

تاثیر استفاده از الیاف سلولزی پوشش داده با ساسویت

بر رفتار رئولوژی قیر پودر لاستیکی

مقاله علمی - پژوهشی

بهروز شیرگیر*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
محمدرضا کریمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
محسن فلاح زواره، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shirgir@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۶۰-۱۴۷

چکیده

اصلاح کندروانی بالای قیر پودرلاستیکی با وکس‌های آسفالت گرم از جمله ساسویت متداول و استفاده از الیاف سلولزی به منظور استحکام کششی و قدرت جذب انرژی کرنشی بهتر نسبت به سایر افزودنی‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است. علاوه بر مزایای فوق، استفاده از الیاف سبب کاهش ترک و حفظ یکپارچگی خصوصاً در مخلوط‌های آسفالتی ماستیکی و متخلخل با تراکم متوسط می‌شود. از سوی دیگر پژوهش‌هایی انجام شده است که نشان می‌دهد در مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی باز و یا میان تهی عملکرد پودرلاستیک به مراتب بهتر از عملکرد الیاف در شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی بوده است. در این پژوهش از الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس فیشرترپس (ساسویت) در نسبت‌های ۳.۱ و ۵ درصد به عنوان افزودنی در قیر با ۱۵ درصد پودرلاستیک استفاده شد. قیر اصلاح شده به دلیل بهبود قدرت جذب انرژی کرنشی و ریزش قیر در مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی باز و با تراکم کم و همچنین با هدف بهبود شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های متراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از بررسی خواص رئولوژیکی، حاکی از آن است که افزودن الیاف مذکور به قیر پودرلاستیکی، علاوه بر کاهش کندروانی، سبب افزایش مقاومت آن در برابر شیارشدگی در هر دو نمونه‌ی پیر نشده و پیر شده کوتاه مدت، می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حد بالای دمای قیر خالص ۲۲-۶۴ پیر نشده، با حضور ۱۵ درصد پودرلاستیک و الیاف بهبود می‌یابد. افزودن ۵ درصد الیاف به قیر حاوی ۱۵ درصد پودرلاستیکی، کران بالای عملکرد قیر را تا ۹۴ درجه‌ی ساتی‌گراد افزایش می‌دهد. همچنین عملکرد قیر پودرلاستیکی پیر شده کوتاه مدت و پیر نشده، مشابه هم بوده اما پیر شدگی کوتاه مدت قیر، اثر الیاف را کاهش می‌دهد. اضافه کردن الیاف سبب افزایش مدول پیچیدگی در دمای میانی و عملکرد بهتر در بازگشت از سطح چند تنش در دمای شکست می‌شود. این عملکرد بهتر، سبب می‌شود که قیر پودرلاستیکی حاوی الیاف قادر باشد تا در بالاترین دمای عملکردی در برابر خرابی شیارشدگی عملکرد بهتری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: قیر پودر لاستیکی، الیاف سلولزی، ساسویت، رئولوژی، برگشت از سطح چند تنش

۱-مقدمه

پلیمرها کمک شایانی به رفتار ویسکو الاستیک قیر می‌کند، این مواد خاصیت کشسانی قیر را در دمای بالا حفظ می‌کنند. لازمه‌ی تغییرات یاد شده، پدید آمدن یک شبکه‌ی پلیمری در قیر است (طباطبایی، ۱۳۷۹). پودر لاستیک از خرد کردن تایرهای فرسوده تولید می‌شود. دانه‌بندی این ذرات معمولاً بین

پلیمر و قیر هر دو سر منشأ مشترکی به نام نفت دارند. از این رو پلیمرها مهم‌ترین خانواده اصلاح کننده قیر به‌شمار می‌آید. بسته به نوع پلیمر و مقدار مصرف آن پلیمرها، تاثیر مثبتی روی عملکرد قیر در دمای بالا (مقاومت در برابر شیار شدگی و ترک‌های گرمایی) دارند (یوسفی، ۱۳۸۷). استفاده از برخی

کارخانه‌ی آسفالت، بین ۱۸ الی ۲۲ درصد در کاهش مصرف سوخت و کاهش گاز دی‌اکسیدکربن صرفه‌جویی کرد. [https://sasobit.com/files/downloads/en/sasobit/Pro\(ductInformation_en.pdf\)](https://sasobit.com/files/downloads/en/sasobit/Pro(ductInformation_en.pdf)). در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۹ توسط لی و امیرخانیان و همکاران به این نتیجه رسیدند که افزودنی‌های وکس می‌تواند کندروانی قیر اصلاح شده با پودرلاستیک را کاهش دهند، آن‌ها در پژوهشی با مطالعه‌ی خواص دمای بالای قیر اصلاح شده با پودرلاستیک حاوی وکس ساسوبیت و قیر اصلاح شده با پودرلاستیک حاوی وکس آسفالتین به این نتیجه رسیدند که این وکس‌ها در درصد‌های مشخص باعث کاهش کندروانی قیر پودر لاستیک شده‌اند و همچنین باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی این قیر اصلاح شده شده‌اند. این پژوهش با استفاده از دستگاه برش دینامیکی توانسته است خواص رئولوژیکی قیر حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک خورد شده در شرایط محیطی را محاسبه کند (Akisetty, Lee, & Amirkhani, 2009). همچنین با توجه به پژوهش‌های انجام شده پیرامون الیاف سلولزی می‌توان ادعا کرد که استفاده از الیاف سلولزی سبب بهبود برخی از قابلیت‌های رئولوژیکی قیر می‌شود (Guo, Tataranni, Sangiorgi, & Materials, 2023). همچنین افزودن الیاف سلولزی توانسته پارامتر استحکام کششی و قدرت جذب انرژی کرنشی را بهبود داده و عملکرد بهتری در بازگشت از سطح چند داشته‌باشد (Eskandarsefat, Hofko, Rossi, Ye & Wu, 2009; Sangiorgi, 2019). پارامترهای گفته‌شده باعث کاهش ترک و حفظ یکپارچگی خصوصاً در مخلوط‌های آسفالتی ماستیکی و متخلخل با تراکم متوسط می‌شود (Kumar & Ravitheja, 2019). از سوی دیگر پژوهش‌هایی انجام شده است که نشان می‌دهد در مخلوط‌های با دانه بندی باز و مخلوط‌هایی با دانه بندی میان تهی الیاف عملکرد پودرلاستیک به مراتب بهتر از عملکرد الیاف سلولزی در شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی بوده است (Eskandarsefat et al., 2019) و بطور کلی می‌توان گفت الیاف به عنوان یک افزودنی می‌تواند به اصلاح خواص مکانیکی (به خصوص خرابی شیارشدگی) کمک نماید (Haryati et al., 2019; Wu, Haji, Adkins, & Design, 2023). پس با توجه به فرضیه‌ها می‌توان چنین استنباط کرد که استفاده‌ی همزمان از الیاف و وکس و پودرلاستیک در قیر به منظور بهبود قدرت جذب انرژی کرنشی

