

## ارزیابی تاثیر فیبرهای بازیافتی بر خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر

## مقاله علمی - پژوهشی

سارا چوبدار\*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sara\_choubdar@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۴۱۵-۴۰۱

## چکیده

قیمت قیر به دلیل افزایش قیمت نفت و افزایش حجم ترافیک در سراسر جهان به طور چشمگیری افزایش یافته است. این وضعیت باعث شده است که استفاده از قیر با ویسکوزیته بیشتر، قیر کم هزینه برای ساخت روسازی و توسعه مواد جایگزین که اثر رئولوژیکی خوبی داشته باشند، بیشتر مورد توجه قرار گیرد و تأثیر منفی کمتری بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند. کاربرد الیاف در مخلوط های آسفالتی در چند دهه گذشته برای بهبود عملکرد روسازی در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه بر روی سه نوع قیر انجام شد که با دو نوع الیاف اصلاح شدند: الیاف پشم بازیافتی قهوه ای<sup>۱</sup> (BRWF) که به صورت محلی در کشور موجود است و الیاف پلی استر<sup>۲</sup> (PF) که به عنوان ضایعات در نظر گرفته می شود، برای تولید قیرهای اصلاح شده با الیاف مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با استفاده از تست های فیزیکی سنتی (نفوذ، نقطه نرمی، و تست های ویسکوزیته چرخشی) و همچنین تست رئومتر برشی دینامیکی (DSR<sup>۳</sup>) مورد ارزیابی قرار گرفت. در مقایسه با قیرهای اصلی، قیرهای تقویت شده با الیاف دارای نقطه نرمی، ویسکوزیته و مدول مختلط بیشتر بودند، اما نفوذ آنها کاهش یافت. نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از هر دو نوع الیاف به عنوان اصلاح کننده برای قیر، عملکرد آنها را در دمای بالا با افزایش یک درجه عملکردی (PG)<sup>۴</sup> بهبود می بخشد. افزایش سختی قیر برای افزایش مقاومت شیارشدگی روسازی پیش بینی می شود. در نتیجه، این الیاف را می توان به عنوان افزودنی برای قیر و مخلوط آسفالت برای افزایش عملکرد آنها استفاده کرد.

واژه های کلیدی: الیاف پشم بازیافتی قهوه ای، الیاف پلی استر، شیار، قیر، قیر اصلاح شده

## ۱- مقدمه

می شوند و این دو با هم نقش مهمی در مخلوط های آسفالتی دارند. برخی تحقیقات نشان می دهد که تأثیر الیاف بر روی قیر ارتباط نزدیکی با تأثیر بر مخلوط آسفالت دارد (ژو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۷). اثرات ویژگی های الیاف (طول، چسبندگی، جذب، و تورم) بر روی قیر پیچیده است. الیاف به قیر اضافه می شود تا ویژگی های ویسکوالاستیک آن را بهبود بخشد، به عنوان مثال، افزایش ویسکوزیته و سختی قیر. الیاف معمولاً در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای و مخلوط های با دانه بندی شده باز استفاده می شوند تا از ریزش قیر در طول

الیاف به طور فزاینده ای در مطالعات علمی و عملکرد فنی با توسعه اقتصاد مدرن استفاده می شوند. هنگامی که صحبت از افزایش طول عمر قیر به میان می آید، استفاده از الیاف به عنوان تقویت کننده اغلب می تواند مزایای اقتصادی و عملکرد بیشتری را ارائه دهد. بسیاری از محققان در زمینه مهندسی راه، مخلوط های آسفالت تقویت شده با الیاف مختلف را مورد مطالعه قرار داده اند و کشف کرده اند که الیاف طبیعی و مصنوعی ممکن است به طور قابل توجهی عملکرد قیر و مخلوط های آسفالتی را بهبود بخشد. الیاف عمدتاً در مخلوط های آسفالتی با قیر مخلوط

که با کاهش زاویه فاز ( $\delta$ ) نشان داده می‌شود. Muniandy و همکاران (۲۰۰۸) تحقیقی برای تعیین خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده با الیاف انجام داد. مطالعه‌ای برای استفاده از تعداد زیادی درخت خرماي روغنی برای تولید الیاف سلولزی برای استفاده به عنوان یک افزودنی به قیر انجام شد. درصد شاهد (۰٪) و پنج درصد الیاف (۰،۰۷۵، ۰،۱۵، ۰،۲۲۵، ۰،۳، ۰،۳۷۵٪) وزن کل مخلوط با قیر استفاده شد. نتایج نشان داد که الیاف عملکرد رئولوژیکی قیر را افزایش می‌دهد. نمونه شاهد، که به عنوان PG58 طبقه بندی شد، به PG76 با ۰،۳۷۵٪ فیبر خرما ارتقا یافت. چنگ و همکاران (۲۰۱۸) خواص قیر اصلاح شده با الیاف ساقه ذرت را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف ساقه ذرت باعث بهبود خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح شده، به ویژه در دماهای سرویس بالا می‌شود. الیاف به طور گسترده در مخلوط آسفالت ماتریس سنگی (SMA) در روسازی آسفالت مورد استفاده قرار گرفت. تأثیر فیبر در SMA اغلب به عنوان تثبیت و جذب آسفالت در نظر گرفته می‌شود تا از ریزش قیر از مخلوط جلوگیری شود. در نتیجه، این مطالعه یک کار تجربی آزمایشگاهی برای بررسی چگونگی تأثیر الیاف پشم بازیافتی و الیاف پلی استر بر خواص سه قیر (۱۰۰/۸۵، ۷۰/۶۰، و PG76) است. معمولاً از الیاف برای تقویت فاز قیر استفاده می‌شود و مقدار بهینه آن به شدت به انواع الیاف مورد استفاده بستگی دارد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن ملاحظات هزینه، تعیین غلظت الیاف مناسب که ویژگی‌های قیر را تا حد مطلوبی افزایش می‌دهد، ضروری است. در نتیجه، این تحقیق با هدف تعریف ویژگی‌های فیزیکی قیر اصلاح شده با الیاف بازیافتی، ارزیابی تأثیر الیاف بر خواص رئولوژیکی قیر و تعیین غلظت بهینه الیاف در قیر می‌باشد.

اختلاط و تراکم جلوگیری کنند. الیاف می‌توانند قیر را با تشکیل یک شبکه سه بعدی و جذب قیر و چسبیدن به مخلوط تقویت کنند. الیاف همچنین می‌توانند مقاومت در برابر رطوبت، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر شیار و انطباق با خزش را بهبود بخشند (چن و همکاران، ۲۰۱۹؛ گو و همکاران، ۲۰۱۴). متداول ترین تکنیک‌ها جهت ارزیابی تأثیر الیاف مبتنی بر سلولز بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیر، آنالیز دمای پایین با رئومتر پرتو خمشی (BBR)° و سطوح متوسط درجه حرارت بالا با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی (DSR) است. هنگامی که انواع مختلف الیاف سلولزی در دماهای پایین به قیرها معرفی شدند، ادبیات نشان داد که قیرها سفتی را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، الیاف لاستیکی شده قادر به کاهش سفتی در همان مطالعه نشان داده شد. یک مطالعه نشان داد که مدول برشی پیچیده ترکیب قیر با الیاف در دماهای متوسط و بالا افزایش می‌یابد که ممکن است منجر به افزایش مقاومت شیاردار برای قیرها و مقیاس گسترده در مخلوط‌ها شود. علاوه بر این، گنجاندن الیاف مختلف، زاویه فاز قیرها را کاهش داد و مولفه الاستیک ویژگی ویسکوالاستیک قیرها را افزایش داد (چنگ و همکاران، ۲۰۱۸). Ye و همکاران (به و همکاران، ۲۰۰۹) خواص رئولوژیکی قیر تقویت شده با الیاف را بررسی کردند. الیاف سلولزی، الیاف پلی استر و الیاف معدنی به عنوان مواد افزودنی با غلظت های ۰،۱، ۰،۳، ۰،۵ و ۱ درصد وزنی قیر استفاده شد. نتایج تجربی نشان داد که ویسکوزیته و مدول برشی پیچیده (\*G) قیرهای تقویت شده با الیاف با افزودن الیاف، به ویژه الیاف پلی استر، افزایش یافته است، که نشان می‌دهد استفاده از افزودنی‌های الیاف می‌تواند سفتی قیرها را افزایش دهد. بخش الاستیک رفتار ویسکوالاستیک قیر نیز با افزودن الیاف تقویت شد

