

اثر لیگنین و روغن سویا بر خصوصیات رئولوژیکی قیر

علمی - پژوهشی

امین فرج اللهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
فرزین پورحیدری ممقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

صفحه ۲۷۶-۲۶۱

چکیده

در این مطالعه تلاش شده است تا بررسی شود که چگونه رفتارهای رئولوژیکی قیر با استفاده از لیگنین و روغن سویا تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در تحقیقات فعلی، لیگنین (۳٪، ۵٪، ۷٪ وزنی قیر) و روغن سویا (۵٪ وزنی قیر) برای اصلاح دو نوع قیر اصلی (AC 60-70 و AC 85/100) اضافه شد. ارزیابی عملکرد قیرهای مختلف با بررسی رفتار فیزیکی و رئولوژیکی آنها توسط آزمایشات درجه نفوذ، شکل‌پذیری، جاروب دامنه خطی، بازیابی خزش تنش چندگانه، رئومتر برشی دینامیکی، ویسکوزیته چرخشی و تست‌های نقطه نرمی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج رفتارهای رئولوژیکی نشان داد که استفاده از افزودنی لیگنین باعث افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ می‌شود. استفاده از لیگنین مقاومت در دمای پایین قیر را کاهش می‌دهد. در حالی که روغن مقاومت قیر را در دمای پایین بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش بازیابی خزش استرس چندگانه (MSCR) با افزودن لیگنین، افزایش دمای عملکرد بالای قیر بکر را در سطوح مختلف تنش نشان داد. در حالی که استفاده از روغن استحکام شیارشدگی نمونه را کاهش می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)، استفاده از افزودنی لیگنین خاصیت خستگی قیرها را کاهش می‌دهد. در حالی که روغن سویا آن را تقویت کرد.

واژه‌های کلیدی: عملکرد، قیر، لیگنین، روغن سویا، ضایعات

۱-مقدمه

نیست. همچنین برای تولید مخلوط آسفالت گرم، انرژی زیادی مصرف می‌شود و چندین گاز گلخانه‌ای و انتشار تولید می‌شود (Ge et al, 2019). در نتیجه، کارشناسان روسازی روی اصلاح پایه‌بندی‌ها برای بهبود عملکرد یا یافتن جایگزین بهتر تمرکز کردند. یکی از راه‌های تولید روسازی پایدار، استفاده از زیست توده به عنوان قیر معروف به آسفالت زیستی است که جایگزینی تجدیدپذیر در قیرهای استخراج شده از منابع غیر نفتی است. بخش عمده‌ای از زیست توده زباله نیاز به بازیافت دارد، بنابراین استفاده از یک تکنیک به طور گسترده

مخلوط آسفالتی گرم از قیر گرم و سنگدانه‌های گرم تشکیل شده است. با محدودیت نفت خام، قیمت قیر در سال‌های اخیر افزایش یافته است. با افزایش تردد وسایل نقلیه با بارهای سنگین و همچنین اثرات آب و هوا، خرابی‌های متعددی در روسازی‌های آسفالتی ایجاد شد. در نتیجه سالانه هزینه‌های هنگفتی برای ساخت، بازیافت و نگهداری روسازی‌ها صرف می‌شود (Ningyi et al, 2018; Zhang et al, 2019; Xu et al, 2017). همچنین، به عنوان قیر حاصل از منابع انرژی غیر قابل تجدید (نفت)، استفاده از قیر یک استراتژی پایدار

سنگدانه اعمال می‌شود. بنابراین باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی هوا می‌شود. سویا نوعی دانه است که حاوی مقدار زیادی پروتئین است که توسط انسان یا حیوان استفاده می‌شود.

دانه سویا ۲۱-۱۷ درصد روغن و ۴۶ درصد پروتئین دارد. انباشت روغن‌های زائد در یک سرزمین فضاها‌ی بزرگی را در جهان اشغال می‌کند. اگر محصول جانبی فرآیند سرخ کردن دانه سویا به درستی کنترل نشود، باعث آلودگی محیطی می‌شود. بنابراین استفاده از روغن‌های پسماند می‌تواند راهی پایدار برای مقابله با این موضوع باشد. محققان مختلف قبلاً تأثیر روغن‌های زباله آشپزخانه را در روسازی‌های آسفالتی احیا شده ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، آنها مطالعاتی را انجام داده‌اند که در آن از یک قیر زیستی استفاده شده است. تحقیقات متعددی در گذشته بر روی استخراج روغن زیستی از زیست توده از طریق چندین فرآوری و تأثیر روغن‌های زیستی بر عملکرد قیر انجام شده است. Xu و همکاران (Xu et al, 2017) اثرات لیگنین ضایعات چوب را بر روی خصوصیات رئولوژیکی و همچنین ضد پیری قیرها ارزیابی کردند.

قیر مبتنی بر دو محتوای لیگنین مختلف اصلاح شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های دمای بالا قیرها با استفاده از لیگنین بهبود یافته است. اثرات لیگنین بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی قیر توسط باتیستا و همکاران (Batista et al, 2017) ارزیابی شد. ویژگی‌های مقاومت در برابر پیری و درجه حرارت بالا و پایین قیرها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر پیری قیرهای اصلاح شده لیگنین بهبود یافته و قیر اصلاح شده دارای شاخص کربونیل کمتری است. همچنین اثرات لیگنین بر عملکرد قیرهای قدیمی اصلی و همچنین مخلوط‌ها توسط عرفات و همکاران (Arafat et al, 2019) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تحمل کرنش قیر اصلاح شده توسط لیگنین بیشتر از قیر اصلاح شده اصلی بود.

برای استفاده مجدد از آنها در نظر گرفته شده است (Gao et al, 2019). ضایعات روغن موتور و لیگنین به ترتیب دو نوع ضایعات و زیست توده‌های ذکر شده هستند.

انرژی زیست توده توجه بسیاری را در صنعت روسازی بین چندین انرژی تجدیدپذیر دیگر به خود جلب کرده است. به دلیل هزینه کم و بازده زیاد برخی از خاکسترهای زیست توده مانند گرد و غبار اره چوب، کاه غلات، چمن و ساقه ذرت که در سراسر جهان موجود است، می‌توان از آنها به عنوان افزودنی در تولید روسازی‌های مقاوم استفاده کرد. زیست توده را می‌توان به عنوان سوخت گازی، مایع و جامد استفاده کرد (Yguatyara e al, 2019).

لیگنین‌ها دسته‌ای از پلیمرهای آلی پیچیده هستند که یک ماده ساختاری مهم را در بافت‌های حمایتی گیاهان آوندی و برخی جلبک‌ها تشکیل می‌دهند. لیگنین در تشکیل دیواره سلولی، به ویژه در چوب‌ها و همچنین پوست، اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا سفتی می‌بخشد و به سادگی پوسیده نمی‌شود. لیگنین از پلیمرهای پیچیده‌ای است که از واحدهای مولکولی فنیل پروپان به شکل آمورف و با هولوسولوز در گیاهان در لایه‌ای در اطراف سلول‌ها مخلوط شده است. به دنبال سلول‌ها، لیگنین‌ها ترکیب معمولی اصلی در ساختارهای غیر چوبی و همچنین چوبی گیاهان هستند. چوب‌های خشک حاوی تقریباً ۲۵ درصد لیگنین هستند که در دیواره‌های سلولی و قسمت‌های بیرونی سلول‌ها قرار دارند. لیگنین‌ها به عنوان یک اتصال دهنده دیواره سلولی عمل می‌کنند و فیبرهای سلولی حاوی ماتریس را برای استحکام ساختار چوب به هم متصل می‌کنند. منابع لیگنین فراوان و عمدتاً غیر قابل مصرف هستند. چوب و پوست باقی مانده از صنعت چوب و همچنین ضایعات کشاورزی می‌توانند مقدار زیادی لیگنین تولید کنند. یک منبع کوچکتر اما در دسترس‌تر لیگنین، خمیر کاغذ و همچنین صنایع چوب است که ذخیره بزرگی از لیگنین است. محتوای لیگنین در انواع مختلف چوب از درختی به درخت دیگر و حتی در یک ناحیه از درخت در مقایسه با منطقه دیگر همان درخت متفاوت است (Lv et al, 2018). همچنین همانطور که قبلاً ذکر شد، با تولید مخلوط آسفالت داغ (HMA) انرژی زیادی به قیر و

۲- مصالح و روش تحقیق

۱-۲- قیر

قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ به عنوان قیر پایه استفاده شد که از پالایشگاه تهران، تهران، ایران تهیه شد. خواص قیر پایه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر

آزمایش	استاندارد	واحد	قیر ۶۰-۷۰	قیر ۸۵-۱۰۰
درجه نفوذ	ASTM D5	(0.1mm)	68	۹۲,۱
نقطه نرمی	ASTM D36	سانتی گراد	48	۴۵,۴
شکل پذیری	ASTM D113	سانتی متر	+100	۱۰۰
نقطه اشتعال	ASTM D92	سانتی گراد	305	۲۷۰
نقطه شعله وری	ASTM D70	سانتی گراد	318	۲۹۱
وزن مخصوص	ASTM D70	گرم بر سانتی متر	1.046	۱,۰۱۴۲

۲-۲- لیگنین

لیگنین از تراشه های ضایعات چوب که به عنوان اصلاح کننده زیستی استفاده می شد به دست آمد که ویژگی های آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات لیگنین

خصوصیات	نتایج
(%) درصد رطوبت	3.55%
(%) کربن	63.2%
(%) هیدروژن	5.9
(%) اکسیژن	29.3
(%) خاکستر	0.8%
مقدار Ph	7.5
وزن مولکولی	10350
رنگ	قهوه ای

۲-۳- روغن سویا

پیروی از روش سرخ کردن، واکنش های هیدرولیتیکی را به همراه دارد و در نتیجه، دی گلیسیرید و همچنین اسیدهای چرب آزاد تولید می شود و بنابراین شاخص اسیدی افزایش می یابد. همچنین، سفتی قیر افزایش می یابد و پایداری قیرها را بهبود می بخشد. خصوصیات روغن مصرفی در جدول ۳ آورده شده است.

روغن سویا مورد نیاز در این تحقیق از بازار خریداری شد. برای به دست آوردن روغن های باطله، روغن جدیدی سرخ کرده و روغن های سرخ شده را جمع آوری می کنند. پس از آن، روغن ها توسط فیلتر کاغذی تخلیه و فیلتر می شوند و ویژگی های فیزیکوشیمیایی روغن سویا در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که شاخص اسید روغن پسماند ۱۹۳ درصد بیشتر از روغن جدید است. متون نشان می دهد که

جدول ۳. خصوصیات روغن سویا

ویژگی‌ها	روغن سویا ضایعاتی
(meq/kg) نشانگر پراکسید	20.88
(40 °C) ویسکوزیته	71.36
(mg KOH/g) نشانه اسیدی	2.19
(mg I2/100g) نشانه یدی	60.45
(26 °C) نشانگر شکست	73.5

۲-۴- آماده سازی نمونه‌ها

برای تحقیقات استفاده شد. برای تهیه یک قیر اصلاح شده همگن، روغن سویا (۵ درصد وزنی قیر) به تدریج به قیر اضافه شد و به مدت ۲۰ دقیقه در یک میکسر برش بالا با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. کدهای چندین مخلوط حاوی افزودنی‌های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است.

برای تهیه قیر اصلاح شده، قیر اصلی (۸۰۰ گرم) در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد در یک ظرف فولادی حرارت داده شد تا مایع شود و سپس لیگنین (۳٪، ۵٪ و ۷٪ وزنی آسفالت اصلی) در دور بالا ۶۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. میکسر برشی سرعتی به مدت ۴۰ دقیقه مخلوط گردید. روغن زائد با استفاده از روش سرخ کردن مکرر تولید و سپس جمع‌آوری و

جدول ۴. کدگذاری نمونه‌های مختلف

No	virgin binder	Lignin	soybean oil	sample ID
1		0	0	A
2		0	5	AL0S5
3		3	0	AL3S0
4	60-70	5	0	AL5S0
5		7	0	AL7S0
6		3	5	AL3S5
7		5	5	AL5S5
8		7	5	AL7S5
9		0	0	B
10		0	5	BL0S5
11		3	0	BL3S0
12	85-100	5	0	BL5S0
13		7	0	BL7S0
14		3	5	BL3S5
15		5	5	BL5S5
16		7	5	BL7S5

۳- برنامه آزمایشی

۳-۱- آزمایشات رئولوژیکی و فیزیکی قیر

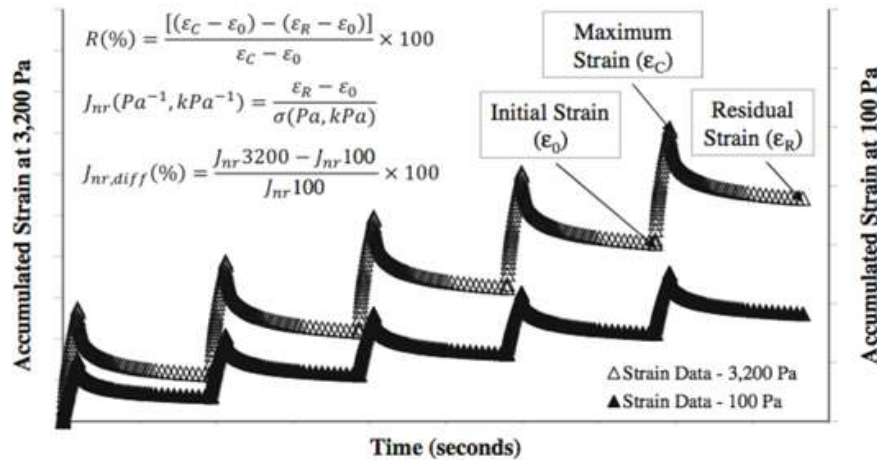
برای ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیرها، آزمون RV^۲ و DSR^۲ انجام شد. رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها با استفاده از آزمون رئومتر برشی دینامیکی که در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه (۱/۵۹ هرتز) به ترتیب در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و ۶۴ درجه سانتی گراد اجرا شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۲- تست پایداری ذخیره سازی

برای اطمینان و بررسی اینکه آیا نمونه‌ها مستعد جداسازی هستند، آزمایش پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا طبق ASTM-D5892-96a انجام شد.

۳-۳- تست بازیابی خزش چند تنش^۴ (MSCR)

آزمون MSCR برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش بر رفتار دمای بالا قیرهای پیر شده از طریق روش RTFO^{۱۱} بر اساس AASHTO TP 70 اجرا شد. برای هر نوع متغیر، دو نمونه ساخته شد. شماتیک انجام تست MSCR در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل نتایج MSCR از معادلات زیر استفاده شد.



شکل ۱. خروجی آزمایش MSCR

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\text{Percentage recovery} = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (2)$$

$$J_{nr} = \text{ave} \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (3)$$

۳-۴- تست LAS^۵

مقاومت در برابر خستگی قیر با آزمون LAS ارزیابی شد. مقدار تنش برشی توسط AASHTO TP101-14 به عنوان نقطه شکست پیشنهاد شد. آزمایش بر اساس AASHTO TP101-14 انجام شد. معادلات (۴) - (۶) برای ارزیابی تجمع خرابی استفاده شد. حداکثر

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\alpha/1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\alpha/1+\alpha} \quad (۴)$$

D(t) = خسارت انباشته شده را نشان می‌دهد

t = زمان ثانیه

γ 0 = کرنش اعمال شده (%)

C_t = G*(t)/G*، پارامتر قابلیت اطمینان، اولیه

G* = مراجعه کنید (MPa) به مدول پیچیده =

معادله زیر می‌تواند رابطه بین آسیب قیر و پارامتر قابلیت اطمینان را نشان دهد:

$$C_t = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (۵)$$

C₀، C₁ و C₂ ضرایب منحنی هستند که بر روی نتایج منطبق می‌شوند.