الک ۴ الی ۱۴۰ می‌باشد که بسته به نوع استفاده، کاربرد متفاوت دارد. در ایران آمار دقیقی از مقدار لاستیک‌های فرسوده وجود ندارد اما بنا به برخی گزارش‌ها حدود ۱۵۰ هزار تن تیر فرسوده وجود دارد، امکان دفع این زباله‌ها در محیط زیست وجود ندارد زیرا تیر با سرعت بسیار کمی تجزیه می‌شود و آلودگی‌های بسیار زیادی تولید می‌کند. بنابراین استفاده بهینه از این ضایعات به یک ضرورت تبدیل شده است (ایران، ۱۳۹۶). برهم‌کنش داخلی بین ذرات لاستیک و قیر از نوع فیزیکی می‌باشد، ذرات پودر لاستیک در حین نفوذ، بخشی از آروماتیک‌ها (روغن‌های موجود در قیر) را در خود جذب می‌کنند. این جذب سبب تورم پودر لاستیک و افزایش کندروانی می‌شود. هرچه زمان و دمای اختلاط بیش‌تر باشد، مقدار این جذب توسط پودر لاستیک بیش‌تر خواهد بود. (Nejad, Aghajani, Modarres, & Firoozifar, 2012). برای حل مشکل کندروانی بالا، مقدار حرارتی که باید به قیر داده‌شود تا جاری شود به شدت بالا می‌رود. از آن‌جا که عموم سوخت‌های استفاده شده در کارخانه‌های آسفالت از نوع سوخت فسیلی (مانند گازوئیل) هستند، سوختن این گازها سبب افزایش آلودگی هوا می‌شوند (Zarei, Rahmani, Zahedi, & Nasrollahi, 2020). افزایش آلاینده‌های هوا در کشورهایی که از آلودگی هوا رنج می‌برند، باعث عدم رغبت به استفاده از این اصلاح‌کننده می‌شود (Rodríguez-Alloza, Gallego, & Pérez, 2013). از طرف دیگر دمای بالای قیر هنگام اختلاط به دلیل تبخیر رزین‌های سبک موجود در قیر، سبب پیر شدن قیر هنگام تولید می‌شود، این امر سبب شده می‌شود تا از کیفیت قیر تولیدی کم و قیر موجود مستهلک شده و از توان چسبندگی قیر کم شود. این پیرشدگی گاهی می‌تواند تا بیش از ۵۰ درصد پیرشدگی قیر را در مدت سرویس‌دهی شامل شود چالش استفاده از قیر پودرلاستیکی، کندروانی بالای این قیر اصلاح شده است. پژوهش‌هایی به منظور حل این مسئله، به پیشنهادهایی برای استفاده از وکس‌های آسفالت گرم منتهی شده است (Rodríguez-Alloza et al., 2013). یکی از مهم‌ترین وکس‌های استفاده شده در آسفالت گرم ساسوبیت نام دارد، در مطالعات انجام شده، ادعا می‌شود که استفاده ساسوبیت در قیر با کم کردن دمای اختلاط از ۱۶۰ درجه به دماهای ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه به ترتیب در حدود بیش از ۸۷٪ و بیش از ۷۵٪ در کاهش اکسیداسون قیر موثر است. این تحقیقات نشان داد که با کم کردن حدود ۳۰ درجه از دمای

این مبحث با ارجاع به درصد بهینه‌ی آزمایش شده در مطالعات انجام‌شده، مقدار ۱۵ درصد وزنی قیر برای اختلاط با پودر لاستیک انتخاب شده است (Rodríguez-Alloza et al., 2013). در مورد اندازه‌ی الیاف فرض بر این است که از سطح پوشش‌شده الیاف با وکس صرف نظر شده است، در نتیجه این فرض الیاف و وکس بصورت یک واحد به هم پیوسته دانه‌بندی می‌شوند. قیر استفاده شده در این پژوهش قیر PG ۶۴-۲۲ تهیه شده از شرکت نفت حصار مهران استفاده شده است. شیوه‌ی اختلاط استفاده شده در این پژوهش اختلاط همزمان پودر لاستیک و الیاف با قیر است. با توجه به محدودیت زمانی، اختلاط بین نمونه‌ی دارای پودرلاستیک و الیاف باید در زمان یکسان انجام پذیرد تا کندروانی نمونه‌ها تحت اثر دمای ۱۶۰ درجه‌ی اختلاط بالا نرود. شیوه‌ی مذکور شامل مراحل زیر است: بر اساس پژوهش رودریگز و همکاران مقدار ۱۵ درصد وزن قیر، پودرلاستیک برای این پژوهش انتخاب شده است. پودر لاستیک استفاده شده در این پژوهش، تحت عنوان پودر لاستیک خرد شده در شرایط سرد با منشأ لاستیک‌های ماشین‌آلات سنگین با اندازه الک ۲۴ (اندازه ذرات کم‌تر از ۰/۷ میلی‌متر) بوده و از شرکت مهرفانه ایرانیان با خلوص حدود ۹۵ درصد (عاری از سیم و الیاف) تهیه شده است.

در شکل ۱ مشخصات دانه‌بندی پودر لاستیک با توجه به پژوهش رودریگز و همکاران (Rodríguez-Alloza et al., 2013) آمده است. الیاف سلولزی موجود الیاف پوشش داده شده با نسبت ۲۵ درصد وزنی وکس فیشر تراپس (ساسوبیت) و ۷۵ درصد الیاف سلولزی آربوسیل می‌باشد.

[https://www.jrs.eu/jrs_wAssets/docs/strassenbau/p\(roduktflyer/en/viatop_c25_gb_181025.pdf](https://www.jrs.eu/jrs_wAssets/docs/strassenbau/p(roduktflyer/en/viatop_c25_gb_181025.pdf)

با توجه به توضیحات شرکت سازنده این محصول قابلیت کندروانی قیر را کاهش می‌بخشد، این محصول برای اصلاح زمان و دمای اختلاط آسفالت ماستیک تولید شده است. در شکل ۲ نمودار دانه‌بندی الیاف سلولزی پوشش داده شده طبق پژوهش منیرالزمان و همکاران (Maniruzzaman et al., 2015) آورده شده است. در فرآیند اختلاط ابتدا ۵۰۰ گرم قیر را تا دمای ۱۶۵ درجه گرم کرده و با سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه اختلاط انجام می‌گیرد. سپس هر ۵ دقیقه یک گرم الیاف و سه گرم پودر لاستیک اضافه کرده و پس از دو مرحله اضافه کردن (سپری شدن ۱۰ دقیقه) سرعت چرخش

و ریزش قیر در مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی باز و کم تراکم و یا به جهت بهبود شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های متراکم مورد استفاده قرارگیرد (Eskandarsefat et al., 2019). با توجه به پژوهش‌های انجام شده، پژوهش حاضر به منظور بهبود خواص قیر برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده و برای این منظور قیر پودرلاستیکی با الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس اصلاح و آزمایش‌های رئولوژیکی را بر روی قیر اصلاح شده، انجام شد. از این رو هدف اصلی این پژوهش عبارت است از:

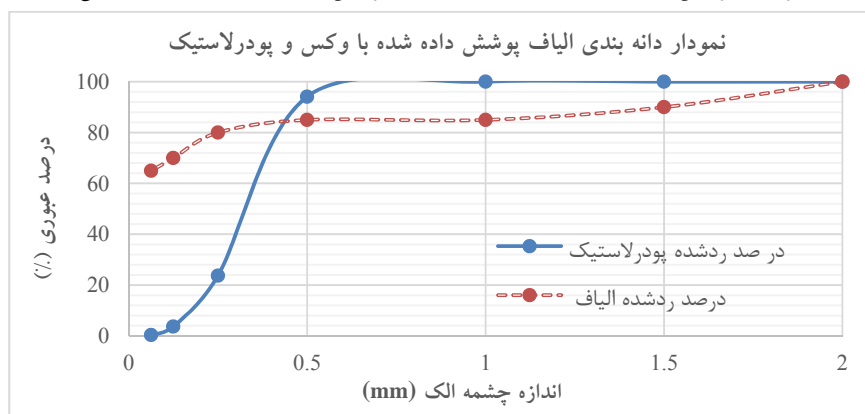
افزایش دمای بالای عملکردی قیر پودر لاستیکی اصلاح شده با الیاف و در نتیجه افزایش شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی و نیز افزایش برگشت‌پذیری از چند سطح تنش به دلیل وجود الیاف سلولزی.