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- قیر

افزودنی های فیبر استفاده شد. قیرهای با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و قیر با درجه عملکرد PG76 در این تحقیق برای درک بیشتر الیاف روی قیرهای مختلف استفاده شد. جدول ۱ خواص فیزیکی سه قیر پایه مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

در این تحقیق از انواع قیر استفاده شده است که توانایی این الیاف در مقاومت در برابر بارهای ناشی از ترافیک مورد توجه قرار گیرد. قیر درجه نفوذ (۸۵-۱۰۰) ضعیف‌ترین نوع در بین طبقه بندی مورد استفاده علیرغم اینکه هیچ گونه تغییری ندارد در نظر گرفته می‌شود. از آن برای به دست آوردن اثر واقعی

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

PG76	۸۵-۱۰۰	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش	خصوصیات
۱,۰۳	۱,۰۳۷	۱/۰۱۴۲	ASTM D-70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۳۲,۵	۸۵	۶۵	ASTM D-5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۷۴,۵	۴۶	۵۲,۵	ASTM D-36	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
+۱۰۰	+۱۰۰	+۱۰۰	ASTM D-113	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
-	-	۲۷۰	ASTM D-92	نقطه اشتعال
۱۵۴۲,۶	۲۹۸,۶	۲۶۵	-	ویسکوزیته

## ۲-۲-۲-افزودنی‌ها

است که به عنوان کاربرد درجه دوم استفاده می‌شود که به طور گسترده در بازارهای بین‌المللی و محلی موجود است. پشم قبل از شروع استفاده در آزمایشگاه به روش خشک‌سازی و تمیز شد. جدول ۲ خواص فیزیکی الیاف پشم بازیافتی قهوه‌ای را نشان می‌دهد.

دو نوع فیبر به عنوان افزودنی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲-۱-فیبر پشمی بازیافتی قهوه‌ای

پشم یک الیاف پروتئینی است که در پوست گوسفند یافت می‌شود و سپس الیاف حیوانی نامیده می‌شود. نوعی پشم ظریف

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی الیاف پشمی بازیافتی قهوه‌ای

نتایج آزمایش	خصوصیات
قهوه‌ای	رنگ
بازیافتی	درجه
صاف	الگو
۱,۱۳	وزن مخصوص
٪۱۶-۱۳	درصد رطوبت
گرم در روز ۱,۳۵	مقاومت
میکرون و نازکتر ۱۹,۵	قطر

### ۲-۲-۲-فیبر پلی‌استر

استحکام پیوند بین سنگدانه و آسفالت را افزایش می‌دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). جدول ۳ شاخص‌های فنی الیاف پلی‌استر را نشان می‌دهد.

الیاف پلی‌استر یک ساختار شبکه سه بعدی را تشکیل می‌دهند که عمدتاً نقش تقویت کننده‌ای در افزایش ضخامت لایه آسفالتی برای سطح سنگدانه ایفا می‌کند. علاوه بر این، این نوع افزودنی

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی الیاف پلی استر

حدود استاندارد	نتایج	خصوصیات
>۳	۱۲	طول (میلی متر)
۲۵-۱۵	۲۰	قطر (میکرومتر)
>۵۰۰	۶۹۰-۵۰۰	مقاومت (مگاپاسکال)
>۱۵	۳۵-۱۵	تغییر طول (درصد)
-	بیشتر از ۱۳,۵	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۱,۴--۱,۳	۱,۳۶	نسبت
>۲۵۸	۲۵۹	دمای ذوب

۰,۶ درصد وزنی قیر برای پشم بازیافتی قهوه ای بود. الیاف، در حالی که درصد الیاف پلی استر مورد استفاده ۰,۵، ۱,۰، ۱,۵ و ۲,۰ درصد وزن قیر بود. فرآیند اختلاط به مدت ۳۰ دقیقه حفظ شد تا یک ترکیب یکنواخت در حالی که دمای ترکیب ۱۶۰ درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شود. برای جلوگیری از تاثیر معکوس گرمای بیش از حد، دما از طریق یک دماسنج دوتایی به دقت کنترل شده است. نمونه پس از اتمام از قوطی اختلاط خارج می شود، به یک ظرف فلزی کوچک تقسیم می شود و سپس برای آزمایش های بعدی در دمای اتاق نگهداری می شود. با توجه به شرایط دما و چرخش، فرآیندهای ترکیب الیاف با قیر باعث پیری در نمونه های قیر اصلاح شده می شود. نمونه کنترل نیز به مدت ۳۰ دقیقه در دمای میکسر در میکسر منتقل شد تا این شرایط برای قیرهای کنترل تکرار شود و نمونه ها در شرایط مساوی مقایسه شوند.

### ۳- روش آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایش قیر

##### ۳-۱-۱- درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد پر استفاده ترین روش برای طبقه بندی قیر در سراسر جهان است. آزمون شامل اندازه گیری نفوذ عمودی یک سوزن فولادی استاندارد شده در یک نمونه قیر در دمای خاص برای تعیین قوام قیر است. مدت زمان بارگذاری ۵ ثانیه و بار سوزن ۱۰۰ گرم است. عمق نفوذ سوزن در نمونه قیر ۰,۱ میلی متر است. بنابراین

الیاف پلی استر مورد استفاده در این مطالعه عمدتاً ضایعات یا استفاده شده درجه II و زیست تخریب پذیر نیستند. از آنجایی که این افزودنی در بالش های پزشکی پلی استر پس از تمیز کردن و شست و شو به روش خشک برای اطمینان از عدم تغییر خواص مکانیکی و شیمیایی آنها استفاده می شود و از آنجایی که ساخت روسازی آسفالتی در کشور به سرعت در حال رشد است، استفاده از این بالش ها الیاف، که به صورت انبوه تولید می شوند، منجر به مشکل دفع می شوند که منجر به نگرانی های زیست محیطی در مخلوط های آسفالتی مورد نیاز برای اکتشاف به نفع روسازی و محیط زیست می شود.

#### ۲-۳- آماده سازی نمونه های قیر اصلاح شده

از اختلاط مرطوب در این مطالعه استفاده شد، زیرا ایت تحقیق بر روی عملکرد قیرهای اصلاح شده با الیاف متمرکز شده است. در نتیجه، الیاف به طور مستقیم با قیر مخلوط شد. اختلاط مرطوب همچنین دارای مزیت توزیع یکنواخت الیاف در قیر در مقایسه با اختلاط خشک است. اشکال آن این است که اگر قیر با اختلاط مرطوب یک بار به درستی استفاده نشود، الیاف و آسفالت پس از مدتی در انبار جدا می شوند. در بیشتر موارد، تکنیک اختلاط مرطوب نیز زمان و هزینه فرآیند ساختمان را افزایش می دهد (بای و همکاران، ۲۰۱۵).

قیرهای اصلاح شده با الیاف از طریق اختلاط الیاف با قیر توسط یک میکسر با برش بالا با چرخش حدود ۱۰۰۰ دور در دقیقه در ۱۶۰ به دست آمد. درصدهای الیاف ۰,۱۵، ۰,۳، ۰,۴۵ و

اطمینان حاصل شود که می‌توان آنها را پمپ کرد و در تاسیسات اختلاط داغ جابجا کرد. ویسکوزیته در دمای ثابت ۱۳۵ درجه سانتی گراد تعیین شد.

واحد نفوذ ۰٫۱ میلی متر است. نفوذ یک نمایش عددی از واکنش قیر به تغییرات دما است.