همچنین مقدار آسیب در نقطه شکست (D_f) محاسبه شد:

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_{peak\ stress}}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (۶)$$

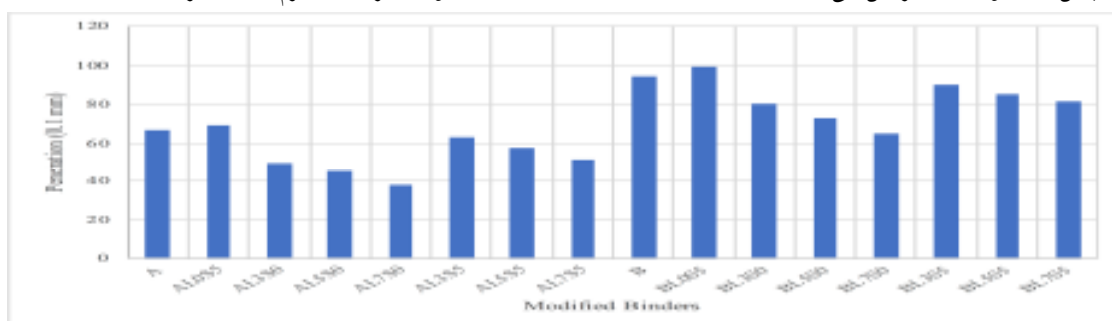
عمر خستگی قیرها از طریق رابطه زیر ارزیابی شد:

$$N_f = A \times (\gamma_{max})^{-B} \quad (۷)$$

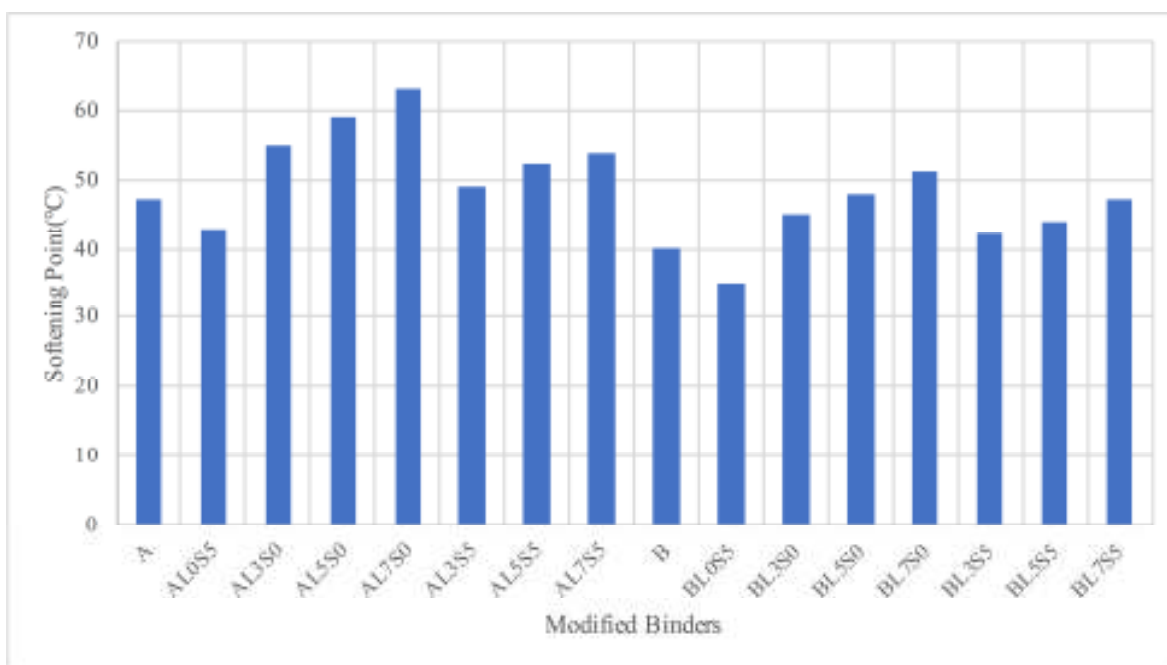
۴-نتایج

شکل ۲ و ۳ درجه نفوذ و نقاط نرم شدن قیر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از لیگنین باعث افزایش نقاط نرم شدن و کاهش درجه نفوذ می‌شود. دلیل آن ممکن است به دلیل سفت شدن قیر باشد. ممکن است به این دلیل باشد که لیگنین اجزای سبک قیر را جذب می‌کند و سفتی پایه قیر و همچنین ویسکوزیته را افزایش می‌دهد (Diebold et al, 1999). با توجه به نتیجه، استفاده از روغن منجر به افزایش نفوذ و همچنین کاهش نقاط نرمی در قیر اصلی می‌شود که شاید به دلیل کاهش سفت شدن قیر با استفاده از روغن باشد. بر اساس نتایج، نمونه‌های ساخته شده توسط قیر ۸۵-۱۰۰ به دلیل سفتی کمتر قیر ۸۵-۱۰۰ در برابر قیر ۶۰-۷۰ دارای درجه نفوذ بیشتر و نقاط نرم شدن کمتری هستند.

شکل ۲. نتایج آزمایش درجه نفوذ



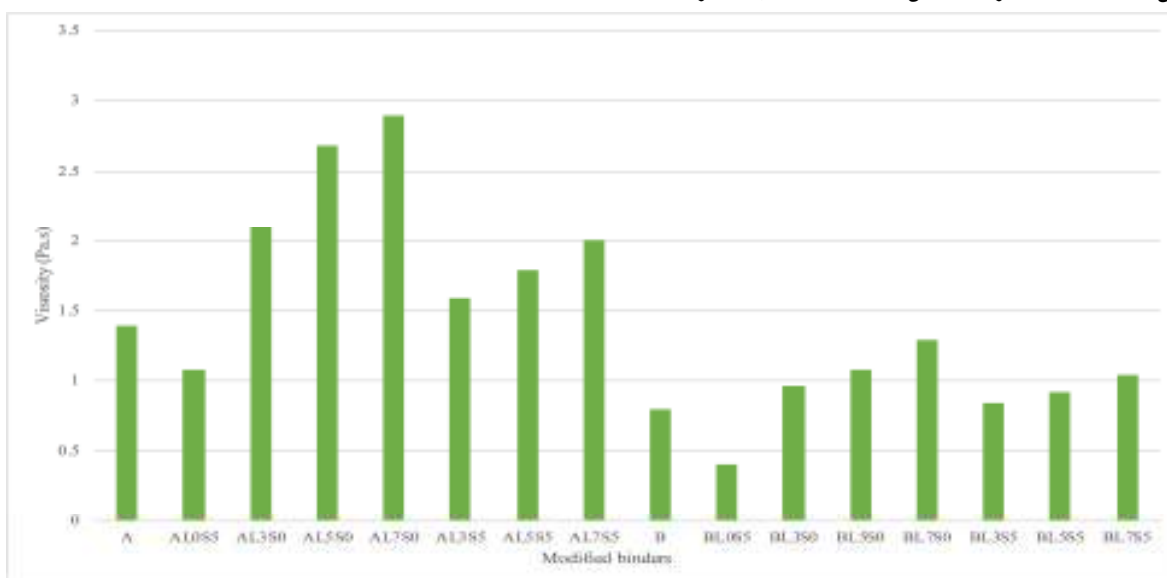
شکل ۲. نتایج آزمایش درجه نفوذ



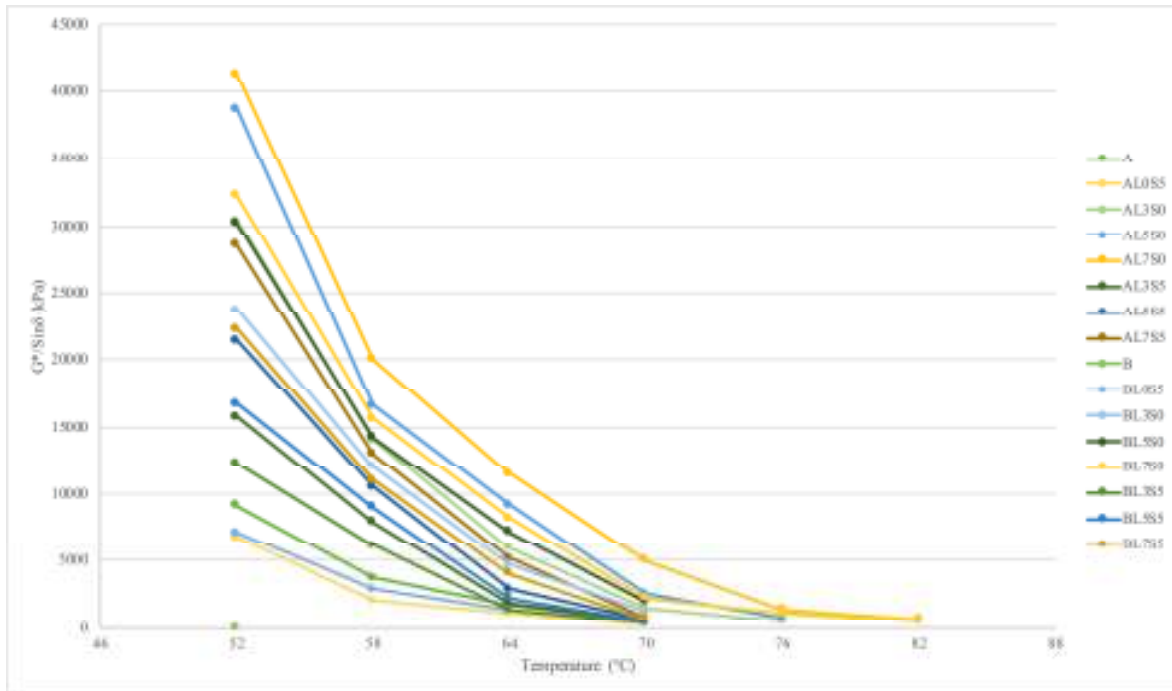
شکل ۳. نتایج آزمایش نقطه نرمی

استاندارد است. همچنین بر اساس نتایج، روغن سویا ۵ درصد منجر به کاهش ویسکوزیته و کاهش سفتی قیر می‌شود. نتایج نشان داد استفاده از روغن سویا در قیرهای اصلاح شده لیگنین منجر به کاهش ویسکوزیته می‌شود که نشان می‌دهد روغن سویا سفت شدن قیرهای اصلاح شده لیگنین را کاهش می‌دهد.

