سختی در نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر در مقایسه با سایر افزودنی‌ها است. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است با افزایش سختی، ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده نیز افزایش یافته است. بااین‌حال مقدار افزایش ویسکوزیته در قیرهای اصلاح‌شده با لیکور و میکرو الیاف سلولزی بسیار کمتر از قیرهای پلیمری بوده است که موجب کاهش قابل توجه دمای اختلاط و تراکم قیرهای حاوی لیکور و میکرو الیاف سلولزی در مقایسه با قیرهای پلیمری شده است. نتایج تحقیقات پیشین نیز موید افزایش سختی قیرهای اصلاح‌شده با لیکور و الیاف سلولزی است (Li et al., 2021; Mohammed et al., 2018; M.-M. M. Wu et al., 2015)، به‌طوری که در تحقیق محمد و همکارانش استفاده از ۱ درصد الیاف سلولز موجب افزایش دمای نقطه نرمی قیر از ۵۲ به ۵۹ درجه سانتی‌گراد شده است. افزایش بیشتر دمای نقطه‌نرمی در تحقیق محمد و همکارانش می‌تواند به دلیل نوع الیاف سلولزی مورد استفاده و همچنین اندازه الیاف مصرفی (طول ۲۰ تا ۲۵۰۰ میکرومتر و عرض ۲۵ میکرومتر) باشد.

متناسب با افزایش سختی، دمای عملکردی بالای قیرهای اصلاح‌شده (شکل ۱۴) نیز افزایش یافته است. از دلایل بهبود دمای عملکردی قیرهای اصلاح‌شده با میکرو الیاف سلولزی می‌توان به نقش الیاف در انتقال و پراکنده کردن تنش و جلوگیری از تمرکز بیش از حد تنش اشاره کرد. همچنین با جذب قیر توسط الیاف، به دلیل ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در قیر، نیروی اتصال قوی بین سطح الیاف و قیر به وجود می‌آید؛ بنابراین با حفظ این شبکه در دمای بالا، خصوصیات قیر حاوی الیاف نیز، در دمای بالا بهبود یافته است.

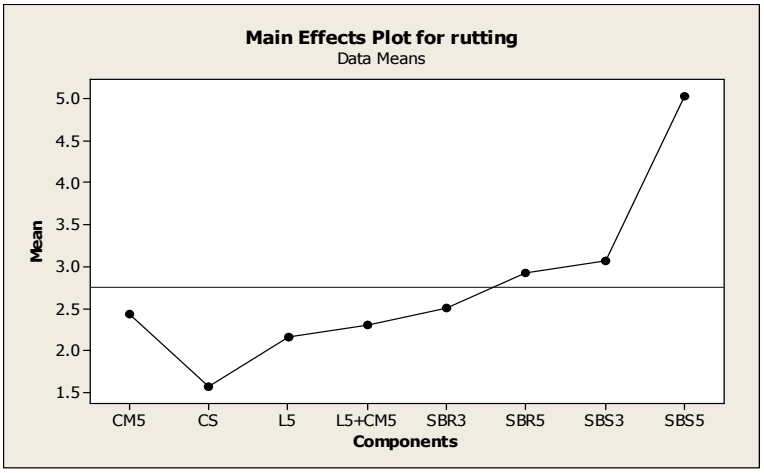
باتوجه‌به نتایج تحقیقات گذشته (Xu et al., 2017; Zarei et al., 2017) ، استفاده از لیگنین می‌تواند علاوه بر بهبود دمای عملکردی بالا، به مقاومت در برابر تشکیل گروه‌های عملکردی کربونیل در قیر اصلاح شده پس از پیری کوتاه‌مدت و بلندمدت کمک کند؛ بنابراین می‌توان از لیگنین به‌عنوان آنتی‌اکسیدان برای کاهش اثرات منفی پیرشدگی در قیر و مخلوط آسفالتی نیز، استفاده کرد.