### ۳-۱-۲- آزمایش نقطه نرمی

پایداری حرارتی قیر با نقطه نرم شدن آن نشان داده می‌شود. به این معنی است که هر چه نقطه نرم شدن قیر بیشتر باشد، دمای لازم برای دستیابی به ویسکوزیته یکسان بالاتر است. نقطه نرم شدن در توصیف ترکیبات قیر در این مطالعه برای بررسی تأثیر افزودن‌های فیبر مختلف بر پایداری حرارتی گنجانده شد. آزمون مستلزم تعیین دمای "معمولی" است که در آن آسفالت به قوام خاصی می‌رسد. تکنیک حلقه و توپ اغلب برای ارزیابی نقطه نرم شدن قیر (R&B) استفاده می‌شود. نقطه نرمی نیز یک آزمایش تجربی است که دمایی را اندازه‌گیری می‌کند که در آن قیر نرم می‌شود و وزن یک توپ فلزی را تحمل نمی‌کند و شروع به جریان می‌کند. حلقه‌ها و مجموعه در یک حمام آب تا عمق  $9.5 \pm 3$  میلی‌متر قرار می‌گیرند، یک بلبرینگ فولادی ۹٫۵ میلی‌متری (وزن  $3.50 \pm 0.05$  گرم) در مرکز هر نمونه قرار می‌گیرد و دما با نرخ  $5 \pm 0.5$  افزایش می‌یابد. ۰٫۵ درجه سانتیگراد در دقیقه میانگین دو درجه حرارتی که در آن دو توپ می‌افتند و صفحه پایه را لمس می‌کنند به عنوان نقطه نرم شدن ثبت می‌شود.

### ۳-۱-۳- ویسکوزیته قیر

ویسکوزیته قیر یک ویژگی فیزیکی ضروری برای تعیین جریان پذیری و تغییر شکل آن است. با ایجاد پروفایل‌های ویسکوزیته-دما، ارزیابی رفتار جریان قیر در دماهای بالا هنگام نظارت بر تولید میدان و طراحی آزمایشگاهی همیشه مفید است. در محدوده دمای بالا تولید و ساخت، از ویسکومتر چرخشی (RV) برای تعیین ویسکوزیته قیر استفاده می‌شود. تست RV پایه، گشتاور مورد نیاز برای چرخش یک دوک استوانه‌ای با سرعت ثابت (۲۰ RPM) را در حالی که در قیر در دمای ثابت با استفاده از سیستم کنترل دما غوطه‌ور می‌شود، تعیین می‌کند. پس از آن، گشتاور به ویسکوزیته تبدیل می‌شود. نتایج آزمایش RV تضمین می‌کند که بایندر آسفالت به اندازه کافی سیال برای پمپاژ و مخلوط کردن است. ویسکوزیته چرخشی قیر با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد به دنبال AASHTO T316 اندازه‌گیری شد. تست ویسکوزیته چرخشی بر روی قیر انجام می‌شود تا

### ۳-۱-۴- آزمایش جاروب دما

آزمون DSR برای بررسی ویسکوزیته و کشسانی قیرها در دماهای بالا و متوسط استفاده شد. در دماها و فرکانس‌های مورد نظر، دستگاه مدول برشی پیچیده قیر ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) را کنترل می‌کند و تصویر کاملی از رفتار قیر در دمای سرویس روسازی ارائه می‌دهد. برای تعیین مدول برشی پیچیده ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) قیر از یک رئومتر برشی دینامیکی بولین (DSR) استفاده شد. مدول پیچیده به عنوان نسبت حداکثر تنش برشی به حداکثر کرنش برشی تعریف می‌شود و معیاری از مقاومت کل در برابر تغییر شکل در طول بارگذاری برشی را ارائه می‌دهد. زاویه فاز به عنوان فاصله زمانی بین تنش اعمال شده و کرنش حاصل تعریف می‌شود و نشانگر مقادیر نسبی تغییر شکل قابل بازیابی و غیرقابل بازیافت است. آزمایش بر روی قیر پیر نشده انجام می‌شود. نمونه‌ها باید بین دو صفحه موازی به قطر ۲۵ میلی‌متر با شکاف ۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری توسط DSR در دماهای آزمایش بالا قرار داده شوند. روش آزمایش در AASHTO T315 توضیح داده شده است. تنش در سطح پایین (۰٫۱۲ کیلو پاسکال) هدایت شده است تا تمام آزمایش‌هایی که در محدوده ویسکوالاستیک خطی انجام شده‌اند حفظ شود. علاوه بر این، ضریب شیار ( $G^*/\sin\delta$ ) برای اندازه‌گیری مقاومت برشی و سختی قیر محاسبه شد. با توجه به مشخصات Superpave، برای به حداقل رساندن تغییر شکل دائمی (شیارشدهگی)، پارامتر شیارشدهگی ( $G^*/\sin\delta$ ) باید بزرگتر یا برابر با ۱٫۰۰ کیلو پاسکال برای قیر پیر نشده باشد.

### ۴- بحث

#### ۴-۱- نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

آزمایش‌های مرسوم مانند نفوذ (ASTM D5)، نقطه نرم شدن (ASTM D36) و ویسکوزیته (ASTM D4402) برای قیر بدون و با افزودنی‌های فیبر انجام شد.

#### ۴-۱-۱- نتایج آزمایش درجه نفوذ

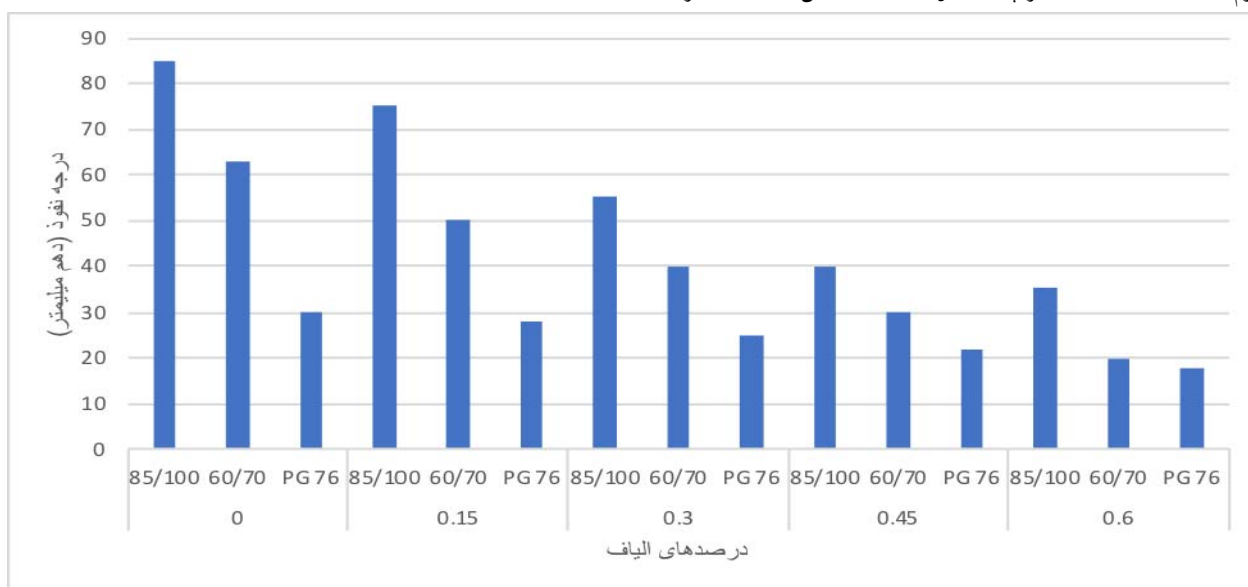
نفوذ یک آزمایش سنتی برای تعیین سختی قیر است. میانگین سه قرائت برای بدست آوردن مقدار نفوذ استفاده شد. نتایج آزمایش نفوذ برای قیرهای اصلاح شده با الیاف در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش درصد اصلاح کننده‌ها، مقدار نفوذ کاهش می‌یابد که نشان دهنده افزایش قوام قیر است، صرف نظر از نوع طبقه بندی علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده با الیاف پلی استر دارای ارزش نفوذ بالاتری در مقایسه با نمونه‌های قیر اصلاح شده با الیاف پشم بازیافتی قهوه‌ای هستند. در عین حال، الیاف تأثیر ناچیزی بر نفوذ قیر PG76 داشتند. تقریباً به این دلیل است که قیر PG76 قبلاً پلیمریزه شده است، بنابراین تأثیر الیاف بر روی قیر قابل توجه نبود.