۲- آزمایش‌ها و روند انجام پژوهش

پژوهش حاضر با استفاده از الیاف پوشش داده شده با نسبت ۷۵ درصد سلولز آربوسیل و ۲۵ درصد وکس فیشر تراپس (ساسوبیت) در نسبت‌های ۳، ۱ و ۵ درصد (وزن قیر خالص) در قیر پودرلاستیکی، با بررسی خواص رئولوژیکی قیر پودرلاستیکی اصلاح شده با این الیاف انتظار دارد که استفاده از وکس‌های آسفالت گرم در قیر اصلاح شده با پودرلاستیک باعث کاهش کندروانی شده (Rodríguez-Alloza et al., 2013) و از طرف دیگر استفاده از الیاف سلولزی سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و همچنین برگشت بهتر از چند سطح تنش می‌شود (Eskandarsefat et al., 2019; Maniruzzaman, Hamadb, Malekac, & Elserganyd, 2015). لذا چنانچه از پودرلاستیک، الیاف و وکس استفاده شود، می‌توان انتظار داشت، همزمان کندروانی بالای قیر حاوی پودرلاستیک در دمای بالا کم و برگشت‌پذیری از چند سطح تنش توسط الیاف بهبود یابد. از این رو می‌توان گفت نوآوری در این پژوهش مربوط به اصلاح خاصیت کندروانی قیر حاوی پودرلاستیک با استفاده از وکس و بهبود خواص رئولوژیکی با استفاده از الیاف است. این رویکرد در بهبود خواص قیر لاستیکی تاکنون در پژوهش‌ها مشاهده نشده است. مهم‌ترین محدودیت در مباحث مربوط به پودر لاستیک، گستره‌ی نوع پودر لاستیک و درصد بهینه‌ی استفاده از آن است. از این جهت این پژوهش با بررسی پژوهش‌های انجام شده در

رسیده و باقی‌مانده الیاف و پودرلاستیک (جهت رسیدن به نسبت‌های مورد نظر) در مدت زمان ۳۰ دقیقه و با سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور در دقیقه اضافه می‌شود.

به ۹۰۰ دور (شکل ۲) در دقیقه افزایش می‌یابد. با سپری شدن ۲۵ دقیقه از ابتدای اختلاط معادل اضافه کردن ۵ گرم الیاف و ۱۵ گرم پودرلاستیک، سرعت چرخش به ۱۵۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱. نمودار دانه بندی الیاف و پودرلاستیک



شکل ۲. تصویر الیاف پودر شده آماده برای اضافه شدن به قیر پودرلاستیکی در ۹۰۰ دور دقیقه

در جهت سهولت نوشتن نام نمونه‌ها در نمودارها از نام‌های اختصاری مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. اسامی اختصاری استفاده شده در این پژوهش

اسم اختصاری	نمونه
BINDER(VIRGIN)	قیر خالص (PG64-22)
CRM15%	قیر + ۱۵٪ پودرلاستیک
CRM15%+1%FIBER	قیر + ۱۵٪ پودرلاستیک + ۱٪ الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس
CRM15%+3%FIBER	قیر + ۱۵٪ پودرلاستیک + ۳٪ الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس
CRM15%+5%FIBER	قیر + ۱۵٪ پودرلاستیک + ۵٪ الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس

۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

جاروب قیر پیرشده کوتاه مدت و قیر پیرنشده، فرکانس جاروب در دمای ثابت ۶۴ درجه سانتی‌گراد، دمای میانی جاروب برای ترافیک‌های سنگین و برگشت از سطح چند تنش در بالاترین دمای عملکردی می‌باشد.

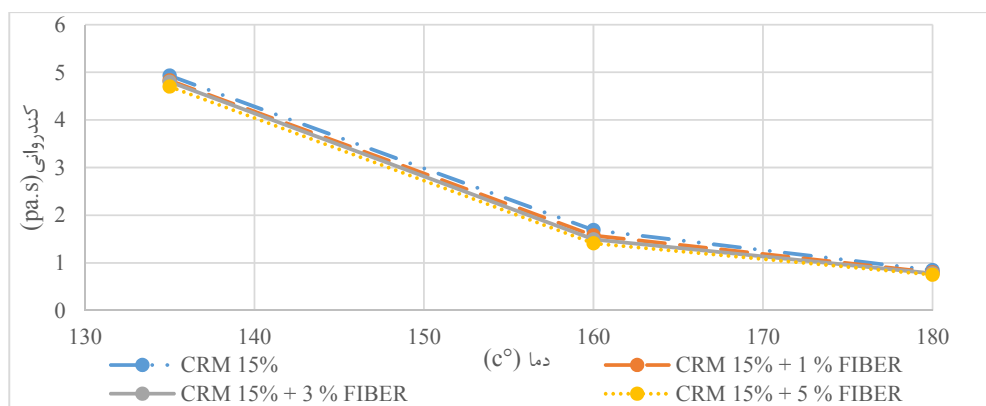
این بخش ابتدا به بررسی تاثیر الیاف پوشش داده شده با وکس در کندروانی قیر پودر لاستیکی با دستگاه ویسکومتر چرخشی و تاثیر آن بر دمای اختلاط قیر اصلاح شده پرداخته‌است. سپس به بررسی آزمایش‌های رئولوژیکی قیر با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (شکل ۳) پرداخته است، آزمایش‌های انجام شده با این دستگاه شامل دمای



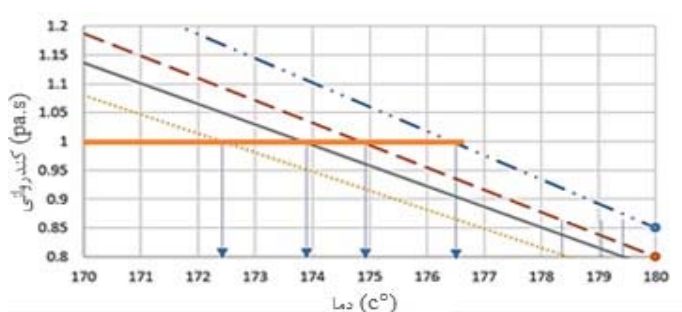
شکل ۳. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

برای تعیین کاهش دمای اختلاط، یک خط به موازات محور دما در کندروانی ۱ پاسکال ثانیه (خط نارنجی رنگ در شکل ۵) رسم شده است، لذا در کندروانی مرجع (۱ پاسکال ثانیه)، افزودن الیاف تا ۵ درصد کاهش ۴ درجه‌ای دمای اختلاط را به همراه داشته است.

پس از اختلاط با استفاده از دستگاه ویسکومتر چرخشی در ۳ دما و ۱۶۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کندروانی را برای قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک در درصد الیاف مشخص شده محاسبه می‌شود (شکل ۴). مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف به پودر لاستیک کندروانی کاهش یافته‌است.



