

## بررسی آزمایشگاهی اثرات مونت موریلونیت آلی بر عملکرد آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک

### مقاله علمی-پژوهشی

امین فرج اللهی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

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

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۴۷۹-۴۹۰

### چکیده

در این پژوهش، مونت موریلونیت آلی (OMMT) به قیر اصلاح شده پودر لاستیک<sup>۲</sup> (CRMA) اضافه شد تا عملکرد دمای بالا، عملکرد ضد پیری و پایداری ذخیره سازی را بهبود بخشد. اثرات درصدهای مختلف OMMT بر روی خواص CRMA مورد مطالعه قرار گرفت. فاکتور شیار به دست آمده با آزمایش رئولوژیکی برشی دینامیکی (DBR<sup>۳</sup>) برای ارزیابی عملکرد در دمای بالا مورد استفاده قرار گرفت. سختی خزش و مقدار (M) تعیین شده توسط آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)<sup>۴</sup> برای ارزیابی عملکرد در دمای پایین استفاده شد. نقطه نرمی، شکل پذیری، فاکتور شیار شدگی قبل و بعد از آزمایش لعاب نازک چرخشی (FTFO)<sup>۵</sup> و تست مخزن پیری تحت فشار (PAV) برای مشخص کردن خواص پیری مقایسه شد. علاوه بر این، آزمایش جداسازی پس از رزرو برای ۴۸ ساعت و ۷ روز انجام شد و نقطه نرمی و فاکتور شیار شدن لایه های بالایی و پایینی لوله جداسازی برای ارزیابی پایداری ذخیره سازی اتخاذ شد. نتایج نشان داد که عملکرد در دمای بالا و عملکرد ضد پیری با افزایش درصد OMMT بهبود یافت، در حالی که عملکرد دمای پایین بدتر شد. ثبات ذخیره سازی با افزایش درصد OMMT قبل از اینکه درصد از ۴٪ فراتر رود، بهبود یافت و پس از آن ثبات ذخیره سازی کاهش یافت. با در نظر گرفتن همه عوامل، پیشنهاد می شود که درصد بهینه OMMT ۳-۴٪ است.

واژه های کلیدی: قیر اصلاح شده حاوی پودر لاستیک، مونت موریلونیت آلی، عملکرد در دمای بالا، عملکرد در دمای پایین، ثبات ذخیره سازی

### ۱- مقدمه

پلیمرهایی در حالت طبیعی دشوار است و نمی توان آنها را برای تولید مجدد لاستیک بازیافت کرد. آنها مستقیماً در دنیای طبیعی قرار می گیرند و باعث "آلودگی سیاه" بزرگ برای محیط زیست و اکولوژی می شوند. با این حال، پس از درمان ویژه لاستیک در مخلوط آسفالت توسط محققان بزرگراه (Liu et al, 2021)، نه تنها مشکلات محیط زیستی درمان می شود، بلکه عملکرد

تولید لاستیک به طور چشمگیری با رونق ترافیک افزایش می یابد. در نتیجه تعداد لاستیک های رها شده افزایش می یابد که باعث ایجاد یک سری مشکلات برای محیط زیست می شود. پودر لاستیک لاستیک زباله عمدتاً حاوی لاستیک استایرن-بوتادین، لاستیک ایزوپرن، لاستیک سیس-بوتادین و سایر پلیمرها است (Wang et al, 2018; Liu et al, 2020). تجزیه چنین

دهد. هنگامی که از مونت موریلونیت برای اصلاح آسفالت استفاده می‌شود، معمولاً دو نوع ساختار است: ساختار نانو کامپوزیت درونی (بیشتر مونت‌موریلونیت معدنی) و ساختار نانو کامپوزیت لایه برداری شده (بیشتر مونت‌موریلونیت آلی). در این دو ساختار، لایه مونت‌موریلونیت پراکنده در قیر، حرکت زنجیره مولکولی قیر را تا حدی محدود می‌کند تا عملکرد قیر را بهبود بخشد. در این پژوهش، مونت موریلونیت آلی (OMMT) به عنوان یک اصلاح کننده ترکیبی برای اصلاح قیر اصلاح شده با خرده لاستیک استفاده شد. عملکرد دمای بالا، عملکرد دمای پایین، ویژگی رئولوژیکی، عملکرد ضد پیری و پایداری حرارتی قیر اصلاح شده ترکیبی مورد آزمایش قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد و مصالح