#### ۴-۱-۲- نتایج آزمایش نقطه نرمی

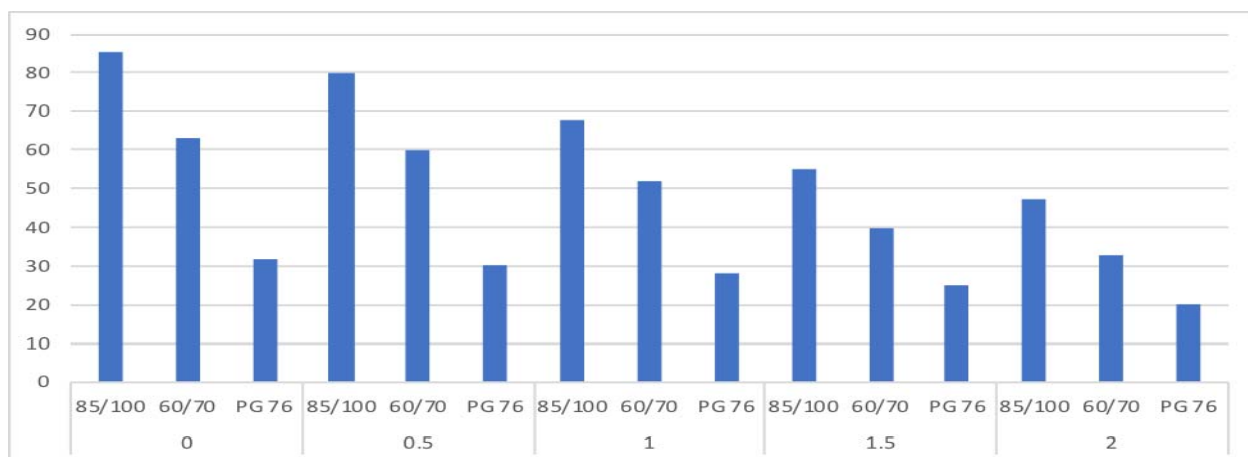
نقطه نرم شدن با تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی مرتبط است. نتایج آزمون نقطه نرمی برای سه نوع قیر و دو نوع فیبر در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. با افزایش درصد فیبر، نقطه نرمی افزایش یافت. مقدار افزایش در نقطه نرم شدن تابعی از درصد فیبر است. تغییرات نسبتاً قابل توجهی در مقادیر نقطه نرم شدن در مقایسه با قیر پایه وجود داشت. با این حال، مقادیر

نقطه نرم شدن آسفالت با عیار بالا (PG76) اصلاح شده توسط دو الیاف به طور قابل توجهی تغییر نکرد. به طور کلی، مقادیر نقطه نفوذ و نرم شدن یک قیر منعکس کننده ویسکوزیته نسبی آن است. در دماهای بالا، قیرهای با درجه نفوذ کم و نقاط نرم شوندگی بالا ممکن است در برابر تغییر شکل مقاومت کنند.

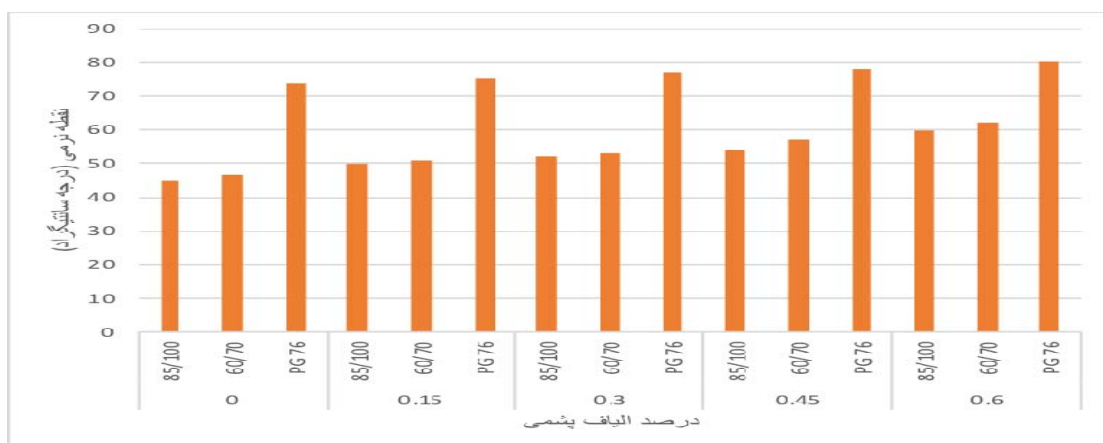
شکل ۵ و ۶ نتایج ویسکوزیته چرخشی نمونه های کنترل و اصلاح شده با فیبر را در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد در ثانیه پاسکال (Pa s) نشان می‌دهد. مقادیر ویسکوزیته ثابت کرد که قیر حاوی فیبر اصلاح شده، صرف نظر از نوع قیر، مقادیر ویسکوزیته بالاتری نسبت به قیرهای بدون الیاف دارند. افزایش ویسکوزیته ناشی از تمایل الیاف به جذب قیر است که باعث چسبیدن آنها به هم می‌شود. علاوه بر این، وجود الیاف در قیر اثری مشابه اسکلت در بدن دارد و سختی قیر را افزایش می‌دهد و تغییر شکل را در همان دما کاهش می‌دهد. باعث افزایش دمای اختلاط، کاهش کارایی و افزایش هزینه‌ها می‌شود (کاوو و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، هنگامی که ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد، مقاومت حرارتی مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد و آسیب دمای بالا کاهش می‌یابد (عربانی و همکاران، ۲۰۱۹).



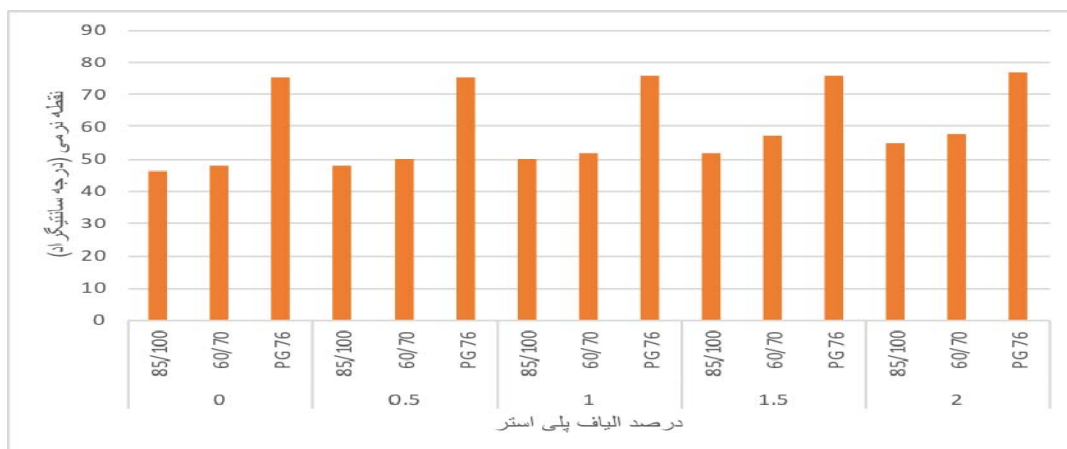
شکل ۱. نتایج آزمون درجه نفوذ نمونه‌های حاوی الیاف پشمی