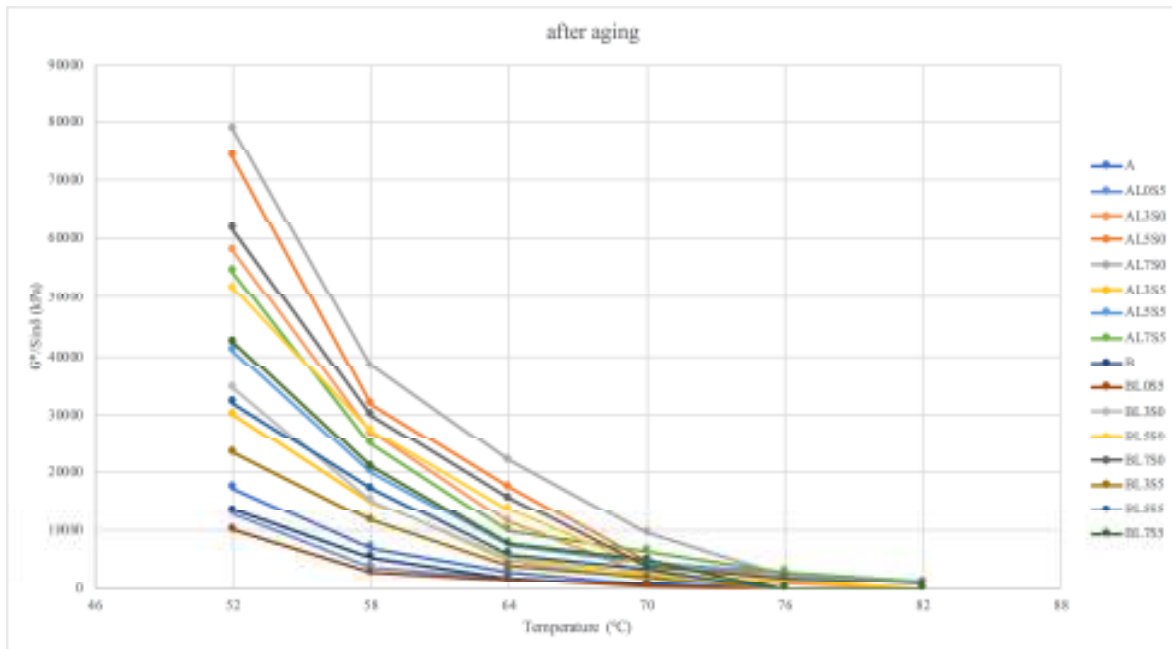
نتایج ویسکوزیته قیرهای مختلف در ۱۳۵ در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش درصد لیگنین، ویسکوزیته افزایش می‌یابد. با توجه به نتیجه، افزودن لیگنین منجر به سفت شدن قیر پایه می‌شود. با افزایش درصد لیگنین و ویسکوزیته و در نتیجه افزایش دمای تراکم و اختلاط در مخلوط، نتیجه نشان می‌دهد که اضافه کردن لیگنین ۷ درصد مطابق با الزامات



شکل ۴. نتایج ویسکوزیته قیر



(الف)



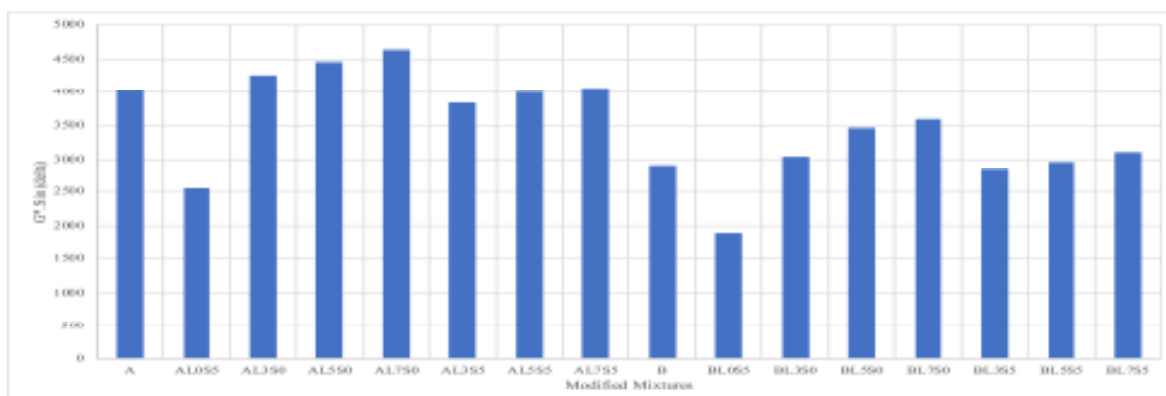
(ب)

شکل ۵. نتایج شیارشدگی قیر: الف) قبل از پیرشدگی (ب) بعد از پیرشدگی

با لیگنین‌های بیشتر ممکن است نشان دهنده پایداری بیشتر در هنگام پیری باشد، به این معنی که استفاده از این افزودنی در آسفالت می‌تواند واکنش اکسیداسیون را که در RTFO اتفاق افتاده است به تعویق بیندازد. این می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که این افزودنی دارای گروه عاملی متوکسی و همچنین هیدروکسیل است و می‌تواند رادیکال‌های آزاد ایجاد شده در هنگام واکنش‌های اکسیداسیون در آسفالت‌ها را خنثی کند. علاوه بر این، نتایج توسط (Xu et al, 2017) از طریق مقادیر اندازه‌گیری شده ساختارهای کربونیل (C=O) که توسط طیف‌سنجی فرسرخ تبدیل فوریه برای آسفالت‌های قدیمی و همچنین پیر نشده کشف شد، تأیید شد.

مقادیر کمتر $G^*.sin \delta$ نشان دهنده استحکام بیشتر در قیرها در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی است. سیستم PG مقدار $G^*.sin \delta$ را به حداکثر ۵۰۰۰ کیلو پاسکال در قیرهای با سن PAV محدود می‌کند. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۶، استفاده از روغن باعث افزایش مقاومت ترک خوردگی ناشی از خستگی در قیرها شد. به همین ترتیب، استفاده از لیگنین باعث کاهش مقاومت در برابر خستگی در قیرها شد. با افزودن درصد لیگنین، مقاومت به خستگی قیرها کاهش می‌یابد، شاید به این دلیل باشد که افزودن لیگنین باعث سفت شدن قیرها و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر خستگی می‌شود. نتایج نشان داد که افزودن روغن به قیرهای اصلاح‌شده لیگنین باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی در قیرها می‌شود، زیرا روغن باعث کاهش ویسکوزیته لیگنین قیرهای اصلاح شده و کاهش سفتی قیرها می‌شود.

برای داشتن مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل دائمی، قیرها باید بالاتری داشته باشند. سیستم PG توصیه می‌کند که قیرها باید مقادیر $G^*/sin \delta$ بالاتر از ۱ و ۲،۲ کیلو پاسکال برای در نظر گرفتن قیر رفتار شیار داشته باشند. شکل ۵ $G^*/sin \delta$ همه قیرها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که لیگنین مقاومت شیارشدگی قیرها را هم در نمونه‌های پیر و هم بدون پیری بهبود می‌بخشد. ممکن است به این دلیل باشد که افزودن لیگنین منجر به سفتی قیر می‌شود. در نتیجه مقاومت شیارشدگی در قیرها افزایش می‌یابد. همچنین افزودن روغن به دلیل کاهش سفتی قیر، ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد. این نتایج با تحقیقات انجام شده قبلی همخوانی دارد (Norgbey et al, 2020; Gao et al, 2019; Al-Sabaeei et al, 2020). نتایج نشان داد که قیرهای اصلاح شده توسط لیگنین و روغن دارای ضریب شیارشدگی بالاتری نسبت به قیر اصلی هستند. بنابراین، استفاده از لیگنین و روغن با هم برای اصلاح قیرها تأثیر مثبتی بر مقاومت شیارشدگی قیر دارد. علاوه بر این، استفاده از لیگنین ۳، ۵، و ۷ درصد منجر به افزایش $G^*/sin \delta$ به میزان ۳،۶، ۵،۴ و ۷ برابر بیشتر از قیر پایه شد. همانطور که شکل ۵ (ب) نشان می‌دهد، قیرهای با پیرشدگی RTFO دارای مقدار $G^*/sin \delta$ بالاتری هستند ممکن است به این دلیل باشد که با پیر شدن قیرها، عناصر فرار چسبنده آسفالت تبخیر شده و مواد آروماتیک و رزین‌ها به آسفالتین تبدیل می‌شوند. از سوی دیگر، میزان افزایش $G^*/sin \delta$ قیرهای حاوی لیگنین کمتر است. این ممکن است تحت تأثیر مقدار لیگنین باشد. مقدار بیشتر لیگنین ممکن است منجر به مدول بیشتر در قیرهای اصلاح شده با لیگنین در حالت پایه شود و عامل شیارشدن لیگنین در آسفالت‌های اصلاح شده