آسفالت PG70، در آزمایش انتخاب شد و مشخصات فنی اصلی آن مطابق با مشخصات مطابق جدول ۱ بود. مونت موریلونیت آلی توسط کارخانه شیمیایی، عرضه شد. ظرفیت تبادل کاتیونی  $130 \text{ meq}/100 \text{ g}$  (CEC)، حداکثر اندازه ذرات ۱۲۰ نانومتر، سطح ویژه ۷۵۰ مترمربع بر گرم و نسبت قطر به ضخامت آن بیش از ۲۰۰ است. شاخص نفوذ و یک سری از شاخص‌های عملکرد روسازی، از جمله ویسکوزیته بروکفیلد، عملکرد در دمای بالا، عملکرد دمای پایین، خواص رئولوژیکی و عملکرد ضد پیری، آسفالت اصلاح شده با لاستیک خرد شده، آسفالت اصلاح شده با کوپلیمر بلوک استایرن-بوتادین-استایرن و ماتریس قیر مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفت. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۲-۲- آماده سازی نمونه

ابزار مورد استفاده برای تهیه قیر حاوی پودر لاستیک، برش بالا، روش‌های تست استاندارد قیر و مخلوط‌های قیری برای مهندسی بزرگراه است. پس از آماده سازی، نمونه در یک کوره با دمای ثابت برای حفظ حرارت برای آزمایش‌های بعدی قرار داده شد.

روسازی آسفالت بهبود می‌یابد و هزینه ساخت روسازی آسفالت کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات زیادی به دست آمده است که به کاربرد آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک کمک می‌کند. سازگار کننده پس از اینکه توسط AIREY با پراکسید هیدروژن اصلاح شد، به آسفالت اصلاح شده پودر لاستیک زباله اضافه شد. مشخص شد که عملکرد دمای بالا و پایداری حرارتی آسفالت اصلاح شده پودر لاستیک زباله بهتر است. WEN و همکاران (Wen et al, 2020) دریافتند که هر چه سطح ویژه ذرات پودر لاستیک زباله بزرگتر باشد، سطح ذرات پودر لاستیک زباله زبرتر است و بازیابی الاستیک آسفالت اصلاح شده بالاتر است.

اگرچه خواص آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک نسبت به قیر پایه برتر است، اما هنوز مشکلاتی وجود دارد (Xu et al, 2016; Wei et al, 2017; Li et al, 2018). پودر لاستیک زباله پراکنده در ماتریس قیر به عنوان فاز پراکنده در حالت تعلیق است. نمی‌توان آن را در قیر حل کرد تا به حالت اصلاح شده واقعی برسد. همچنین نمی‌توان آن را به خوبی ذخیره کرد و در نتیجه به راحتی حالت تفکیک ایجاد می‌شود (Xia et al, 2017; SIENKIEWICZ et al, 2021). و عملکرد دمای بالا و پایداری حرارتی آن ضعیف است (Fang et al, 2008; ZHANG et al, 2018). برای حل بیش از همه، بسیاری از محققان (Rezvan et al, 2017; Zhang et al, 2018) ترکیبی پودر لاستیک ضایعاتی را برای ساختن یک "پل" بین قیر پایه و پودر لاستیک زباله انجام داده‌اند، به طوری که قیر اصلاح شده پودر لاستیک زباله عملکرد بهتری در جاده‌ها داشته باشد. در میان بسیاری از اصلاح‌کننده‌های ترکیبی، نانو مواد می‌توانند عملکرد قیر را در مقیاس میکرو با اثر منحصر به فرد خود در اندازه میکرو بهبود بخشند. مشکلات ذکر شده در مورد قیر اصلاح شده پلیمری در بالا را می‌توان با استفاده از مواد نانو و اصلاح‌کننده‌های پلیمری برای تهیه آسفالت اصلاح شده مرکب به طور موثر حل کرد. مونت موریلونیت به عنوان یک ماده نانورس سیلیکات لایه‌ای، یکی از کانون‌های تحقیقاتی قیر اصلاح شده با ترکیب نانو پلیمری است. مونت موریلونیت نه تنها می‌تواند پلیمر را در لایه‌های میانی قرار دهد تا نانو مواد تعبیه شده را تشکیل دهد، بلکه باعث می‌شود لایه ورق به طور مساوی در پلیمر پراکنده شود تا مواد نانو کامپوزیت چند لایه را تشکیل