شکل ۲. نتایج آزمون درجه نفوذ نمونه‌های حاوی الیاف پلی استر



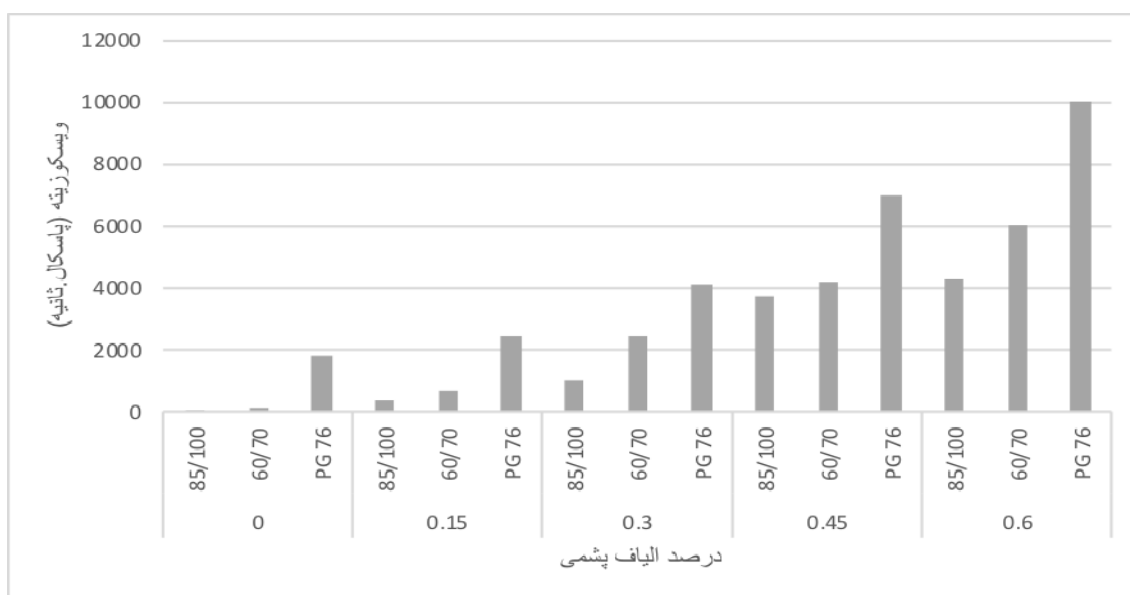
شکل ۳. نتایج آزمون نقطه نرمی نمونه‌های حاوی الیاف پشمی



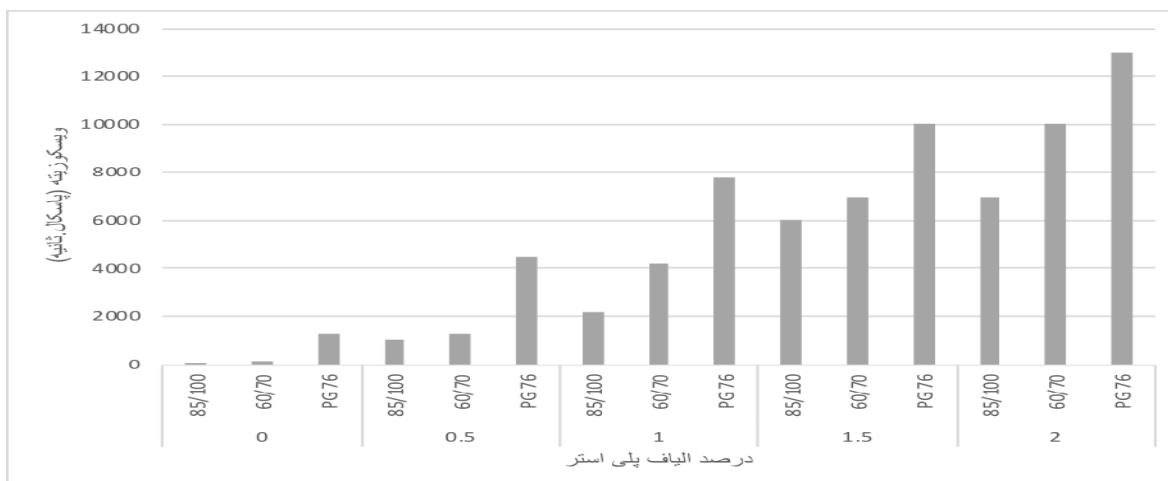
شکل ۴. نتایج آزمون نقطه نرمی نمونه‌های حاوی الیاف پلی استر

در حالی که قیرهای با درصد فیبر بیشتر از این استاندارد برخوردار نیستند. در عین حال، قیرهای اصلاح شده با الیاف پلی استر با ۱,۰٪ برای قیر ۸۵-۱۰۰ و ۰,۵ برای قیر ۶۰-۷۰ این استاندارد را رعایت کرده اند، در حالی که اشاره شد که تأثیر سریع تغییر در درصد وجود دارد. الیاف در مورد قیر PG76 به طوری که با درصد اول فیبر اضافه شده از حد مجاز فراتر رود و این را می توان به این دلیل نسبت داد که این قیر در ابتدا توسط پلیمر اصلاح شده و نیاز به اصلاح بیشتری ندارد.

قابل توجه است که میزان افزودن الیاف پلی استر در مقایسه با الیاف پشم بازیافتی قهوه‌ای نسبتاً بالا است. احتمالاً می‌تواند به دلیل حلالیت و همگنی بالای پلی استرها در قیر در مقایسه با الیاف پشم بازیافتی قهوه‌ای باشد. از آنجایی که AASHTO 3Pas را به عنوان حد بالایی ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد برای سهولت در کارایی، پمپاژ و حمل و نقل در نظر می‌گیرد، قیرهای اصلاح شده با الیاف پشمی بازیافتی قهوه ای با ۰,۳ درصد برای ۸۵-۱۰۰ و ۶۰-۷۰ بایندر و ۰,۱۶ درصد برای PG77. قیرها این استاندارد را رعایت کرده‌اند،



شکل ۵. نتایج آزمون ویسکوزیته نمونه‌های حاوی الیاف پشمی



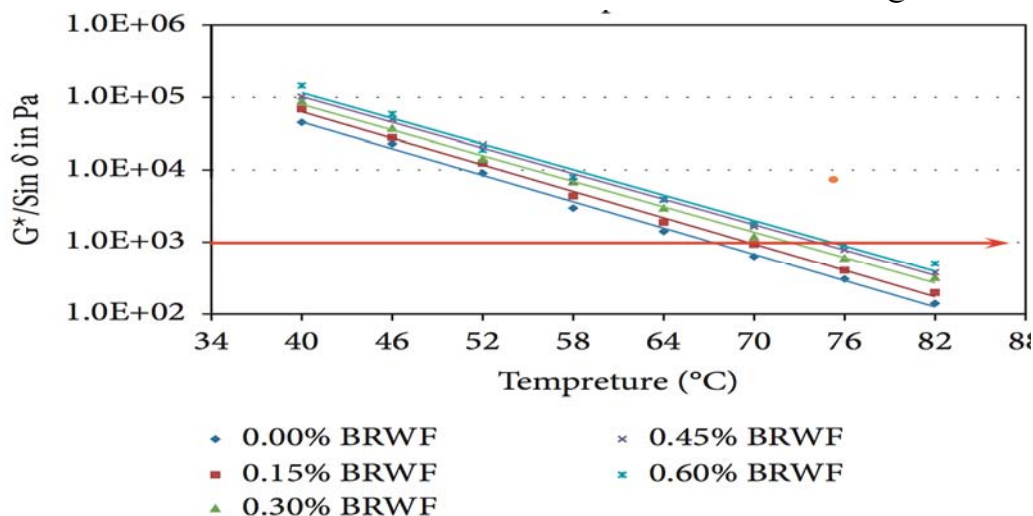
شکل ۶. نتایج آزمون ویسکوزیته نمونه‌های حاوی الیاف پلی استر