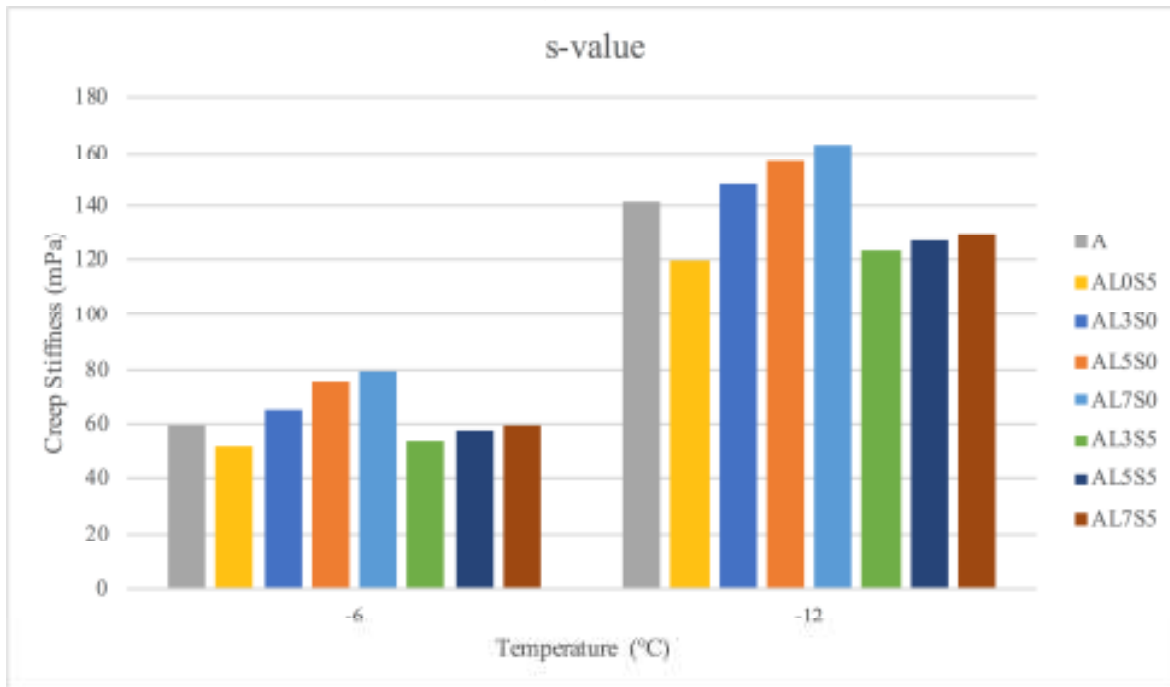


شکل ۶. نتایج آزمایش خستگی قیر

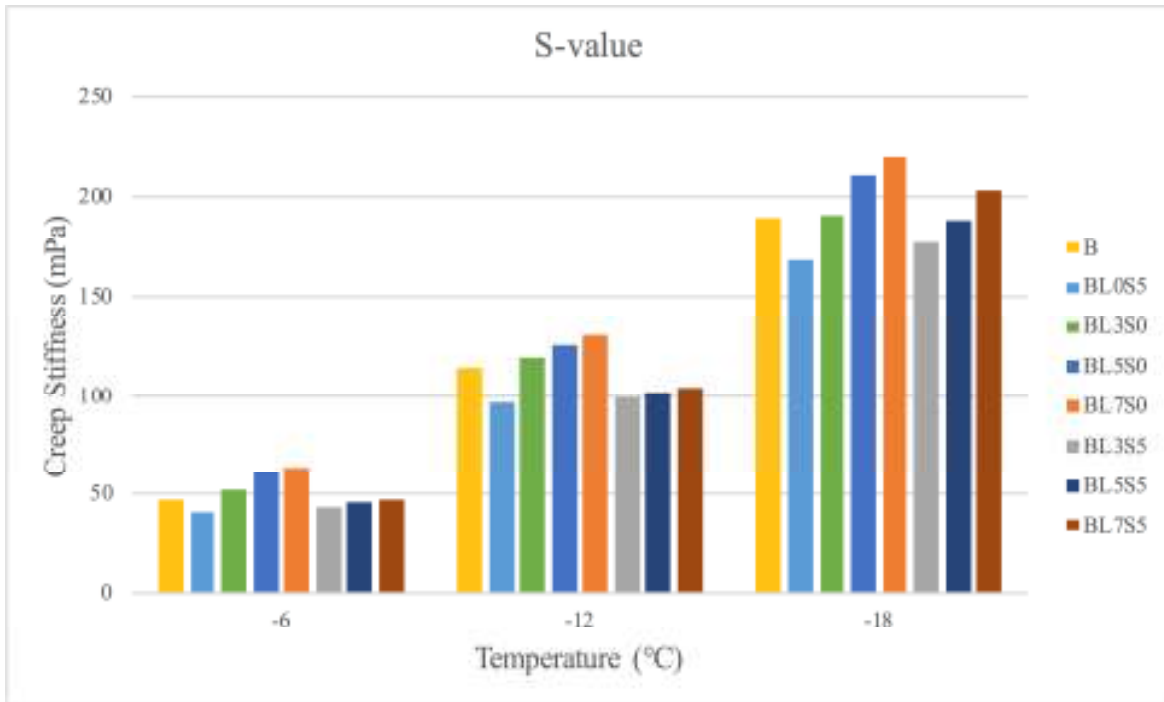
آزمایش BBR برای ارزیابی ویژگی‌های دمای پایین در قیر با شرایط پیرشدگی PAV انجام شد. شکل ۷ سفتی انواع قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین منجر به افزایش سفتی در قیرها می‌شود. با استفاده از درصد‌های بالاتر لیگنین به قیر اصلی، سفتی خزش افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از روغن باعث کاهش سفتی قیر می‌شود. بر اساس نتایج، قیرهای اصلاح شده با لیگنین حاوی روغن سفتی خزشی کمتری نسبت به قیر اصلی دارند. روغن سفتی قیرهای اصلاح شده لیگنین را کاهش داد. نتایج نشان داد که افزودن لیگنین ۳٪، ۵٪ و ۷٪ منجر به افزایش سفتی در حدود ۸٪، ۲۶٪ و ۳۳٪ می‌شود. استفاده از روغن منجر به کاهش سفتی تا ۱۳٪ می‌شود. همچنین افزودن روغن به قیرهای اصلاح شده لیگنین ۳، ۵، و ۷ درصد منجر به کاهش سفتی به میزان ۱۰، ۳، ۳ و ۰ درصد می‌شود. نتایج نشان داد که تمام قیرهای اصلاح شده ساخته شده توسط قیر نوع B دارای ترک در دمای پایین بهتری نسبت به قیرهای ساخته شده توسط قیر نوع A هستند. چسب‌های نوع B تقریباً ۲۰٪ سفتی کمتری نسبت به کلاسورهای نوع A دارند.

شکل ۸ مقدار m را در قیرهای اصلاح شده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین این مقدار را کاهش می‌دهد. با افزایش درصد لیگنین، m -value کاهش یافت، که نشان می‌دهد قیرهای حاوی لیگنین در جذب تنش‌های حرارتی ضعیف‌تر هستند و زمان بیشتری طول می‌کشد تا قیرها پس از برخورد با تنش‌ها به حالت پایه خود برگردند. علاوه بر این، افزودن روغن منجر به افزایش m -value می‌شود. بنابراین روغن باعث کاهش سفتی قیر می‌شود و آن را در برابر ترک‌های حرارتی نرم و انعطاف پذیرتر می‌کند. قیرهای اصلاح شده توسط لیگنین و روغن نیز دارای m -value کمتری نسبت به قیر پایه هستند، که نشان می‌دهد این قیرها مقاومت در برابر ترک در دمای پایین بهتری دارند، به این معنی که در دماهای پایین، اثرات نرم‌کنندگی WEO در مقایسه با اثرات نرم‌کننده لیگنین قابل توجه‌تر است.