جدول ۱. مشخصات قیر خالص

نتایج	استاندارد	واحد	خصوصیات قیر
۶۶	۷۰-۶۰	(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	درجه نفوذ
۱۵۳	>۱۰۰	(5 cm/min, 15 °C)/cm	شکل پذیری
۴۶,۹	>۴۶	°C	نقطه نرمی
۱,۱	-	25 °C)/(g·cm-3)	چگالی

جدول ۲. مشخصات قیر اصلاح شده

ضریب شیارشدگی (G/si nδ)/kP	ویسکوزیته (mPa·s)	شکل پذیری cm/min, ۱۵ °C	نقطه نرمی (G ۱۰۰ g, ۵ s)/(۰.۱ ° ۲۵)	درجه نفوذ (mm)	درصد	نمونه
۰.۷۱	۱۹۵	۱۵.۳	۴۶.۹	۶۶	-	قیر
۰.۵۳	۱۱۱۹	۲۸.۵	۴۸.۷	۵۲.۲	۱۰	قیر اصلاح شده با پودر لاستیک
۰.۹۷	۷۳۷	۳۵.۷	۸۱.۳	۵۶.۹	۵	قیر اصلاح شده با SBS

جدول ۳. خصوصیات رئولوژیکی قیر اصلاح شده

ضریب پیارشدگی PAV	ضریب پیارشدگی RTFO	سختی خزشی (مگاپاسکال)	m-value	نمونه
۰.۸۱ (نقطه نرمی)	۰.۹۸ (نقطه نرمی)			
۲.۱۱ (شکل پذیری)	۰.۹۵ (شکل پذیری)	۲۲۶.۶	۰.۳۴	قیر
۰.۱۸ (ضریب شیارشدگی)	۰.۵۴ (ضریب شیارشدگی)			
۰.۷۹ (نقطه نرمی)	۰.۹۶ (نقطه نرمی)			
۳.۲۸ (شکل پذیری)	۱.۰۸ (شکل پذیری)	۱۰۶.۴	۰.۳۶	قیر اصلاح شده با پودر لاستیک
۰.۲۳ (ضریب شیارشدگی)	۰.۲۸ (ضریب شیارشدگی)			
۰.۹۴ (نقطه نرمی)	۱.۰۱ (نقطه نرمی)			
۱.۵۵ (شکل پذیری)	۱.۰۸ (شکل پذیری)	۲۶۸.۷	۰.۲۹	قیر اصلاح شده با SBS
۰.۵۳ (ضریب شیارشدگی)	۱.۰۲ (ضریب شیارشدگی)			

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

عملکرد در دمای پایین استفاده شد. نقطه نرمی، شکل پذیری، فاکتور شیارشدن قبل و بعد از RTFOT و PAV برای مشخص کردن خواص پیری مقایسه شد. علاوه بر این، آزمون جداسازی پس از نگه داری برای ۴۸ ساعت و ۷ روز انجام شد و نقطه نرمی

اثرات درصدهای مختلف OMMT بر روی خواص CRMA مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی عملکرد قیر در دمای بالا، آزمایش‌های ویسکوزیته بروکفیلد و DSR اجرا شد. سختی خزش و مقدار m تعیین شده توسط آزمون BBR برای ارزیابی