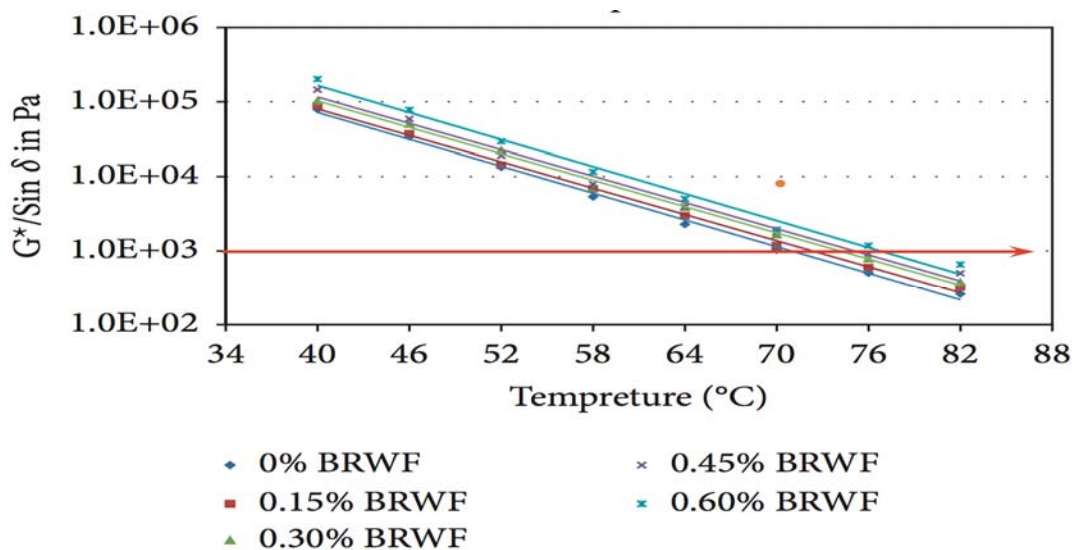
۴-۲- خصوصیات رئولوژیکی قیر

استفاده در این مطالعه بر روی پارامتر شیارگی ( $G^*/\sin\delta$ ) در دماهای مختلف را می‌توان در شکل‌های ۷ الی ۱۲ به عنوان خروجی آزمایش جاروب دمایی انجام شده بر روی نمونه‌های آسفالت در دمای بالا مشاهده کرد. دمای سرویس از این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش درصد الیاف، بدون توجه به نوع الیاف یا قیر، مخلوط‌ها سفت‌تر می‌شوند.

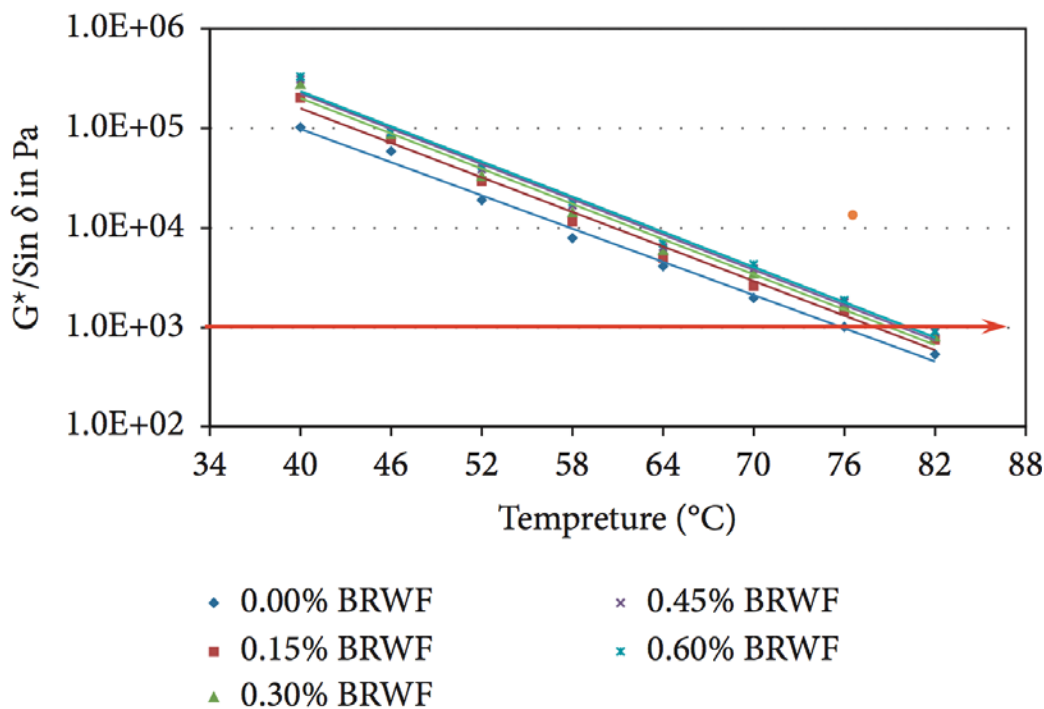
تاثیر الیاف بر عملکرد در دمای بالا و مقاومت شیاردار قیرها با استفاده از DSR در دمای ۴۰، ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتی‌گراد بر روی قیرهای پیر نشده مورد بررسی قرار گرفت. فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\sin$ ) در آزمایش‌های DSR برای ارزیابی عملکرد آسفالت در دمای بالا استفاده می‌شود. آسفالت زمانی که ضریب شیارشدگی بالاتر از ۱،۰ کیلو پاسکال باشد نیاز را برآورده می‌کند. اثر نوع و درصد الیاف برای سه قیر مورد



شکل ۷. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر ۱۰۰/۸۵ اصلاح شده با فیبر پشمی بازیافتی قهوه‌ای



شکل ۸. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با فیبر پشمی بازیافتی قهوه‌ای

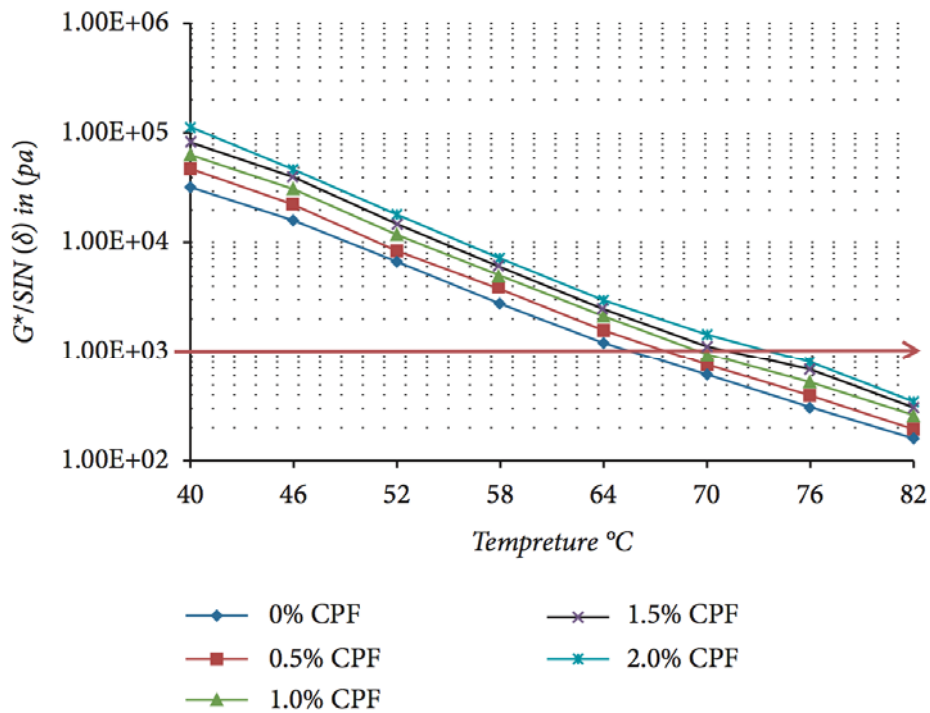


شکل ۹. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر با درجه عملکردی ۷۶ اصلاح شده با فیبر پشمی بازیافتی قهوه‌ای