شکل ۱۲. تغییرات نقطه نرمی برحسب نوع قیر اصلاح‌شده



شکل ۱۳. تغییرات ویسکوزیته برحسب نوع قیر اصلاح‌شده (دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد)



شکل ١٤. تغییرات پارامتر شیار افتادگی برحسب نوع قیر اصلاح‌شده (دمای ٦٤ درجه سانتی‌گراد)

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای پلیمری و قیرهای اصلاح شده با لیکور و میکرو الیاف سلولزی با انجام آزمایش‌های متداول قیر و همچنین آزمایش‌های شارپ شامل رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

دو افزودنی پلیمری استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر به دلیل افزایش ویسکوزیته قیر، موجب افزایش قابل‌توجه دمای اختلاط و تراکم قیر شده‌اند. برخلاف قیرهای پلیمری، میکرو الیاف سلولزی و لیکور تأثیر چندانی بر افزایش دمای اختلاط و تراکم قیر نداشته‌اند.

تمامی افزودنی‌های مورد بررسی در این تحقیق، به دلیل افزایش سختی و درنتیجه افزایش پارامتر شیار افتادگی در قیرهای اصلاح شده، موجب بهبود دمای عملکردی بالای قیر شده‌اند؛ بااین‌حال قیرهای پلیمری تأثیر بیشتری بر روی افزایش پارامتر شیار افتادگی داشته‌اند.

باتوجه‌به افزایش پارامتر m-value، تمامی قیرهای اصلاح شده به‌غیراز قیر حاوی لیکور عملکرد بهتری در دمای پایین داشته‌اند؛ بااین‌وجود تنها دمای عملکردی قیر حاوی ۵ درصد پلیمر SBR، به میزان یک رده بهبود یافته است.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، لیکور به دلیل افزایش سختی قیر، تأثیر منفی بر روی دمای عملکردی پایین قیر داشته است؛ بااین‌حال استفاده از خمیرکاغذ در افزودنی ترکیبی با لیکور توانسته است ضمن بهبود دمای عملکردی بالای قیر، اثر منفی لیکور، بر روی دمای عملکردی پایین قیر را نیز کاهش دهد.

مطابق با نتایج به‌دست آمده، استفاده از قیرهای اصلاح شده با ضایعات کارخانه‌های تولید کاغذ (لیکور و الیاف سلولزی) می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، به دلیل استفاده مجدد از مواد ضایعاتیِ ارزان‌قیمت، باعث کاهش هزینه‌های تمام شده ساخت و اجرای روسازی‌های آسفالتی شود. همچنین برخلاف قیرهای پلیمری، نمونه‌های حاوی میکرو الیاف سلولزی از پایداری ذخیره‌سازی برخوردار بوده و بنابراین نیازی به استفاده از سایر مواد افزودنی به جهت حل مشکل پایداری ذخیره‌سازی نمی‌باشد.

در این پژوهش، صرفاً تأثیر افزودنی‌های میکرو الیاف سلولزی، لیکور و همچنین پلیمرهای استایرن بوتادین استایرن و استایرن بوتادین رابر بر روی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر، مورد بررسی قرار گرفته است، لذا نتایج این مطالعه قابل تعمیم به مخلوط‌های آسفالتی نبوده و ضروری است تا تأثیر استفاده از افزودنی‌های ذکر شده در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گیرد.

۶- مراجع

-Andrés-Valeri, V. C., Rodriguez-Torres, J., Calzada-Perez, M. A., and Rodriguez Hernandez, J., (2018), "Exploratory study of porous asphalt mixtures with additions of reclaimed tetra pak material", Construction and Building Materials, 160, pp.233–239.

-Arafat, S., Kumar, N., Wasiuddin, N. M., Owhe, E. O., and Lynam, J. G., (2019), "Use of Sustainable Lignin to Enhance Asphalt Binder and Mix Properties".