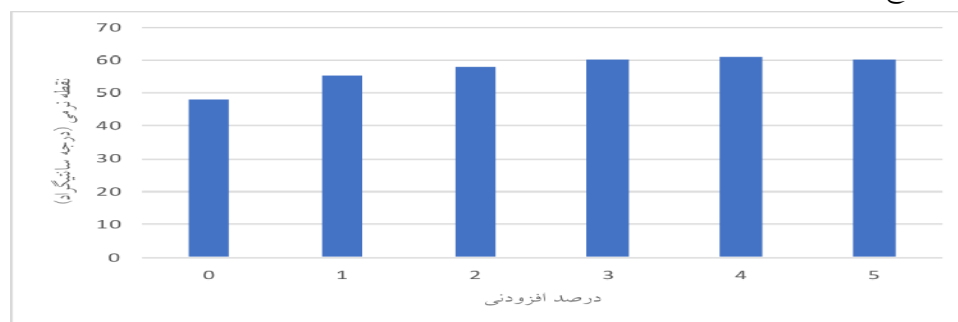
پایداری حرارتی با ذخیره استاتیکی قیر در محیطی با دمای ثابت ۱۶۳ درجه سانتی گراد انجام شد و زمان نگهداری آن ۴۸ ساعت و ۷ روز بود. پس از بیرون آوردن، توسط یک لوله جداسازی جدا شد. پس از انجماد در یخچال، آسفالت‌های بالای لوله جداسازی (بالا) و (پایین) ریخته و آزمایش شدند.

#### ۴- بحث

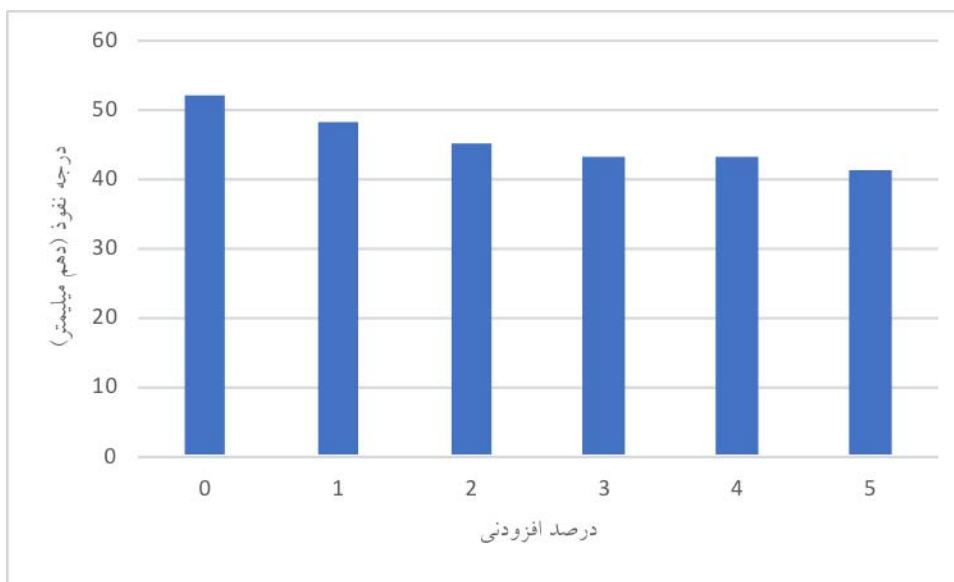
#### ۴-۱- نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

درجه نفوذ، شکل‌پذیری و نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده ترکیبی مختلف مطابق شکل ۱ می‌باشد. در شکل‌های ۱ و ۲ و ۳، S مقدار نقطه نرمی است. P نفوذ است. D مقدار شکل‌پذیری است. X درصد OMMT است. همانطور که در اشکال ۱ و ۳ نشان داده شده است، با افزایش درصد مونت موریلونیت آلی، نفوذ آسفالت اصلاح شده ترکیبی کاهش می‌یابد، نقطه نرم شدن افزایش می‌یابد و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. هنگامی که محتوای مونت موریلونیت آلی از ۴٪ بیشتر شود، نقطه نرم شدن کاهش می‌یابد. بر اساس هدف بهبود عملکرد آسفالت در دمای بالا در این پژوهش و با توجه به روند تغییرات سه شاخص با درصد، میزان مونت موریلونیت آلی بین ۳ تا ۴ درصد در نظر گرفته شد. از آزمایش ویسکوزیته بروکفیلد می‌توان دریافت که ویسکوزیته آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک بسیار بزرگتر از آسفالت ماتریس یا آسفالت اصلاح شده SBS است و قیر اصلاح شده با خرده لاستیک آسفالت با ویسکوزیته بالا بود.