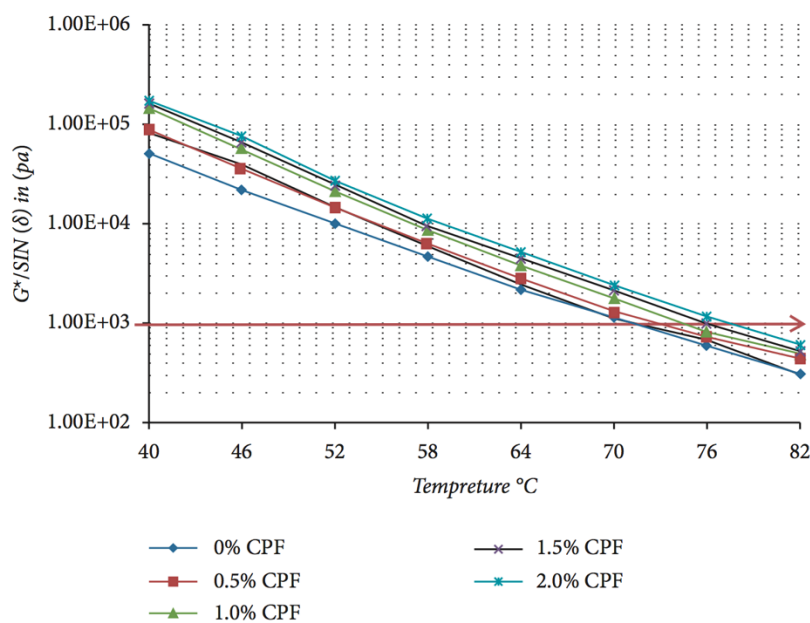
بر روی سایر قیرهای (۶۰-۷۰ و PG76) کمتر بود. برای تأثیر الیاف پلی استر بر روی قیر ۸۵-۱۰۰، دمای شکست از ۶۶ درجه سانتیگراد (قیر خالص) به ۷۳ درجه سانتیگراد در درصد فیبر ۲۰، درصد افزایش یافت، به این معنی که درجه عملکرد یک درجه از PG64 به PG70 افزایش یافت. پس از مقایسه دمای شکست به دست آمده با الزامات Superpave، قیرهای خالص و اصلاح شده با الیاف در دسته‌های درجه عملکرد (PG) همانطور که در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند، به ترتیب برای الیاف پشم بازیافتی و الیاف پلی استر طبقه‌بندی شدند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های کنترل را می‌توان بسته به نوع و درصد فیبر و همچنین نوع قیر پایه، اصلاح کرد و به درجه‌های PG بالاتر برد. بنابراین، استفاده از این دو الیاف می‌تواند برای مناطق با شرایط دمای بالا مناسب باشد.

اثر درصد الیاف بر سفتی به الیاف و نوع قیر بستگی دارد. همانطور که در شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است، به ترتیب برای اثر الیاف پشم بازیافتی و الیاف پلی استر مورد ارزیابی قرار گرفت. این شکل‌ها دمای شکست قیرهای اصلاح شده با الیاف را در برابر درصد فیبر برای تأثیر هر نوع الیاف و درصد آن بر روی هر نوع قیر نشان می‌دهند. دمای شکست حداکثر دمایی است که معیارهای شیارشدگی را برآورده می‌کند. مشاهده شد که قیر ۸۵-۱۰۰ بیشترین تأثیر را از حضور هر دو الیاف داشت و به دنبال آن قیرهای ۶۰-۷۰ و PG76 قرار گرفتند. برای تأثیر الیاف پشم بازیافتی بر روی قیر ۸۵-۱۰۰، دمای شکست از ۶۶ درجه سانتیگراد (قیر خالص) به ۷۵٫۶ درجه سانتیگراد در درصد فیبر ۰٫۶ درصد افزایش یافت. به معنای افزایش درجه عملکرد قیر تقریباً ۲ پله، از PG64 به PG76 است. در همین حال، اثر

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره اول، شماره ۷۸، بهار ۱۴۰۳

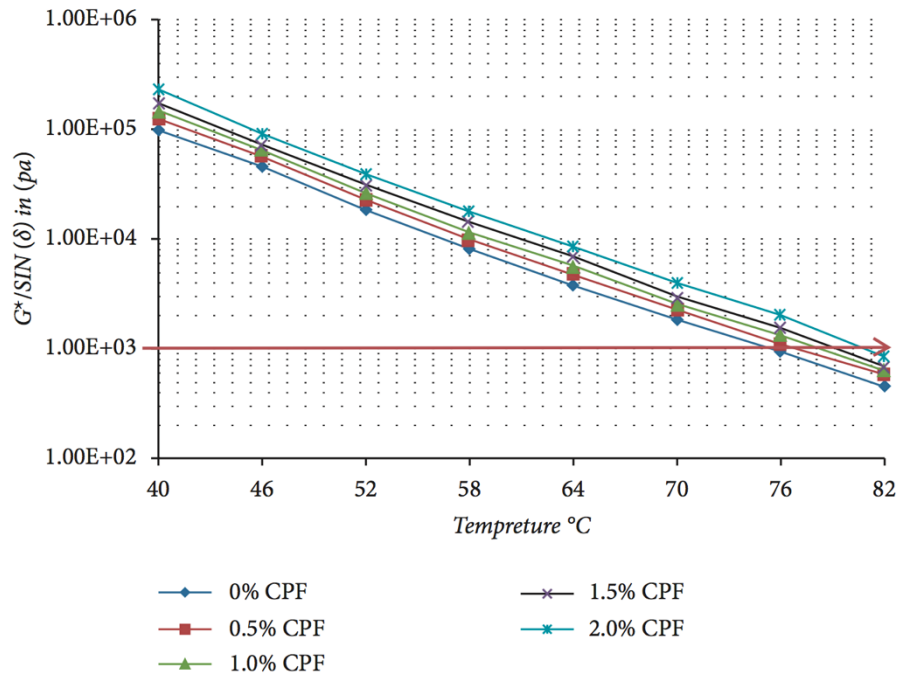


شکل ۱۰. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر ۱۰۰/۸۵ اصلاح شده با فیبر پلی استر