شکل ۴. منحنی کندروانی قیرهای پودر لاستیکی اصلاح شده با الیاف در ۳ دما

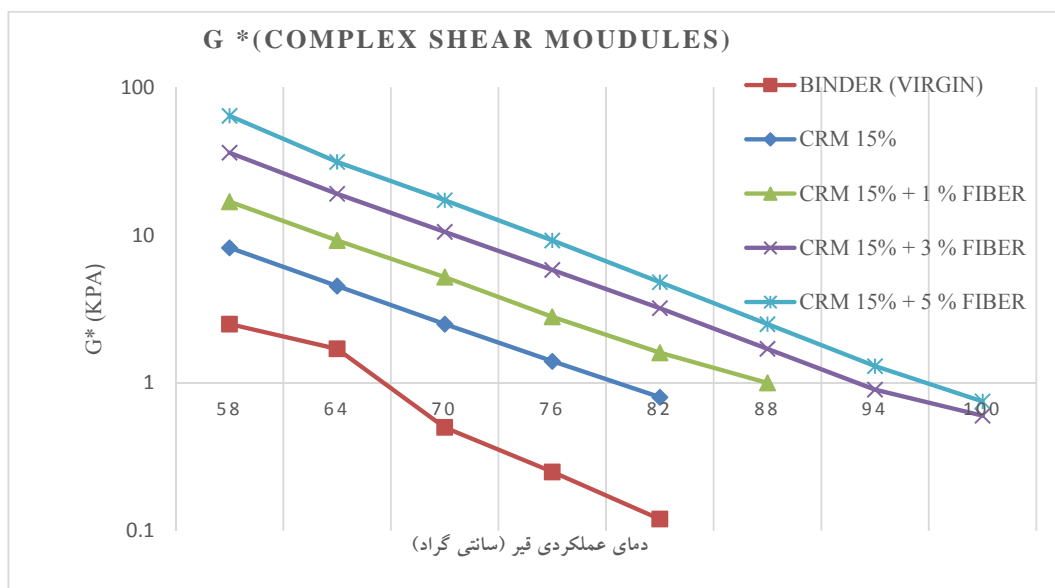


شکل ۵. منحنی کندروانی جهت تعیین کم شدن دمای اختلاط قیر اصلاح شده با درصد های مختلف الیاف

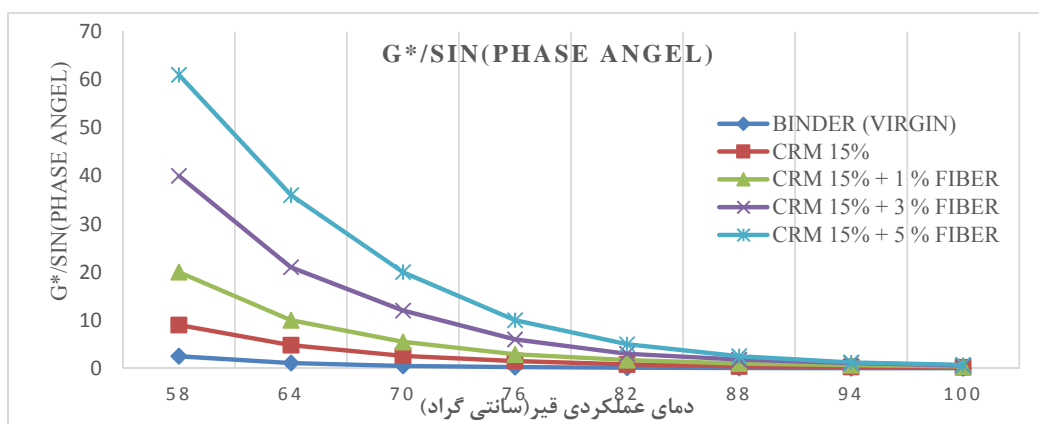
و کندروانی در حال کاهش است و بدیهی است که با افزایش دما از مقدار مقاومت آن در برابر بار برشی سینوسی وارد شده بر نمونه کاسته می‌شود و مقدار G^* با افزایش الیاف بدلیل افزایش سختی افزوده می‌شود (شکل ۶).

شاخص $G^*/\sin \delta$ شاخصی است جهت بررسی مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی استاندارد ASTM-T315 و ASTM-D7175 مقدار حداقلی ۱ کیلو پاسکال را جهت قبولی در آزمون دمای عملکردی قیر پیر نشده پیشنهاد می‌کند. طبق نمودارهای زیر (شکل ۷) مقدار این شاخص با افزایش الیاف، مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش و با افزایش دما به دلیل کاهش مدول پیچیدگی کاهش می‌یابد.

مطابق ASTM-T315 و ASTM-D7175، رئومتر برشی دینامیکی، خواص رئولوژیکی و تغییر شکل پذیری قیر (زاویه فاز و مدول برشی مرکب G^*) را در دماهای متوسط تا زیاد اندازه‌گیری می‌کند. این دو پارامتر در تعیین رفتار الاستیک و ویسکوز قیرها کاربرد دارند (Code-234, 2011). یکی از انواع آزمایش‌هایی که رئومتر برش دینامیکی می‌تواند انجام دهد، مقدار دامنه‌ی خطی جاروب است. این آزمایش به منظور طبقه‌بندی قیر عملکردی طبق ASTM-T315 با اعمال بار ۱/۵۹ هرتز (معادل تنش برشی خودرویی با سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت) به نمونه قیر انجام می‌شود. این بار سینوسی وارده سعی در محاسبه‌ی مقدار مقاومت قیر در برابر شیارشدگی دارد. طبق نمودار شاخص G^* با افزایش دما به دلیل کاهش سختی



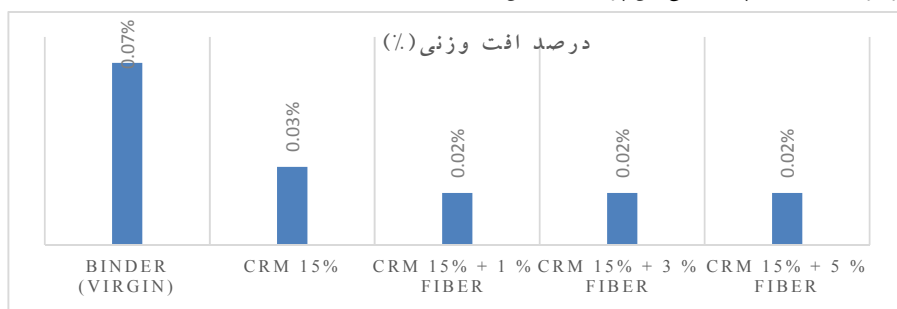
شکل ۶. مقدار مدول پیچیدگی در دماهای مختلف



شکل ۷. مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی قیر پیر نشده

گرد (Read, Whiteoak, & Hunter, 2003). نمونه‌های قیر پس از یک دوره فرآیند لعاب نازک چرخشی مجدداً تحت آزمایش دمای جاروب در فرکانس ثابت استاندارد گفته شده قرار گرفتند. طبق شکل ۸ افت وزنی قیر با افزایش مقدار افزودنی به قیر (الیاف یا پودر لاستیک) کاهش پیدا کرده است.