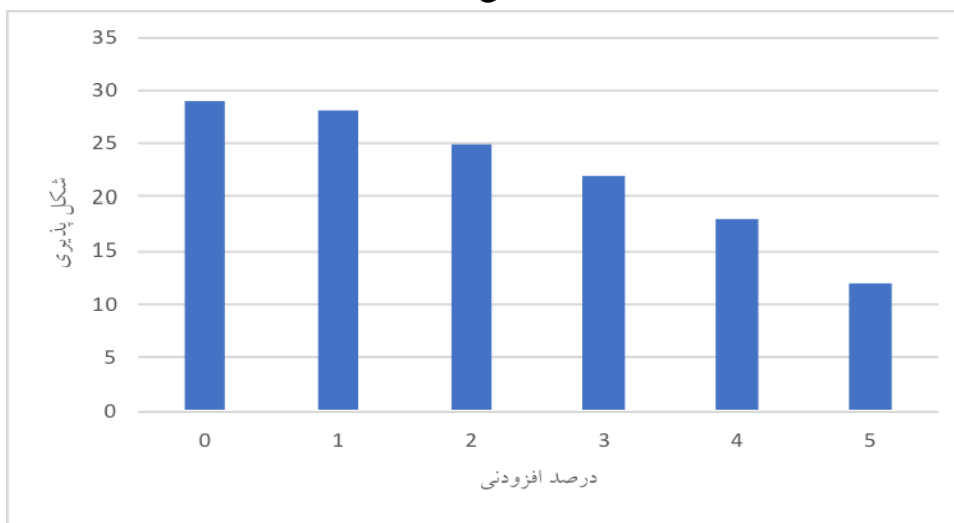
و ضریب شیار شدن لایه‌های بالایی و پایینی لوله جداسازی برای ارزیابی پایداری ذخیره‌سازی اتخاذ شد. تست ویسکوزیته بروکفیلد برای تعیین ویسکوزیته ظاهری آسفالت به کار گرفته شد. دمای آزمایش ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد بود. برای دستگاه مورد استفاده، دقت کنترل دما ۱ درجه سانتی‌گراد، مدل فرعی ۲۸ و سرعت چرخش ۲۰ دور در دقیقه بود. آزمایش ویسکوزیته بروکفیلد بر روی محتوای مختلف مونت موریلونیت آلی در آسفالت اصلاح شده ترکیبی انجام شد. هدف از آزمایش DSR، نشان دادن ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیر می‌باشد. دمای آزمون ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش  $(10 \pm 0)$  راد بر ثانیه انتخاب شد. آزمایش DSR برای قیر اصلاح شده ترکیبی با درصد متفاوت مونت موریلونیت آلی انجام شد. حالت کنترل با کرنش کنترل شد و مقدار آن ۱۲ درصد بود. BBR می‌تواند ترک خوردگی در دمای پایین روسازی آسفالت را بهتر شبیه‌سازی کند، بنابراین آزمایش BBR برای تجزیه و تحلیل توانایی ضد تغییر شکل بایندر آسفالت در دمای پایین اجرا شد. دمای آزمایش ۱۲-، ۱۸-، ۲۴- درجه سانتی‌گراد بود و محلول انکوباتور اتانول بی‌آب بود. RTFOT و PAV برای بررسی عملکرد کوتاه مدت و بلندمدت ضد پیری قیر استفاده شد و شاخص ارزیابی شاخص پیری AI بود. دمای آزمایش ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد، زمان نگهداری ۵ ساعت و سرعت چرخش ۵،۵ دور در دقیقه بود. دمای آزمایش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان نگهداری ۲۰ ساعت، مقدار فشار ۲،۱ مگاپاسکال و نمونه آزمایشی باقیمانده پس از RTFOT بود. تست جداسازی برای ارزیابی سازگاری اصلاح‌کننده‌ها و قیر خالص انتخاب شد.