شکل ۸ مقدار m را در قیرهای اصلاح شده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین این مقدار را کاهش می‌دهد. با افزایش درصد لیگنین، m -value کاهش یافت، که نشان می‌دهد قیرهای حاوی لیگنین در جذب تنش‌های حرارتی ضعیف‌تر هستند و زمان بیشتری طول می‌کشد تا قیرها پس از برخورد با تنش‌ها به حالت پایه خود برگردند. علاوه بر این، افزودن روغن منجر به افزایش m -value می‌شود. بنابراین روغن باعث کاهش سفتی قیر می‌شود و آن را در برابر ترک‌های حرارتی نرم و انعطاف پذیرتر می‌کند. قیرهای اصلاح شده توسط لیگنین و روغن نیز دارای m -value کمتری نسبت به قیر پایه هستند، که نشان می‌دهد این قیرها مقاومت در برابر ترک در دمای پایین بهتری دارند، به این معنی که در دماهای پایین، اثرات نرم‌کنندگی WEO در مقایسه با اثرات نرم‌کننده لیگنین قابل توجه‌تر است.

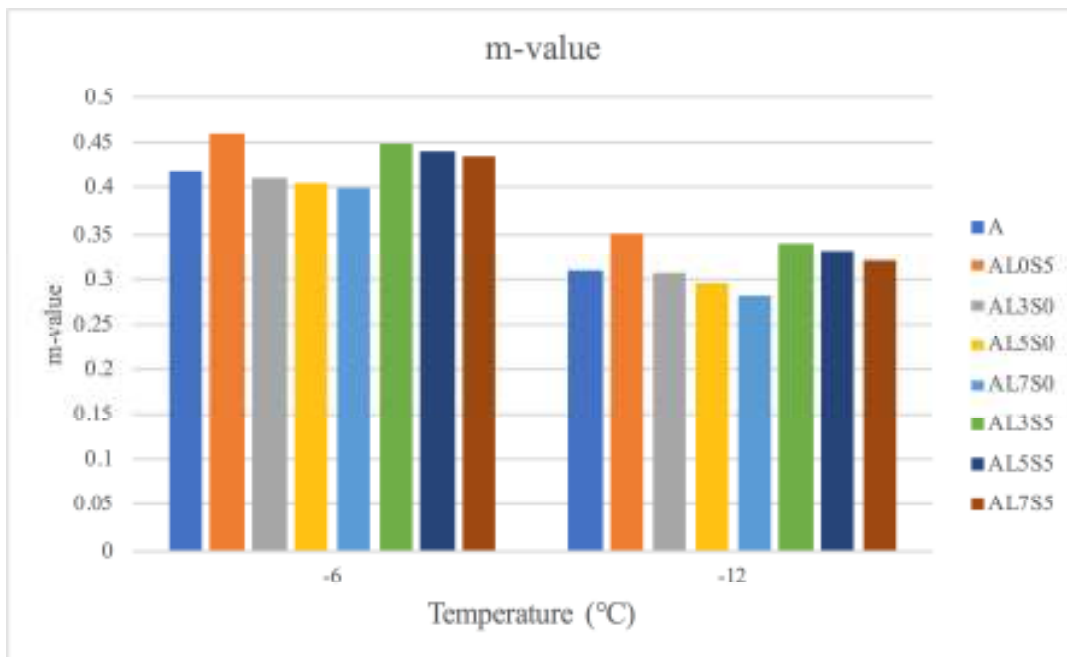


(الف)

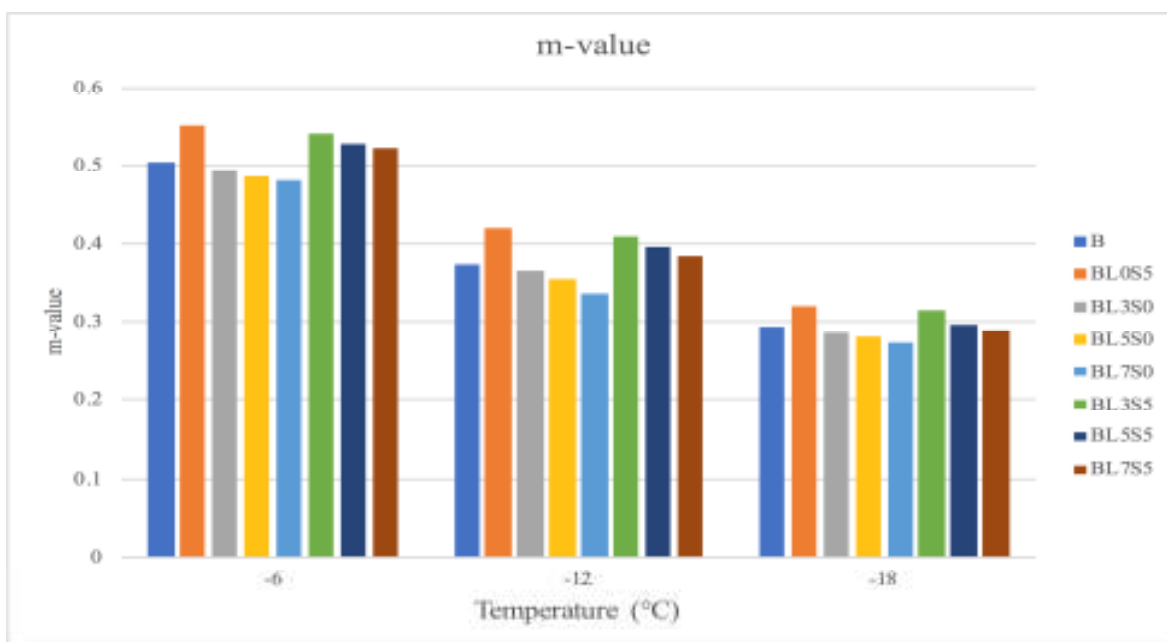


(ب)

شکل ۷. سختی خزشی نمونه ها: الف) قیر نوع A ب) قیر نوع B



(الف)



(ب)

شکل ۸ مقدار m نمونه‌ها: الف) قیر نوع A ب) قیر نوع B

جدول ۵. نتایج آزمایش MSCR

Bitumen	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnrdiff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
A	4.0	0.4	2.10	2.45	16.67
AL0S5	3.2	0.2	2.20	2.69	22.27
AL3S0	5.0	0.6	1.90	1.79	11.34
AL5S0	6.0	1.4	1.50	1.34	13.78
AL7S0	7.0	1.9	0.90	1.10	15.42
AL3S5	3.8	0.4	2.00	2.50	20.75
AL5S5	5.1	1.0	1.80	1.90	15.23
AL7S5	6.1	1.5	1.60	1.46	14.63
B	2.20	0.10	3.50	3.74	13.00
BL0S5	1.80	0.05	3.80	3.98	18.43
BL3S0	3.65	0.20	3.10	3.10	14.56
BL5S0	4.20	0.28	2.87	2.85	15.87
BL7S0	5.50	0.34	2.50	2.34	17.39
BL3S5	3.00	0.14	3.67	3.79	18.20
BL5S5	3.80	0.22	3.40	3.40	17.30
BL7S5	4.70	0.29	3.00	3.00	16.10

مقاومت بهتری در برابر شیار شدن دارد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنین باعث کاهش ارزش Jnr قیر پایه می‌شود که منجر به ایجاد قیرهایی با مقاومت شیاردار بهتر می‌شود.