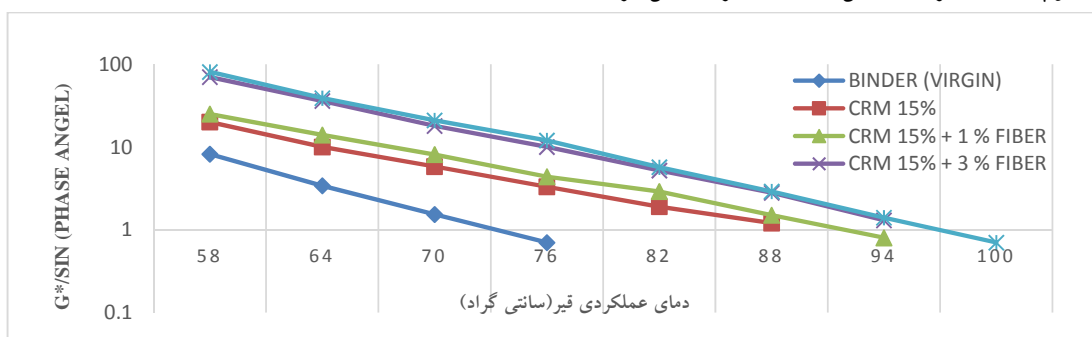
مطابق با ASTM-T315 و ASTM-D7175 آزمایش لعاب نازک چرخشی جهت اندازه‌گیری اثر گرما و هوا روی لایه نازک متحرک قیر ارائه شده است و دو هدف اصلی را شامل می‌شود، اول اینکه قیر پیر شده‌ای فراهم آورد که برای آزمایش‌ها مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده قرار گیرد. دوم اینکه مقدار افت وزنی در اثر فرار قسمت ناپایدار طی این پروسه تعیین



شکل ۸. درصد افت وزنی بعد از آزمایش لعاب نازک چرخشی

است. طبق شکل ۹ مقدار این شاخص با افزایش الیاف افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد.

استاندارد ASTM-T315 و ASTM-D7175 برای تعیین دمای بالای عملکردی قیر پیر شده‌ی کوتاه مدت مقدار حداقلی ۲/۲ کیلو پاسکال را برای شاخص $G^*/\sin \delta$ برای تعیین کرده



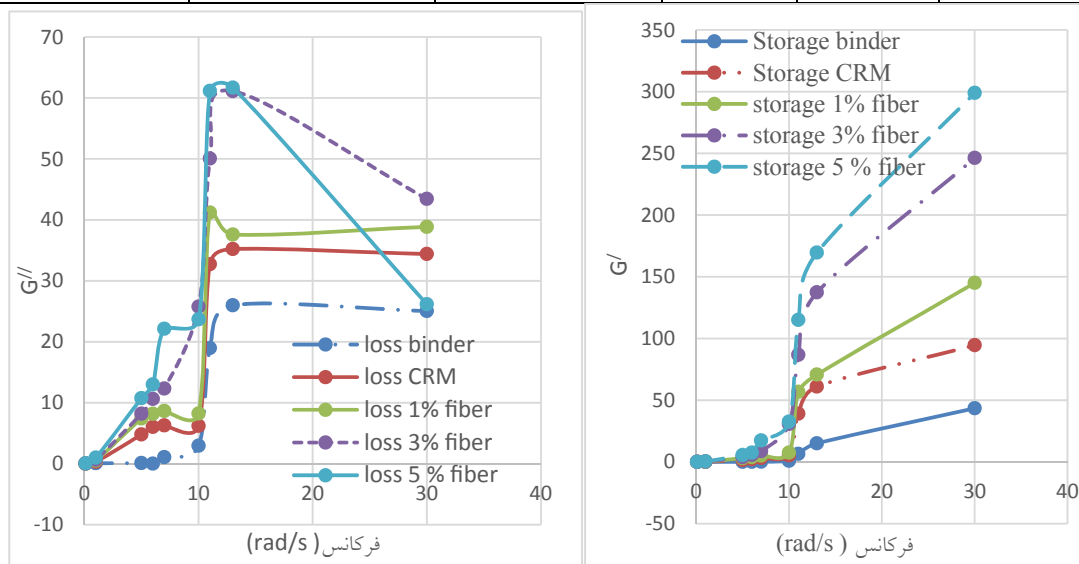
شکل ۹. مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی قیر پیر شده

در جدول ۲ می‌توان بالاترین دمایی که قیر پیر شده و پیر نشده که در آن آزمون شارپ را تایید می‌کند، مقایسه کرد. در مطالعه ای توسط اسکندر صفت و همکاران اشاره شده است که الیاف در قیر تشکیل شبکه سه بعدی می‌دهند که این شبکه تا بالاترین دمایی قابل تحمل در الیاف پایدار می‌ماند (Eskandarsefat et al., 2019). در نتیجه وقتی الیاف در معرض دمایی نزدیک به دمایی ذوب خود در آزمون لعاب نازک قرار می‌گیرند دچار از هم گسیختگی شبکه سه بعدی می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف عملکردی که بین نمونه‌های حاوی ۳ درصد الیاف و ۵ درصد الیاف در نمونه‌ی پیر نشده بود، در نمونه‌ی پیر شده‌ی کوتاه مدت به شدت کم شده است. همان‌گونه که اشاره شد مقدار ۱/۵۹ هرتر تنش برشی معادل خودروبی با سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت است، حال اگر بخواهیم شاخص‌های اختلاف فاز (زاویه فاز) و مدول برشی مرکب G^* را برای خودروهایی با سرعت غیر از ۹۰

کیلومتر بر ساعت اعمال کنیم می‌توان در دمایی ثابت، تنش برشی اعمالی را بصورت متغیر یا اصطلاحاً Multi Wave اعمال نمود. نمودار فرکانس جاروب (شکل ۱۰) مقدار تغییر G^* و زاویه‌ی فاز را برای فرکانس‌های مختلف در دمایی ۶۴ درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌کند. علت استفاده از دمایی ۶۴ درجه آن است که در این دما با توجه به نتایج آزمون تعیین درجه عملکردی (در بخش قبل تشریح شد) در این دما قیرهای اصلاح شده در محدوده‌ی ویسکوالاستیک قرار دارند، از طرفی این نمودار انرژی ذخیره شده نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس مقدار انرژی ذخیره شده نیز بیشتر می‌شود. در حالی که انرژی تلف شده نمونه دارای الیاف پوشش داده شده با ساسوبیت در فرکانس بالا دارای افت شدید می‌باشد. این افت شدید را می‌توان به دلایلی مانند شکننده شدن نمونه بر اثر استفاده زیاد از ساسوبیت و عدم همجوشی ساسوبیت با قیر، پودرلاستیک و الیاف مرتبط دانست.