شکل ۱. نتایج نقطه نرمی



شکل ۲. نتایج درجه نفوذ



شکل ۳. نتایج شکل پذیری

خاصیت ضد پیری آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک هنوز ناکافی بود. به طور خلاصه، افزودن خرده لاستیک به طور موثر می‌تواند عملکرد آسفالت ماتریس را در دمای پایین بهبود بخشد، اما عملکرد در دمای بالا، پایداری حرارتی و عملکرد ضد پیری آن ضعیف‌تر از آسفالت اصلاح شده SBS بود. در این مقاله با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف، از مونت موریلونیت آلی برای اصلاح آسفالت اصلاح شده خرده لاستیک به منظور بهبود عملکرد در دمای بالا، پایداری حرارتی و عملکرد ضد پیری آن استفاده شد و بهترین دوز مونت موریلونیت آلی به دست آمد.

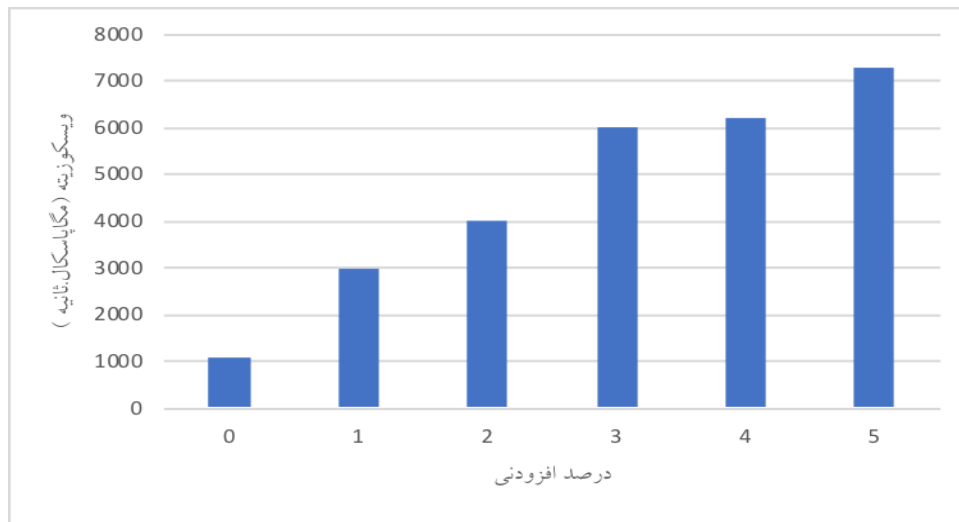
از آزمایش عملکرد در دمای بالا می‌توان دریافت که افزودن خرده لاستیک باعث کاهش ضریب شیار شدن آسفالت می‌شود که باعث می‌شود عملکرد آسفالت در دمای بالا بدتر شود. هنگامی که سه آسفالت اصلی در یک دما بودند، مقدار  $m$  آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک بیشتر از آسفالت ماتریسی یا آسفالت اصلاح شده SBS<sup>v</sup> بود و مدول سختی کمتر از آن دو بود. می‌توان مشاهده کرد که عملکرد آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک در دمای پایین بهتر از آسفالت ماتریسی یا آسفالت اصلاح شده SBS بود. در مقایسه با آسفالت اصلاح شده SBS،