Jnr و R برای همه قیرها به منظور اندازه‌گیری مقاومت شیارشدگی آنها تعیین شد. جدول ۹ نتیجه $MSCR$ را در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. قیر با Jnr کمتر و R بیشتر

است. درصد تفاوت در انطباق خزش غیر قابل بازیافت (Jnr-diff) نیز برای بررسی حساسیت قیرها به سطح تغییرات تنش در قیرها در حالی که از ۰,۱۰۰ به ۳,۲ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد، ارایه شده است. این ضریب به ۷۵ درصد محدود شده است. اگر از حد مجاز فراتر رود، حساسیت به تنش در قیرهای آسفالت را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارایه شده در جدول ۹، مقادیر Jnr-diff در قیرهای اصلاح شده لیگنین کمتر از قیر اصلی بود که نشان دهنده حساسیت استرس کمتر آنها نسبت به قیر اصلی بود. در حالی که افزودن روغن منجر به افزایش پارامتر Jnr-diff می‌شود. نتایج آزمایش MSCR با مقالات منتشر شده مرتبط مطابقت دارد که در آنها گزارش شده است که افزودن لیگنین مقاومت شیاردار را افزایش می‌دهد و روغن آن را کاهش می‌دهد. جداول ۶ و ۷ نتایج آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات قیر باعث کاهش تنش‌های برشی در تنش‌های بالا می‌شود. جدول ۱۰ نتایج VECD را در قیرها نشان می‌دهد. استفاده از مواد افزودنی به ترتیب باعث افزایش و کاهش پارامترهای C1 و C2 شد. در بین نمونه‌ها، نمونه BLOS5 دارای بیشترین پارامتر C1 و کمترین پارامتر C2 بود. عمر خستگی در قیرها در سطوح پایین و بالای کرنش در جدول ۱۱ نشان داده شده است. ممکن است به این دلیل باشد که روغن افزودنی سفتی قیر را کاهش می‌دهد. همچنین افزودن لیگنین باعث کاهش عمر خستگی در قیرها می‌شود. با افزایش درصد لیگنین، عمر خستگی کاهش می‌یابد. دلیل این امر با افزودن لیگنین است که سفتی قیر را افزایش می‌دهد.

همانطور که درصد لیگنین افزایش می‌یابد، Jnr کاهش می‌یابد، مطابق با نتایج به دست آمده توسط پارامتر شیار SHRP⁶. ممکن است به این دلیل باشد که با استفاده از لیگنین سفتی قیر افزایش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، افزودن روغن منجر به افزایش مقدار Jnr می‌شود که باعث کاهش مقاومت شیارشدگی قیرها می‌شود، زیرا افزودن روغن باعث کاهش ویسکوزیته و سفتی قیر می‌شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که استفاده از روغن در قیرهای اصلاح شده با لیگنین باعث کاهش Jnr قیرها شد. همانطور که واضح است، استفاده از لیگنین منجر به افزایش ارزش R٪ می‌شود. همانطور که رزبل نشان داد، با استفاده از لیگنین، بازیابی قیر افزایش یافت. قیرهای با مقدار R٪ کمتر مقاومت بهتری در برابر شیار شدن دارند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن روغن باعث کاهش مقدار R٪ می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که روغن باعث کاهش مقاومت قیر در برابر شیار شدگی می‌شود. افزودن روغن به قیرهای اصلاح شده لیگنین باعث کاهش ارزش R٪ در قیرهای اصلاح شده لیگنین می‌شود. به طور کلی، نمونه AL3S5 فقط دارای ارزش R٪ کمتری نسبت به قیر اصلی است، در حالی که نمونه‌های AL5S5 و AL7S5 دارای ارزش R٪ بالاتری هستند که نشان می‌دهد این قیرها مقاومت شیاردار بهتری دارند و نشان می‌دهد که قیر L10W4 به دلیل ۱۰٪ مقدار لیگنین می‌تواند خنثی کند. اثرات نرم کنندگی WEO⁷ در دمای بالا و افزایش عملکرد قیر تا تغییر شکل‌های پایدار. نتایج نشان داد که قیرهای حاوی قیر نوع B دارای ارزش R٪ کمتری نسبت به کلاسورهای حاوی نوع یک هستند. بنابراین، مقاومت شیارشدگی قیرهای حاوی نوع B کمتر از نوع A

جدول ۶. پارامترهای خستگی

Bitumen	C ₀	C ₁	C ₂
A	1	0.069	0.766
AL0S5	1	0.070	0.756
AL3S0	1	0.072	0.777
AL5S0	1	0.087	0.781
AL7S0	1	0.089	0.797
AL3S5	1	0.086	0.799
AL5S5	1	0.100	0.716
AL7S5	1	0.112	0.759
B	1	0.148	0.728
BLOS5	1	0.153	0.613

BL3S0	1	0.139	0.716
BL5S0	1	0.147	0.896
BL7S0	1	0.133	0.898
BL3S5	1	0.132	0.923
BL5S5	1	0.127	1.138
BL7S5	1	0.122	1.092

جدول ۷. عمر خستگی نمونه‌ها

Bitumen	2.5% Nf	5% Nf
A	3500	853
AL0S5	3700	1167
AL3S0	3000	823
AL5S0	2500	792
AL7S0	2000	753
AL3S5	3450	858
AL5S5	2790	820
AL7S5	2464	775
B	7000	1200
BL0S5	7450	1600
BL3S0	6580	1120
BL5S0	6010	1080
BL7S0	5369	1000
BL3S5	6850	1190
BL5S5	6040	1135
BL7S5	5700	1048

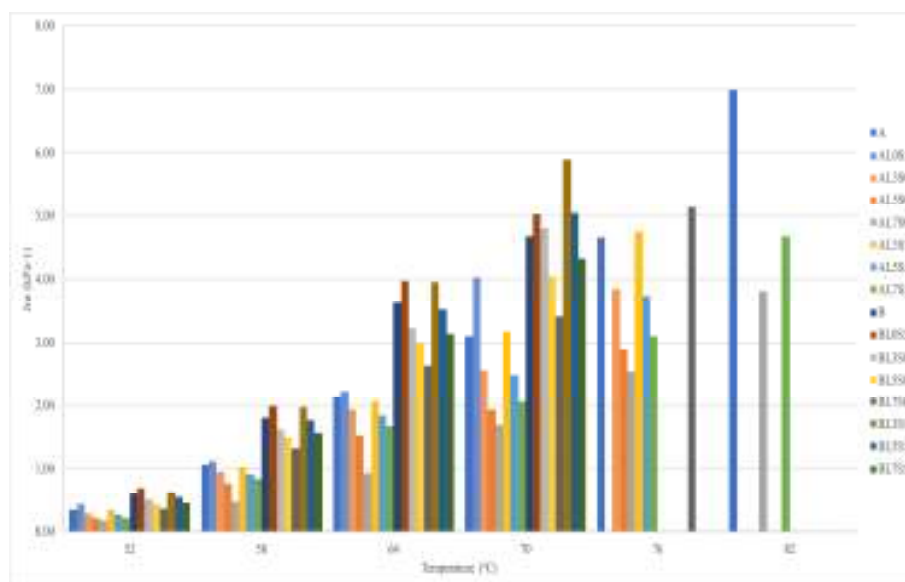
۴-۲- طبقه بندی قیرها براساس درجه عملکرد و تست تنش خزش و بازیابی چندگانه

پایین در قیرها به میزان ۱ درجه می‌شود. همچنین افزودن روغن باعث افزایش رفتار دمای پایین در قیرها با برآمدگی درجه یک شد و آن را از ۱۶- به ۲۲- تغییر داد. در نمونه‌های حاوی قیر نوع B، افزودن روغن منجر به بهبود دمای پایین با برآمدگی درجه یک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین ۳ و ۵ درصد تأثیری بر رفتارهای دمای پایین قیر ندارد، در حالی که لیگنین ۷ درصد منجر به کاهش رفتارهای دمای پایین تا یک درجه می‌شود. نتایج نشان داد که افزودن روغن به قیر اصلاح شده لیگنین ۳ درصد دمای پایین را یک درجه افزایش می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که اثر افزودن روغن بیشتر از اثر سفت کنندگی لیگنین است. شکل ۹ نتایج را در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

برای تعریف دماهای با عملکرد پایین در قیرها اعمال می‌شود. نتایج جدول ۸ نشان داد که استفاده از لیگنین ۳٪ و ۷٪ باعث تغییر عملکرد دمای بالا در قیر اصلی به ترتیب درجه یک و دو شد. علاوه بر این، افزودن روغن به قیر آسفالت هیچ تغییری در عملکرد دمای بالا ندارد. نمونه‌های حاوی قیر نوع B دارای درجه PG پایین تری نسبت به نوع A هستند. این به این دلیل است که نمونه‌های نوع B نرم تر از نمونه‌های نوع A هستند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن روغن در قیرهای اصلاح شده با لیگنین، اگرچه PG قیرها یکسان است، اما قیرهای اصلاح شده با لیگنین به دلیل دمای شکست بالاتر، مقاومت شیاردار بالاتری داشتند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنین ۳ درصد تأثیری بر رفتار دمای پایین قیر ندارد. در حالی که افزودن لیگنین ۵ و ۷ درصد منجر به کاهش رفتارهای دمای