جدول ۲. مقایسه‌ی دمایی بالای قیر پیر شده کوتاه مدت و قیر پیر نشده

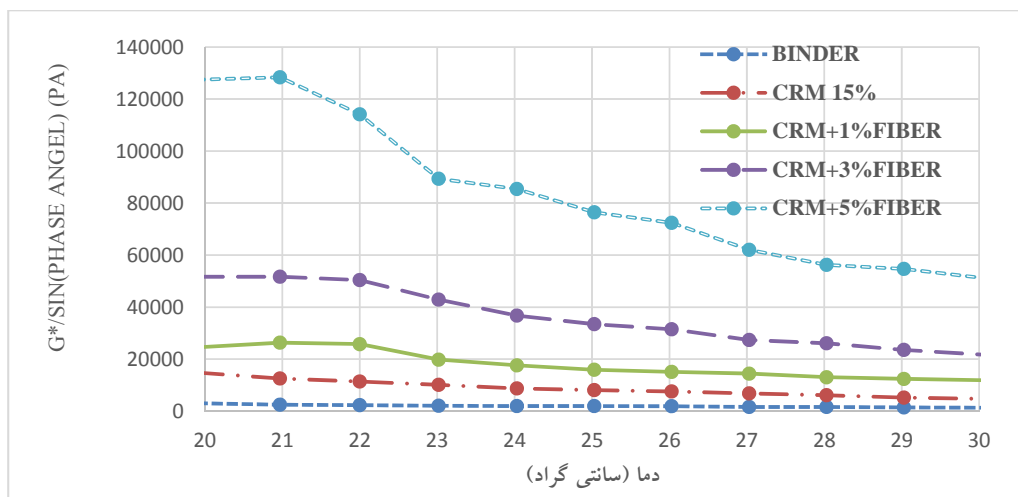
نام قیر	خالص (بایندر)	۱۵ درصد پودرلاستیک	۱۵ درصد پودرلاستیک + ۱ درصد الیاف پوشش داده شده با وکس	۱۵ درصد پودرلاستیک + ۳ درصد الیاف پوشش داده شده با وکس	۱۵ درصد پودرلاستیک + ۵ درصد الیاف پوشش داده شده با وکس
درجه عملکردی قیر پیر نشده	۶۴	۷۶	۸۸	۹۴	۹۴
درجه عملکردی قیر پیر شده (کوتاه مدت)	۷۰	۷۶	۸۲	۸۸	۸۸



شکل ۱۰. مقدار انرژی ذخیره شده (G') و تلف شده (G'') در فرکانس‌های متغیر در دمایی ۶۴ درجه سانتی‌گراد

شیارشدهی در این دما به شدت بالا رفته است. از این رو می‌توان گفت برهم کنش الیاف، وکس و پودرلاستیک با قیر در دمای میانی به شدت بر مدول پیچیدگی و مقاومت در برابر شیارشدهی (در مقایسه با قیر بدون افزودنی) موثر است. (شکل ۱۱).

در نموداری دیگر این بار در یک فرکانس ثابت و ۰/۱ فرکانس اصلی آزمون شارپ (به طور تقریبی خودرویی با سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت) در بازه‌ی کل ۲۰ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد، به بررسی مقاومت در برابر شیارشدهی در دمای میانی و در شرایط سخت ترافیکی (ترافیک مرده) به این نتیجه رسیده است که با افزایش درصد الیاف مقاومت در برابر



شکل ۱۱. تحلیل شاخص مقاومت در برابر شیارشدهی دمای ۲۰ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد (دمای میانی)

۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی بالا با استفاده از دستگاه رنومتر برش دینامیکی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. درصد بازگشت کرنش و مدول غیر قابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد. مقدار کرنش اعمالی، درصد بازگشت کرنش، و مقدار مدول غیر قابل بازگشت برای هر ۱۰ سیکل در هر سطح تنش براساس رابطه‌های ارائه شده ۲، ۱ و ۳ محاسبه می‌شود.

در مطالعه‌ی دی آنجلو و همکاران روش MSCR را جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدهی پیشنهاد کردند. آن‌ها با استفاده از مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها با مقدار واقعی شیارشدهی نشان دادند که پارامتر پیشنهاد شده، Jnr نسبت به پارامتر $G^*/\sin \delta$ جهت مشخص نمودن مقاومت قیر به تغییرشکل دائمی بسیار مناسب‌تر است (J. A. D'Angelo, 2009). روند آزمایش بر این اساس است که قبل از انجام آزمایش نمونه قیر، با استفاده از دستگاه (RTFO) عملیات پیرشدهی کوتاه مدت بر روی قیر انجام می‌گیرد. پس از آن نمونه پیرشدهی کوتاه مدت قیر به قطر

$$\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (1)$$

$$PR = \left(\frac{\epsilon_{10} - \epsilon_0}{\epsilon_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$Jnr = Ave(\gamma_u / \tau) \quad (3)$$

در نمونه بعد از بارگذاری و باربرداری به تنش اعمالی است که مقدار مقاومت نمونه را در برابر تغییرشکل دائمی نشان می‌دهد. پارامتر γ_{nr} مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری است. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را دارد. حساسیت قیرها نسبت به تنش‌های اعمالی با استفاده از پارامتر $J_{nr-diff}$ به دست می‌آید که از رابطه شماره ۴ محاسبه می‌شود (J. D'Angelo, Klutzz, Dongre, Stephens, & Zanzotto, 2007).

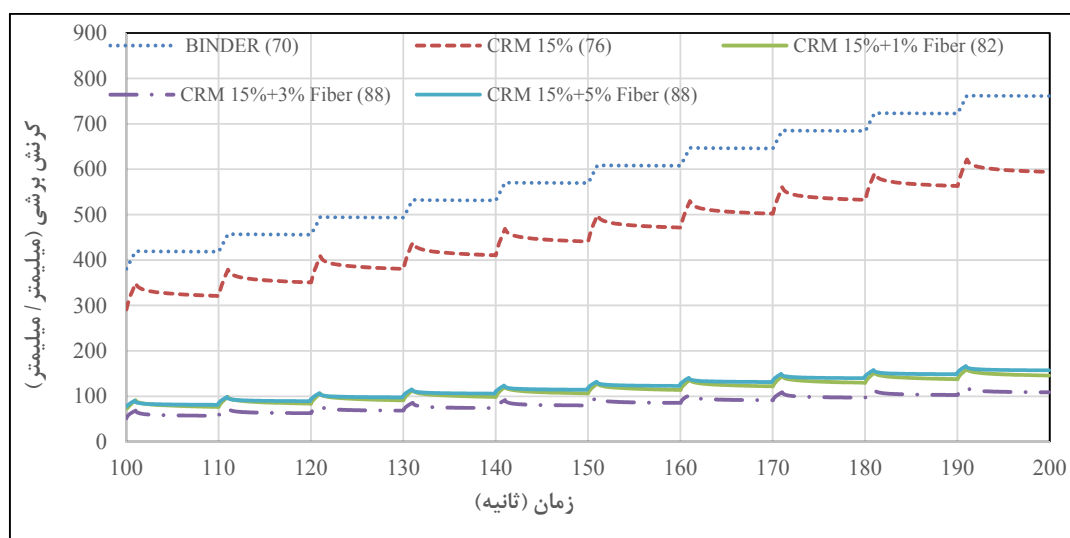
$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200pa} - J_{nr@100pa}}{J_{nr@3200pa}}$$

در دمای بالا می‌شود به طوری که عملکرد قیر حاوی ۱۵ درصد پودرلاستیک و ۱ درصد الیاف پوشش داده شده با وکس در دمای ۸۲ درجه‌ی سانتی‌گراد مشابه عملکرد قیر حاوی ۱۵ درصد پودرلاستیک به علاوه ۵ درصد الیاف پوشش داده شده با وکس در دمای ۸۸ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین با افزایش مقدار تنش اعمالی (شکل ۱۳)، به وضوح مشخص است که با افزایش مقدار الیاف مقدار کرنش برشی افزایش می‌یابد، به طوری که قیر اصلاح شده با ۵ درصد الیاف مقدار تغییر شکل و بازگشت بیشتر را در بالاترین دمای عملکردی از خود نشان می‌دهد. این تغییر شکل را می‌توان به سختی و کندروانی پایین این قیر اصلاح شده در دمای ۸۸ درجه‌ی سانتی‌گراد مرتبط دانست.