#### ۲-۴- خصوصیات عملکردی دمای بالا

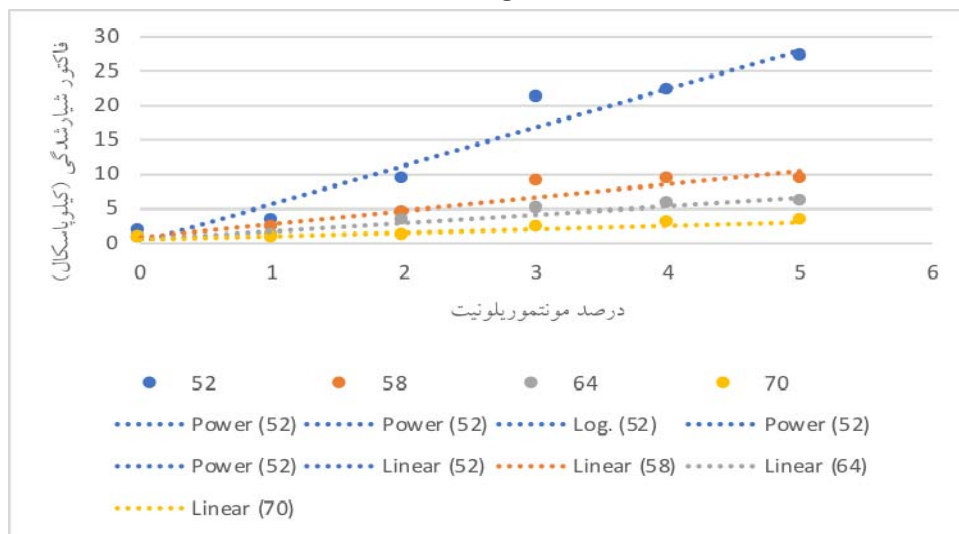
##### ۴-۲-۱- ویسکوزیته

هر چه ویسکوزیته قیر بیشتر باشد، دمای اختلاط و تراکم بالاتر است. هنگامی که درصد مونتموریلونیت اصلاح شده آلی افزایش یافت، ویسکوزیته قیر اصلاح شده ترکیبی نیز افزایش یافت، در حالی که ویژگی رئولوژیکی بدتر شد و کارایی بیشتر کاهش یافت. بنابراین، درصد مونت موریلونیت آلی باید در محدوده خاصی کنترل شود.

نتایج آزمایش ویسکوزیته آسفالت‌های اصلاح شده ترکیبی در شکل ۴ نشان داده شده است. از شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد مونت موریلونیت آلی در قیر اصلاح شده ترکیبی، ویسکوزیته بروکفیلد قیر به طور چشمگیری افزایش یافت. این نشان داد که معرفی مونت موریلونیت آلی باعث افزایش ضریب اصطکاک داخل آسفالت و مقاومت روتور در حین برش چرخشی و در نتیجه افزایش ویسکوزیته بروکفیلد شد.



شکل ۴. نتایج ویسکوزیته قیر



شکل ۵. پارامتر شیارشدگی

#### ۴-۲-۲- پارامتر شیارشدگی

فاکتور شیارشدگی به عنوان شاخصی برای قضاوت در مورد عملکرد دمای بالا در تست DSR استفاده شد که با مدول پیچیده اندازه‌گیری شده  $G^*$  و زاویه فاز  $\delta$ ، یعنی ضریب شیارش محاسبه می‌شود. نتایج آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. هرچه ضریب شیارشدن بزرگتر باشد، عملکرد در دمای بالا بهتر است. در همان دما، با افزایش محتوای مونت‌موریلونیت آلی، عامل شیارشدن نیز افزایش یافت که نشان می‌دهد ترکیب مونت

موریلونیت آلی می‌تواند عملکرد آسفالت اصلاح‌شده با خرده لاستیک را در دمای بالا بهبود بخشد و هر چه دوز بالاتر باشد، عملکرد در دمای بالا بهتر است. با این حال، پس از دوز بیش از ۳٪، بهبود عملکرد در دمای بالا اندک بود. بنابراین، محتوای مونت‌موریلونیت آلی ۳ تا ۵ درصد عملکرد آسفالت در دمای بالا را به طور موثرتری بهبود بخشید.