جدول ۸. طبقه بندی قیرها

Asphalt binders	PG grading			MSCR grading		
A	64-22	64S-22	64H-22	-	-	-
AL0S5	58-22	58S-22	58S-22	52H-22	52V-22	-
AL3S0	70-22	70S-22	64S-22	58H-22	52E-22	-
AL5S0	76-16	70S-16	64S-16	58V-16	52E-16	-
AL7S0	76-16	70S-16	64S-16	58V-16	52E-16	-
AL3S5	70-22	70S-22	64H-22	58V-22	52E-22	-
AL5S5	76-22	76S-22	70S-22	64H-22	58V-22	52E-22
AL7S5	76-22	76S-22	70H-22	64H-22	58E-22	52E-22
B	58-22	76S-22	70H-22	64V-22	58E-22	52E-22
BL0S5	58-28	76S-28	70S-28	64H-28	58V-28	52E-28
BL3S0	64-22	76S-22	70S-22	64H-22	58V-22	52E-22
BL5S0	70-22	76S-22	70S-22	64H-22	58V-22	52E-22
BL7S0	70-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
BL3S5	70-28	76S-28	70H-28	64H-28	58V-16	52E-16
BL5S5	70-22	76S-22	70H-22	64V-22	58V-22	52E-22
BL7S5	70-22	76S-22	70H-22	64V-22	58V-22	52E-22



شکل ۹. نتایج Jnr در دماهای مختلف

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمایش قیر معمولی، استفاده از لیگنین باعث افزایش نقاط نرم شدن و کاهش درجه نفوذ می شود. دلیل آن ممکن است به دلیل سفت شدن قیر و اثر سفت شدن لیگنین در قیر پایه باشد. همچنین افزودن سرب روغن برای افزایش نفوذ

هدف این مقاله ارزیابی روش بررسی اثرات لیگنین و همچنین روغن بر رفتارهای رئولوژیکی قیر است. برای ارزیابی و اندازه گیری رفتار رئولوژیکی انجام شد. همچنین تست های LAS، MSCR و DSR انجام شد. نتیجه گیری حاصل شده به شرح ادامه است.

هنگام واکنش‌های اکسیداسیون در آسفالت‌ها را خنثی کند. علاوه بر این، از طریق مقادیر اندازه‌گیری شده ساختارهای کربونیل (C=O) که توسط طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری به برای آسفالت‌های قدیمی و همچنین پیر نشده کشف شد، تأیید شد.

بر اساس نتایج آزمایش MSCR، قیرهای حاوی لیگنین دارای مقادیر Jnr کمتر و R% بالاتری بودند. در حالی که قیرهای اصلاح شده با روغن Jnr بالاتر و R% کمتری دارند.

بر اساس نتایج، استفاده از لیگنین ۳٪ و ۷٪ عملکرد درجه حرارت بالا کلاسورهای اصلی را به ترتیب با درجه ۱ و ۲ تغییر داد. علاوه بر این، افزودن روغن به قیر آسفالت هیچ تغییری در عملکرد دمای بالا ندارد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنین ۳ درصد تأثیری بر رفتارهای دمای پایین قیر ندارد. در حالی که افزودن لیگنین ۵٪ و ۷٪ منجر به کاهش یک درجه رفتارهای دمای پایین در قیرها می‌شود. افزودن روغن به دلیل اثر نرم‌کنندگی باعث بهبود رفتارهای دمای پایین در قیرها شد.

و همچنین کاهش نقاط نرم شدن در قیر اصلی، ممکن است به دلیل کاهش سفت شدن قیر با استفاده از روغن باشد.

نتایج نشان داد که لیگنین مقاومت شیارشدگی قیرها را در نمونه‌های کهنه و قدیمی بهبود می‌بخشد. ممکن است به این دلیل باشد که افزودن لیگنین منجر به سفت شدن قیر می‌شود. در حالی که افزودن روغن باعث کاهش عملکرد شیار شدن می‌شود. قیرهای با سن RTFO دارای مقدار $G^*/\sin \delta$ بالاتری بودند ممکن است به این دلیل باشد که با پیر شدن قیرها، عناصر فرار قیر آسفالت تبخیر شده و مواد آروماتیک و رزین‌ها به آسفالتین تبدیل می‌شوند. نتایج نشان داد که قیرهای اصلاح شده توسط لیگنین و روغن دارای ضریب شیارشدگی بالاتری نسبت به قیر اصلی هستند. بنابراین افزودن لیگنین و روغن با هم برای اصلاح قیرها اثرات مثبتی بر مقاومت شیاردار در قیرها دارد. استفاده از لیگنین در آسفالت می‌تواند واکنش اکسیداسیون را که در آسفالت‌ها اتفاق می‌افتد در حین پیری RTFO به تعویق بیندازد. این می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که این افزودنی دارای گروه عاملی متوکسی و همچنین هیدروکسیل است و می‌تواند رادیکال‌های آزاد ایجاد شده در

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Hot Mix Asphalt
- 2-Rotational Viscosity
- 3-Dynamic Shear Rheometer
- 4-Multiple Stress Creep Recovery Test
- 5-Linear Amplitude Sweep Test
- 6- Strategic Highway Research Program
- 7-Waste Engine Oil

performance of polyurethane rubber particle mixture", Construction and building materials 224, pp.29-39.

-Gao, J., H. Wang, C. Liu, D. Ge, Z. You, M. Yu, (2020), "High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder, Constr. Build.", Mater. 230.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063>.

-Ge, Dongdong, Zhanping You, Siyu Chen, Chaochao Liu, Junfeng Gao, and Songtao Lv. (2019), "The performance of asphalt binder

-Al-Sabaei., A.M., M.B.Napiah, M.H.Sutanto, W.S.Alaloul, A.Usman, (2020), "Asystematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions", J. Cleaner Prod. 249. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119357.

-Diebold, James P., (1999), "A review of the chemical and physical mechanisms of the storage stability of fast pyrolysis bio-oils".

-Gao, Junfeng, Hainian Wang, Jiakang Chen, Xianwei Meng, and Zhanping You, (2019), "Laboratory evaluation on comprehensive

- Xu, Guangji, Hao Wang, and Hongzhou Zhu., (2017), "Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin", *Construction and Building Materials* 151, pp.801-808.
- Yguatyara de Luna, Machado, Ponte Marcelo Rodrigues, Gadelha Antônia Mabrysa Torres, da Costa Júnior Antônio Eufrázio, Malveira Jackson Queiroz, Mazzetto Selma Elaine, and Rios Maria Alexandra de Sousa, (2019), "A thermogravimetric analysis of biomass wastes from the northeast region of Brazil as fuels for energy recovery", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 41, No. 13, pp.1557-1572.
- Zhang, Xiang, Hainian Wang, Mohd Rosli Mohd Hasan, Junfeng Gao, and Muhammad Irfan, (2019), "Traffic open time prediction of fog seal with sand using image processing technology", *Construction and Building Materials* 209, pp.9-19.
- with trichloroethylene: Improving the efficiency of using reclaimed asphalt pavement", *Journal of Cleaner Production* 232, pp.205-212.
- Lv, Songtao, Chaochao Liu, Dong Chen, Jianlong Zheng, Zhanping You, and Lingyun You., (2018), "Normalization of fatigue characteristics for asphalt mixtures under different stress states", *Construction and Building Materials* 177, pp.33-42.
- Ningyi , Su, Feipeng Xiao, Jingang Wang, Lin Cong, and Serji Amirkhanian, (2018), "Productions and applications of bio-asphalts– A review", *Construction and Building Materials* 183, pp.578-591.
- Norgbey, Eyram, Jingyu Huang, Volker Hirsch, Wen Jie Liu, Meng Wang, Oliver Ripke, Yiping Li et al., (2020), "Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads", *Construction and Building Materials* 230, pp.116957.

The Effect of Lignin and Soybean Oil on Rheological Behavior of Asphalt Binder

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Farzin Poorheydari Mamaghani, M.Sc., Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

In this study, an attempt has been made to investigate how the rheological behaviors of bitumen are affected by the use of lignin and soybean oil. In the current research, lignin (3%, 5%, 7% by weight of bitumen) and soybean oil (5% by weight of bitumen) were added to modify two main types of bitumen (AC 60-70 and AC 85/100). The performance evaluation of different bitumen was evaluated by examining their physical and rheological behavior by penetration tests, ductility, linear range sweep, multiple stress creep recovery, dynamic shear remoter, rotational viscosity and softening point tests. The results of rheological behaviors showed that the use of lignin additive increases the softening point and decreases the degree of penetration. The use of lignin reduces the low-temperature strength of the bitumen, while oil improves the low-temperature strength of the bitumen. The results of the multiple stress creep recovery (MSCR) test with the addition of lignin showed an increase in the high yield temperature of virgin bitumen at different stress levels. While the use of oil reduces the creasing strength of the sample. According to the results of the linear range sweep (LAS) test, the use of lignin additive reduces the fatigue properties of bitumen. While soybean oil strengthened it.

Keywords: Performance, Bitumen, Lignin, Soybean Oil, Waste