-Bishara, S. W., Robertson, R. E., and Mohoney, D., (2005), "Lignin as an antioxidant: A Limited study on asphalts frequency used on Kansas roads", 42nd Annual Peterson Asphalt Research Conference, Cheyenne, WY.

-Bitumen, S., (1995), "The shell bitumen industrial handbook. Thomas Telford".

-Boerjan, W., and Ralph, J., (2003), "Baucher, M. Lignin Biosynthesis. Annu. Rev. Plant Biol, 54, pp.519–546.

-Chen, J.-S., Liao, M.-C., and Shiah, M.-S. (2002), "Asphalt modified by styrene-butadiene-styrene triblock copolymer: Morphology and model", Journal of Materials in Civil Engineering, 14(3), pp.224–229.

Chen, J. S., and Lin, K. Y., (2005), "Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers", Journal of Materials Science, 40(1), pp.87–95.

-Cleven, M. A., (2000), "Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures", (master's thesis), Michigan Technological University Houghton, MI.

-Gupta, A., Rodriguez-Hernandez, J., and Castro-Fresno, D., (2019), "Incorporation of additives and fibers in porous asphalt mixtures: A review, Materials, 12(19), 3156.

-Hanyu, A., Ueno, S., Kasahara, A., and Saito, K., (2005), "Effect of the morphology of SBS modified asphalt on mechanical properties of binder and mixture", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, pp.1153–1167.

-Hongu, T., and Philips, G., (1990), "New Fibers ellis hor wood series in polymercience and technology", Fibers and Polymers, 3, pp.1–7.

-Jenq, Y.-S., Liaw, C. J., and Lieu, P., (1993), "Analysis of crack resistance of asphalt concrete overlays a fracture mechanics approach", Transportation Research Record, 1388.

-Li, A., Danladi, A. A., Vallabh, R., Yakubu,

-Siriwardane, H., Gondle, R., and Kutuk, B. (2010), "Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids", Geotechnical and Geological Engineering, 28(3), pp.287–297.
-Sundstrom, D. W., Klei, H. E., and Daubenspeck, T. H., (1983), "Use of byproduct lignins as extenders in asphalt", Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 22(3), pp.496–500.
-Terrel, R. L., and Rimsritong, S., (1979), "Wood Lignins Used as Extenders for Asphalt in Bituminous Pavements (with Discussion)", Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, 48.
-Wang, H., and Derewecki, K., (2013), "Rheological properties of asphalt binder partially substituted with wood lignin", In Airfield and Highway Pavement 2013, Sustainable and Efficient Pavements, pp. 977–986.
-Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W., and Han, W., (2021), "Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements", Journal of Cleaner Production, 283, 124663.
-Wu, M.-M. M., Li, R., Zhang, Y.-Z. Z., Fan, L., Lv, Y.-C. C., and Wei, J.-M. M., (2015), "Stabilizing and reinforcing effects of different fibers on asphalt mortar performance", Petroleum Science, 12(1), pp.189–196. https://doi.org/10.1007/s12182-014-0011-8.
-Wu, S., Ye, Q., Li, N., and Yue, H., (2007), "Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 22(4), pp.733–736.
-Xu, G., Wang, H., and Zhu, H., (2017), Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. Construction and Building Materials, 151, pp.801–808.
-Zahedi, M., Zarei, A., Zarei, M., and Janmohammadi, O., (2020), "Experimental determination of the optimum percentage of asphalt mixtures reinforced with Lignin", SN Applied Sciences, 2(2), pp.1–13.
-Zarei, A., Seyed Alikhani, S. S., and Ahmadnia Falak Dehi, P., (2017), "Performance evaluation of modified bitumen using black Liquor obtained from waste paper industry", 6th International Conference on Sustainable Development & Urban Construction, in Persian.
M. K., Ishiaku, U., Theyson, T., and Seyam, A. F. M., (2021), "Cellulose Microfibril and Micronized Rubber Modified Asphalt Binder", Fibers, 9(4), pp.25.
-Lynam, J., Wasiuddin, N., Arafat, S., Kumar, N., and Owhe, E., (2018), "Evaluating Using Louisiana-Sourced Lignin as Partial Replacement in Asphalt Binder and as an Antioxidant (Issue 3)".
-Mahrez, A., and Karim, M. R., (2007), "Rutting characteristics of bituminous mixes reinforced with glass fiber", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies Vol. 6, (The 7th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2007), pp.282.
-Mahrez, A., Karim, M. R., and Katman, H. Y., (2003), "Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5.
-Mandlekar, N., Cayla, A., Rault, F., Giraud, S., Salaün, F., Malucelli, G., and Guan, J.-P. (2018), "An overview on the use of lignin and its derivatives in fire retardant polymer systems", Lignin-Trends Appl, 207, pp.231.
-McCready, N. S., and Williams, R. C., (2008), "Utilization of biofuel coproducts as performance enhancers in asphalt binder', Transportation Research Record, 2051(1), pp.8–14.
-Mohammed, M., Parry, T., and Grenfell, J. J. R. A., (2018), "Influence of fibres on rheological properties and toughness of bituminous binder", Construction and Building Materials, 163, pp.901–911.
-Pamplona, T. F., Amoni, B. de C., Alencar, A. E. V. de, Lima, A. P. D., Ricardo, N. M. P. S., Soares, J. B., and Soares, S. de A., (2012), "Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties", Journal of the Brazilian Chemical Society, 23(4), pp.639–647.
-Read, J., and Whiteoak, D., (2003), "The shell bitumen handbook, In 2003, "Thomas Telford. https://books.google.com.
-Shaopeng, W., Zheng, C., Qunshan, Y., and Weidong, L., (2006), "Effects of fibre additive on the high temperature property of asphalt binder", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 21(1), pp.118–120.
-Simpson, A. L., and Mahboub, K. C., (1994), "Case study of modified bituminous mixtures: Somerset, Kentucky, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair", pp.88–96.