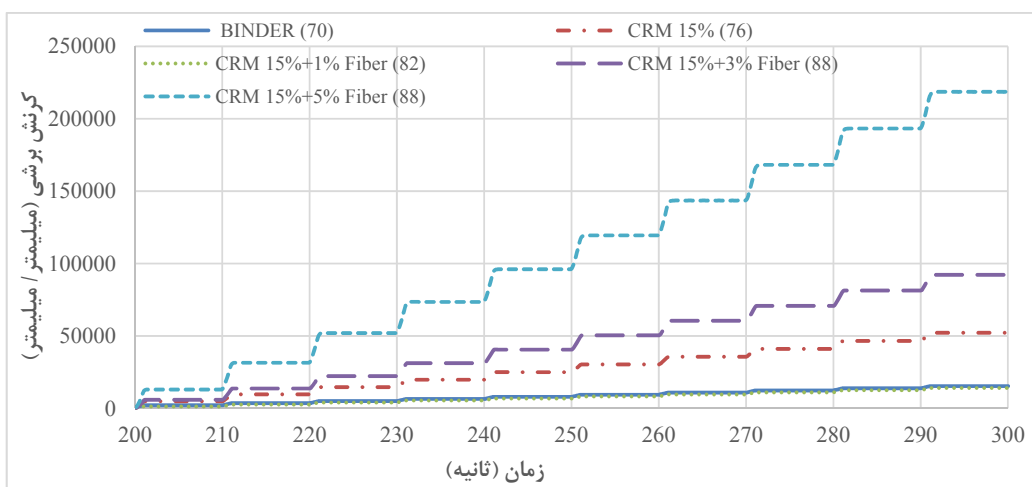
مقدار کرنش اولیه (ϵ_0) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل تعیین می‌گردد. (ϵ_1) اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است. به طور مشابه، مقدار کرنش (ϵ_r) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری (ϵ_{10}) در انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه می‌شود. رابطه (۲) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می‌دهد. مقدار مدول تغییر غیرقابل بازگشت که J_{nr} نام دارد که در رابطه (۳) آمده است، نسبت مقدار کرنش باقی‌مانده

(۴)

قیرهای اصلاح شده پس از آزمایش لعاب نازک چرخشی توسط دستگاه رئومتر برش دینامیکی پس از ۱۰۰ ثانیه آماده‌سازی دما برای اعمال تنش مورد آزمایش قرار گرفتند، در بالاترین دمای عملکردی نمونه قیرهای اصلاح شده (جدول ۲) نمودار بارهای وارد شده بر آن‌ها به شرح شکل ۱۲ و ۱۳ است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در این سطح تنش (تنش جزئی غیر مخرب) ابتدا با اضافه کردن پودرلاستیک و سپس با افزودن الیاف مقدار کرنش برشی کاهش یافته است، این کاهش مقدار را می‌توان با افزایش سختی و کندروانی بالای قیر به دلیل حضور هم‌زمان پودرلاستیک و الیاف ارتباط داد. همچنین با توجه به دمای هر نمونه به وضوح مشخص است که افزودن الیاف باعث افزایش باعث افزایش عملکرد قیر



شکل ۱۲. بارگذاری در آزمون بازگشت از سطح چند تنش در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال در بالاترین دمای عملکردی

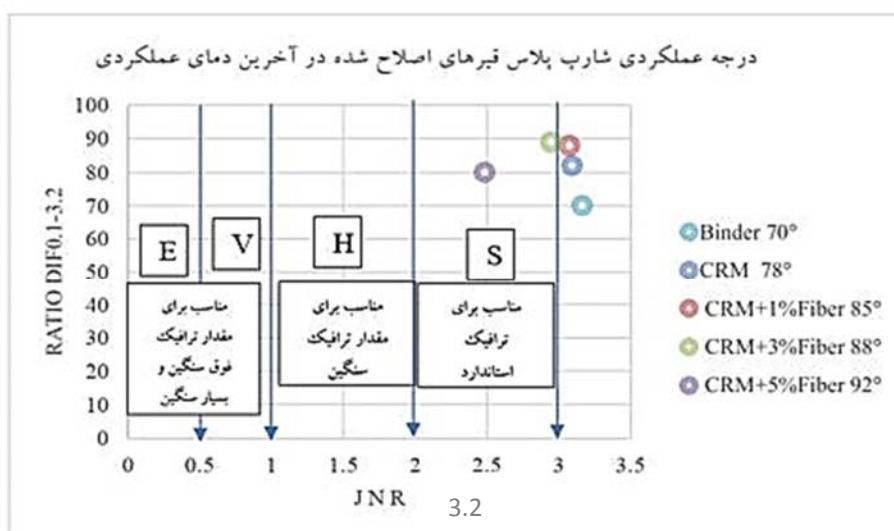


شکل ۱۳. بارگذاری در آزمون بازگشت از سطح چند تنش در تنش ۳/۲ کیلو پاسکال در بالاترین دمای عملکردی

دهی ترافیکی قیر با افزایش الیاف بالاتر می‌رود، و نیز قیرهای اصلاح شده در ۳ درصد در ۵ درصد الیاف در بالاترین دمای عملکردی خود توانسته‌اند همچنان ترافیک‌های استاندارد را تحمل کنند، بدیهی است که اگر آزمایش مطابق استاندارد (AASHTO M332) دمایی واحد برای همه نمونه‌ها انجام شود، مقدار ترافیک قابل تحمل قیرها بیشتر و نتایج قابل استانداردتر می‌شود.

اختلاف مقدار کرنش برشی در نمودارهای دو سطح تنش (شکل ۱۲ و ۱۳) را به وجود وکس و عدم هم‌جوشی بین وکس پوششی الاستیک در ۸۸ درجه سانتی‌گراد و مخلوط قیر و پودرلاستیک و الیاف در ارتباط داد، لذا با افزایش سطح تنش در این دما مقدار برگشت پذیری بیشتر می‌شود.

شکل ۱۴ نشان دهنده‌ی درجه عملکرد شارپ پلاس در بالاترین دمای قیر است، این نمودار نشان می‌دهد که، سرویس



شکل ۱۴. عملکرد قیر اصلاح شده در بالاترین دمای عملکردی در شارپ پلاس (بر مبنای آزمایش‌های دی آنجلو)

۵- نتیجه گیری

-استفاده از این الیاف سبب افزایش دمای بالای قیر عملکردی می‌شود. به طوری که با افزودن ۵ درصد از این الیاف، دمای عملکردی قیر ۳ درجه افزایش می‌یابد. پس از پیرشدگی کوتاه مدت، مقدار دمای شکست قیر نسبت به نمونه‌ی پیر نشده کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که پیرشدگی بر روی الیاف تاثیر منفی دارد.

-وجود الیاف و وکس در قیر پودرلاستیکی سبب کاهش مدول تغییر شکل غیر قابل بازگشت (JNR) شده و برگشت پذیری بهتری را برای قیرهای حاوی الیاف تحت تنش مخرب ۳/۲ کیلوپاسکال فراهم می‌کند.

-با توجه به آزمایش برگشت پذیری از سطح چند تنش در دمای بالای قیر پودرلاستیکی می‌توان گفت که افزودن الیاف پوشش داده شده با وکس در نسبت‌های ۳ و ۵ درصد، سبب شده تا قیر حاصله بتواند در دمای بالا نیز سرویس دهی برای ترافیک‌های استاندارد را داشته باشد.

همچنین برای ادامه کار در راستای تکمیل و توسعه پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود به عنوان تحقیقات آتی بر روی موضوعات زیر نیز پژوهش انجام گیرد.