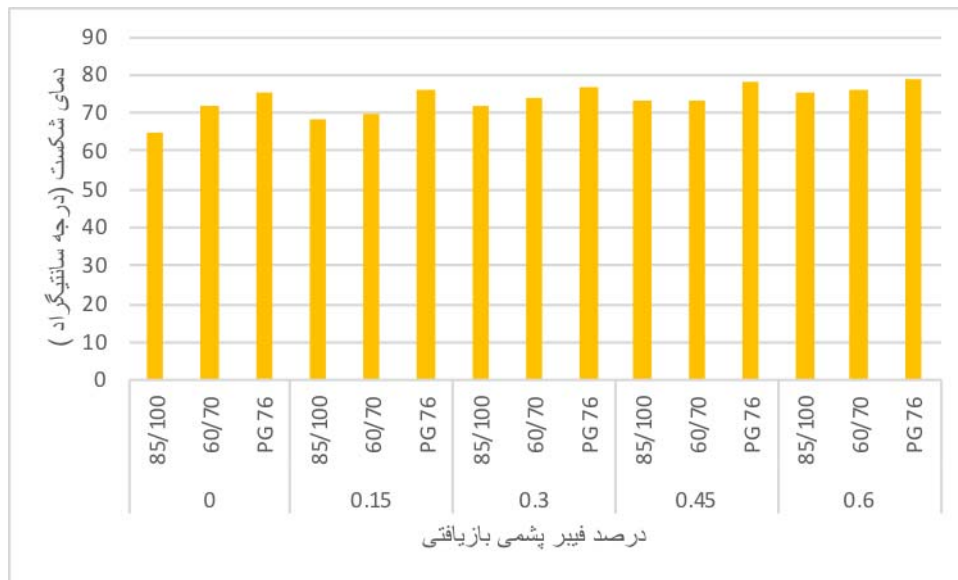


شکل ۱۱. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با فیبر پلی استر

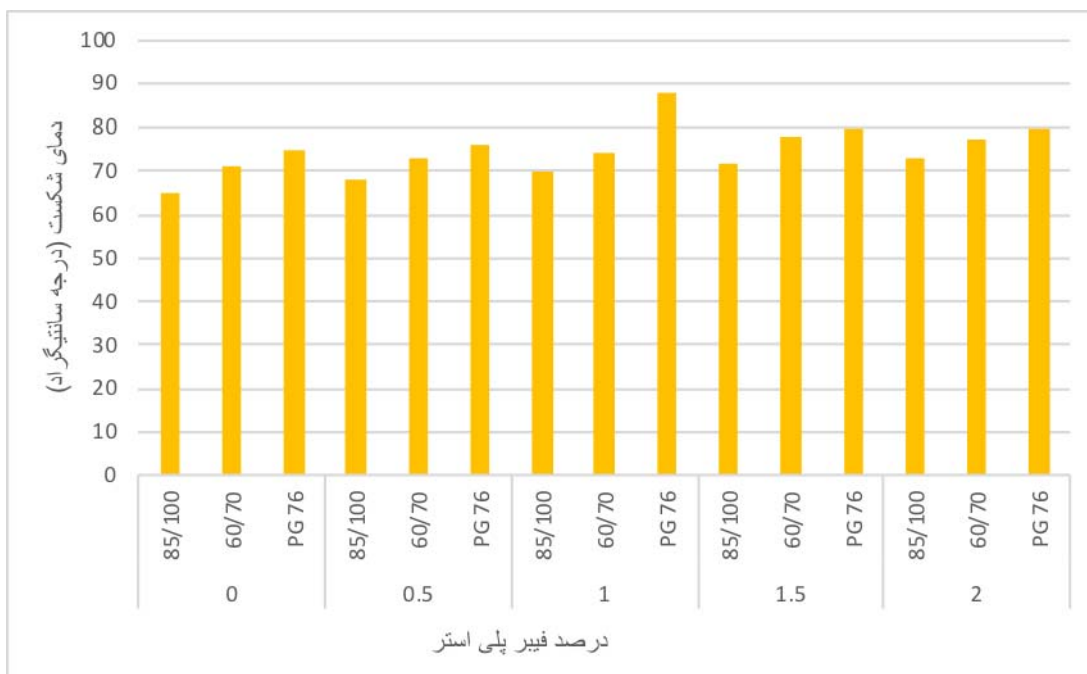
فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره اول، شماره ۷۸، بهار ۱۴۰۳



شکل ۱۲. نتایج آزمایش جاروب دما برای قیر با درجه عملکردی ۷۶ اصلاح شده با فیبر پلی استر



شکل ۱۳. دمای شکست برای قیرهای مختلف حاوی فیبر پشمی بازیافتی قهوه‌ای



شکل ۱۴. دمای شکست برای قیرهای مختلف حاوی فیبر پلی استر

جدول ۴. درجه عملکردی بالا قیرهای حاوی الیاف پشمی

درصد فیبر					نوع قیر
۰,۶۰٪	۰,۴۵٪	۰,۳۰٪	۰,۱۵٪	۰,۰۰٪	۱۰۰-۸۵
PG76	PG70	PG70	PG70	PG 64	۷۰-۶۰
PG76	PG70	PG70	PG70	PG70	PG 76
PG76	PG76	PG76	PG76	PG76	

جدول ۵. درجه عملکردی بالا قیرهای حاوی الیاف پلی استر

درصد فیبر					نوع قیر
٪۲	٪۱.۵	٪۱	۰,۵٪	۰,۰۰٪	۱۰۰-۸۵
PG70	PG70	PG64	PG64	PG 64	۷۰-۶۰
PG76	PG76	PG70	PG70	PG70	PG 76
PG76	PG76	PG76	PG76	PG76	

### ۵- نتیجه گیری

ویسکوزیته چرخشی و رئومتر برشی دینامیکی، برای بررسی و ارزیابی تأثیر استفاده از دو نوع الیاف (الیاف پشم قهوه‌ای بازیافت

بر روی نمونه‌های اصلاح‌شده، آزمایش‌های سنتی مانند نقطه درجه نفوذ و نرمی، و همچنین آزمایش‌های SHRP مانند

بالاتر تغییر یافتند، افزودن الیاف ویژگی‌های رئولوژیکی قیر را افزایش داد.

-نوع الیاف و محتویات آن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد قیر در دمای بالا دارد.

-الیاف پشم بازیافتی و الیاف پلی استر چین افزودنی های مناسبی برای افزایش مقاومت قیر و مخلوط آسفالتی در برابر شیار شدن و تغییر شکل دائمی هستند زیرا استفاده از این الیاف در قیرها سفتی و خواص کشسانی آنها را افزایش می دهد.

شده و الیاف پلی استر) انجام شد. در قیرها ممکن است منجر به شناخت بهتر قیرهای اصلاح شده با الیاف و به طور کلی مخلوط آسفالت تقویت شده با الیاف شود. و در زیر چند نتیجه گیری کلی وجود دارد:

-برای تمام درصدهای الیاف آزمایش شده، قیرهای اصلاح شده با الیاف نفوذ کمتر و نقطه نرم شدن بیشتری نسبت به قیر کنترل داشتند، که نشان دهنده حساسیت کمتر به نوسانات دما و انعطاف پذیری بهتر در برابر تغییر شکل در دماهای بالا است.

-از آنجایی که نمونه‌های کنترل با افزایش محتوای الیاف به PG

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Brown Recycled Wool Fiber
- 2- Polyester Fiber
- 3- Dynamic Shear Rheometer
- 4- Performance Grade
- 5- Bending Beam Rheometer
- 6- Stone Matrix Asphalt

## ۷- مراجع

-Muniandy, R., H. Jafariahan, R. Yunus, and S. Hassim (2008). Determination of rheological properties of bio mastic asphalt. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 1, No. 3, 204-209.

-Wang, X., R. Wu, and L. Zhang (2017). Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with glass fibre. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 20, No. 3, 715-726.

-Xiang, Y., Y. Xie, and G. Long (2018). Effect of basalt fiber surface silane coupling agent coating on fiber-reinforced asphalt: from macro-mechanical performance to micro-interfacial mechanism. *Construction and Building Materials*, Vol. 179, 107-116.

-Xu, Q., H. Chen, and J. A. Prozzi (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 10, 2003-2010.

-Ye, Q., S. Wu, and N. Li. (2009). Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 10, 1598-1602.

-Arabani, M. and A. Shabani (2019). Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, Vol. 205, 377-386.

-Bai, B. C., D.-W. Park, H. V. Vo, S. Dessouky, and J. S. Im (2015). Thermal properties of asphalt mixtures modified with conductive fillers. *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, Article ID 926809, 6-11.

-Chen, Z., J. Yi, Z. Chen, and D. Feng (2019). Properties of asphalt binder modified by corn stalk fiber. *Construction and Building Materials*, Vol. 212, 225-235.

-Cheng, Y., D. Yu, Y. Gong, C. Zhu, J. Tao, and W. Wang (2018). Laboratory evaluation on performance of eco-friendly basalt fiber and diatomite compound modified asphalt mixture. *Materials*, Vol. 11, No. 12, 2400-2401.

-Cao, X., H. Wang, X. Cao, W. Sun, H. Zhu, and B. Tang (2018). Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil. *Construction and Building Materials*, Vol. 180, 455-463.

-Gu, X., T. Xu, and F. Ni, (2014). Rheological behavior of basalt fiber reinforced asphalt mastic. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 29, No. 5, 950-955.

## **Evaluation of the Effect of Recycled Fibers on Physical and Rheological Properties of Asphalt Binder**

*Sara Choubdar, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Email: sara\_choubdar@civileng.iust.ac.ir*

Received: June 2023- Accepted: February 2024

### **ABSTRACT**

Bitumen prices have increased dramatically due to rising oil prices and increased traffic volumes around the world. This situation has caused the use of bitumen with higher viscosity, low-cost bitumen for pavement construction and the development of alternative materials that have a good rheological effect and have less negative impact on human health and the environment. The application of fibers in asphalt mixtures has been studied for the past few decades to improve pavement performance worldwide. This study was carried out on three types of bitumen modified with two types of fibers: brown recycled wool fibers (BRWF), which are locally available in the country, and polyester fibers (CPF), which are considered as waste. It was used to produce bitumen modified with fibers. The physical and rheological properties of modified bitumen were evaluated using traditional physical tests (penetration, softening point, and rotational viscosity tests) as well as dynamic shear rheometer (DSR) test. Compared to the original bitumen, the fiber reinforced bitumen had higher softening point, viscosity and composite modulus, but their penetration decreased. The results of the tests showed that the use of both types of fibers as modifiers for bitumen improves their performance at high temperature by increasing a performance grade (PG). Increasing bitumen stiffness is expected to increase pavement rutting resistance. Consequently, these fibers can be used as additives for bitumen and asphalt mixtures to increase their performance.

**Keywords:** Brown Recycled Wool Fibers, Polyester Fiber, Rutting, Bitumen, Modified Binder