Performance Evaluation of Bitumen Containing Cellulose Microfibers and SBS and SBR Polymers

Shahin Shabani, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Somayyeh Mohammadian Gezaz, Chemistry Engineering Department, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Hamed Saify, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.

E-mail: shabani@pnu.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT

A key issue to the development of using modified bitumen is the high price of additives, including fibers, which in turn, can increase the cost of bitumen and modified asphalt mixtures. In contrast to other research, in this study, cheap waste materials obtained from paper-making manufacture, including Liquor and cellulose microfibers (obtained from waste pulp mills) are used to improve the properties of modified bitumen while reducing the cost of producing modified bitumen. Further, bitumen modified by styrene-butadiene-styrene (SBS) and styrene-butadiene rubber (SBR) were examined in this study in order to compare with bitumen's modified by cellulose microfibers. For this purpose, SHRP tests, including dynamic shear rheometers and bending beam rheometers, were performed on polymer and fiber modified specimens. Based on the results of this study, all modified samples displayed a significant increase in bitumen hardness. Tests of classical bitumen and rotational viscosity demonstrated that polymers of butadiene-styrene-styrene and styrene-butadiene rubber significantly enhanced the viscosity and hardness of bitumen in comparison with other polymers. Consequently, the mix and compaction temperature of the modified samples with these additives have significantly increased. Results revealed that Liquor-containing bitumen improved its high-temperature performance, but it had a negative effect on the bitumen's low-temperature performance. Furthermore, cellulose microfibers had less effect on improving bitumen's properties than polymers such as styrene-butadiene-styrene and styrene-butadiene-rubber. However, cellulose microfibers' capabilities to modify the properties of bitumen, including a lower mixing and compaction temperature of asphalt mixtures than polymers and cheaper production and implementation of asphalt pavements due to the use of cheap waste materials, cannot be overlooked.

Keywords: Cellulose Microfibers, Liquor, Modified Polymer Bitumen, Sharp Tests, Temperature Performance