-با توجه به وابسته بودن عملکرد وکس به نوع قیر (مقدار آروماتیک‌های موجود در قیر)، پیشنهاد می‌شود عملکرد قیرهای متفاوت دیگر نیز با استفاده از این نوع وکس مورد آزمایش و مقایسه قرار گیرد.

-با توجه به بالا بودن مقدار کندروانی قیر اصلاح شده در این پژوهش، می‌توان از این قیر در ساخت نمونه‌های آسفالت ماستیکی بهره برد و نتایج پارامترهای شیارشدگی را با نتایج این آزمون مقایسه کرد.

استفاده‌ی همزمان از الیاف و وکس و پودرلاستیک در قیر به منظور بهبود خواص قیر در مخلوط‌های متراکم مورد تأیید پژوهش‌های مختلف است. پژوهش حاضر به منظور بهبود خواص قیر برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده و برای این منظور قیر پودرلاستیکی با الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس، اصلاح شده و آزمایش‌های رئولوژیکی را بر روی قیر اصلاح شده، انجام شد. قیر اصلاح شده به دلیل بهبود قدرت جذب انرژی کرنشی در مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز و با تراکم کم و همچنین با هدف بهبود شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های متراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از بررسی خواص رئولوژیکی در این تحقیق حاکی از آن است که افزودن الیاف مذکور به قیر پودرلاستیکی، علاوه بر کاهش کندروانی، سبب افزایش مقاومت آن در برابر شیارشدگی در هر دو نمونه‌ی پیر نشده و پیر شده کوتاه مدت، می‌شود. سایر نتایج این تحقیق شامل موارد زیر است:

-استفاده از الیاف پوشش داده شده با وکس می‌تواند همزمان کاهش کندروانی و دمای اختلاط قیر پودرلاستیکی را به دنبال داشته باشد. این یافته می‌تواند در کاهش اکسیداسیون قیر بر اثر دمای بالای گرم کردن موثر باشد.

-همچنین با اضافه کردن درصد‌های ۱، ۳ و ۵ درصد از این الیاف دمای اختلاط در ویسکوزیته‌ی ۱ پاسکال ثانیه حدود ۲، ۳ و ۵ درجه افت می‌کند.

-الیاف سلولزی پوشش داده شده با وکس باعث افزایش شاخص مدول پیچیدگی در قیر پودرلاستیکی شده و در نتیجه‌ی باعث بهبود عملکرد شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی شده است.

۶- مراجع

-Akisetty, C. K., Lee, S.-J., & Amirkhanian, S. N.

(2009). High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 23(1), 565-573.

-Code-234. (2011). Iran highway asphalt paving code. In: The Ministry of Road and Urban Development, *Research and Education Center*.

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی (شرکت شهرک‌های صنعتی) (۱۳۹۶). طرح توجیهی تولید پودرلاستیک.

-طباطبایی، سارا (۱۳۷۹). کاربرد پلیمرها در صنعت راهسازی. مجله عمران دانشگاه صنعتی شریف، ویژه نامه کاربرد پلیمرها در مهندسی عمران، ۶۹، ۵۹-۴۹.

-یوسفی، علی اکبر (۱۳۸۷). اثر پلی اتیلن بازیافتی روی قیر، فصلنامه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، ۸۲، ۷۳-۴۹.

- Maniruzzaman, A. M., Hamadb, A., Malekac, A., & Elserganyd, M. (2015). Rheological properties of cellulose oil palm fiber (COPF) modified 80-100 asphalt binder. *J Adv Res Appl Mech*, 7(1), 21-30.
- Nejad, F. M., Aghajani, P., Modarres, A., & Firoozifar, H. (2012). Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials*, 26(1), 481-489.
- Read, J., Whiteoak, D., & Hunter, R. N. (2003). The shell bitumen handbook. *Thomas Telford*.
- Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Pérez, I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 43, 300-308.
- Wu, S., Haji, A., Adkins, I. J. R. M., & Design, P. (2023). State of art review on the incorporation of fibres in asphalt pavements. 24(6), 1559-1594.
- Ye, Q., & Wu, S. (2009). Rheological properties of fiber reinforced asphalt binders.
- Zarei, M., Rahmani, Z., Zahedi, M., & Nasrollahi, M. J. J. o. T. E., Part B: Pavements. (2020). Technical, economic, and environmental investigation of the effects of rubber powder additive on asphalt mixtures. 146(1), 04019039.
- D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R. N., Stephens, K., & Zanzotto, L. (2007). Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76.
- D'Angelo, J. A. (2009). The relationship of the MSCR test to rutting. *Road Materials and Pavement Design*, 10(sup1), 61-80.
- Eskandarsefat, S., Hofko, B., Rossi, C. O., & Sangiorgi, C. (2019). Fundamental properties of bitumen binders containing novel cellulose-based poly-functional fibres. *Composites Part B: Engineering*, 163, 339-350.
- Guo, Y., Tataranni, P., Sangiorgi, C. J. C., & Materials, B. (2023). The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. 390, 131754.
- Haryati, Y., Norhidayah, A., Nordiana, M., Juraidah, A., Hayati, A. N., Ramadhansyah, P., Haryati, A. (2019). Stability and rutting resistance of porous asphalt mixture incorporating coconut shells and fibres. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- https://sasobit.com/files/downloads/en/sasobit/ProductInformation_en.pdf.
- https://www.jrs.eu/jrs_wAssets/docs/strassenbau/pruduktflyer/en/viatop_c25_gb_181025.pdf.
- Kumar, N. K., & Ravitheja, A. J. M. t. p. (2019). Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives. 19, 397-402.

Investigating the Effect of Cellulose Fibers Coated with Sasobit on the Rheological Behavior of Rubber Powder Bitumen

Behrooz Shirgir, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Mohammadreza Karimi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Mohsen Fallah Zavareh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

E-mail: shirgir@khu.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Improving the high viscosity of rubber powder asphalt with warm asphalt waxes, such as Sasobit, is a common practice. Moreover, the use of cellulose fibers to enhance the tensile strength and strain energy absorption of asphalt mixtures has attracted the attention of researchers. In addition to these advantages, the use of fibers reduces cracking and maintains integrity, especially in mastic and porous asphalt mixtures with medium density. On the other hand, studies have shown that in open or gap-graded asphalt mixtures, the performance of rubber powder is much better than that of fibers in resisting rutting. In this research, cellulose fibers coated with Fischer-Tropsch wax (Sasobit) were used at 1, 3, and 5% levels, as additives in asphalt with 15% rubber powder. The modified asphalt was used to improve the strain energy absorption and drainage properties of asphalt mixtures with open gradation and low density, as well as to improve the rutting resistance of dense mixtures. The results of rheological properties showed that the addition of the fibers to rubber powder asphalt increased the resistance to rutting, as well as reduced the viscosity of both unaged and short-term aged samples. The results also showed that the upper-temperature limit of the PG 64-22 asphalt improved with the presence of fibers in a 15% rubber powder asphalt. For example, adding 5% fibers to 15% rubber powder asphalt increased the upper limit of the PG 64-22 asphalt to 94 degrees Celsius. Furthermore, the performance of short-term aged rubber powder asphalt and unaged asphalt was similar, but short-term aging of asphalt reduced the effect of fibers. Adding fibers increased the complex shear modulus of the asphalt at intermediate temperature and improved its performance in returning from the multi-stress level at the failure temperature. This better performance enabled the rubber powder asphalt containing fibers to perform better against rutting damage at the highest performance temperature.

Keywords: Rubber Powder Asphalt, Cellulose Fibers, Sasobit, Rheological Behavior, Returning from the multi-stress Level