#### ۴-۲-۳- عملکرد دمای پایین

سختی خزشی  $S$  نمونه قیر در ۶۰ ثانیه مطابق معادله محاسبه می‌شود.

$$(1)$$

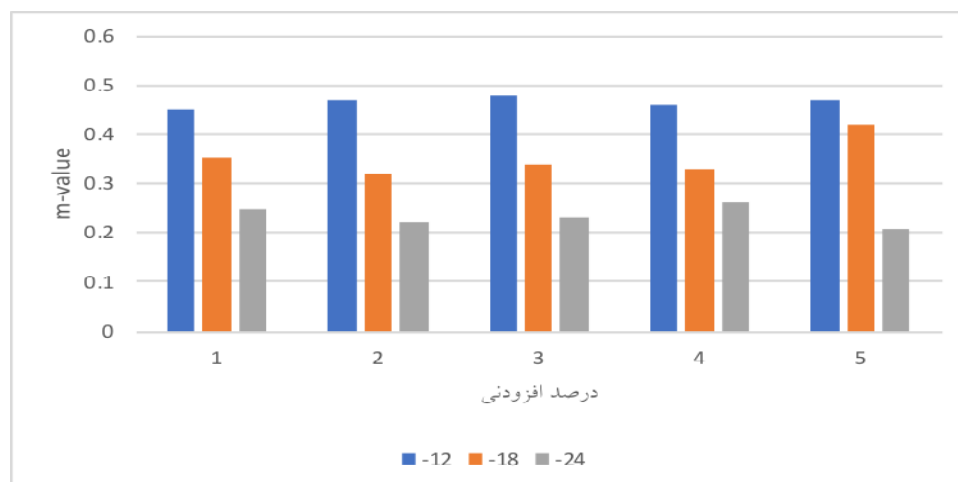
$$S(t) = PL^3 / (4bh^3\delta(t)).$$

که در آن  $S(t)$  سختی خزش در زمان  $t$  است.  $P$  بار ثابت است، در اینجا  $P = 988 \text{ mN}$ .  $L$  فاصله تکیه گاه پرتو است، در اینجا  $L = 102$  میلی‌متر.  $b$  عرض تیر است، در اینجا  $b = 12.5$  میلی‌متر.  $h$  ضخامت تیر است، در اینجا  $h = 6.25$  میلی‌متر.  $\delta(t)$  انحراف زمان واقعی است، در اینجا  $t = 60$  ثانیه. آزمایش BBR بر روی مونت‌موریلونیت آلی مختلف در آسفالت‌های اصلاح شده ترکیبی همانطور که در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است انجام شد. در دمای ثابت، با تغییر درصد مونت‌موریلونیت آلی، تغییرات سفتی خزش و مقدار  $m$  تفاوت معنی‌داری داشت. در ۱۲- درجه سانتی‌گراد، با افزایش درصد مونت‌موریلونیت آلی، سفتی خزش نیز افزایش یافت، در حالی که مقدار  $m$  شکل موجی نامنظم را نشان داد. در ۱۸- درجه سانتی‌گراد و ۲۴- درجه سانتی‌گراد، سفتی خزش و مقدار  $m$  با افزایش مونت‌موریلونیت

آلی در نوسان بود. سختی خزش و مقدار  $m$  به عنوان شاخص برای ارزیابی عملکرد در دمای پایین استفاده شد. هر چه سختی خزشی بیشتر باشد، تنش دما-انقباض ایجاد شده روی روسازی بیشتر است و ترک‌های ایجاد شده بیشتر می‌شوند. هر چه مقدار  $m$  کوچکتر باشد، تنش کاهش می‌یابد، شیب منحنی سختی آسفالت کمتر است، توانایی تغییر شکل آسفالت در دماهای پایین بدتر است و ترک خوردن آن در دماهای پایین آسان‌تر است. بر اساس تغییرات سفتی خزشی و مقدار  $m$  با محتوای مونت‌موریلونیت آلی در سه دما، می‌توان دریافت که وقتی درصد مونت‌موریلونیت آلی ۳ درصد بود، مقداری غیر از مقدار جزئی وجود داشت و مقدار  $m$  به مقدار رسید. حداکثر نقطه‌ای که سفتی خزش کمترین مقدار را به دست آورد، بهترین ترکیب عملکرد در دمای پایین در سه دما بود.



شکل ۶. تغییرات میزان سایش کانتابرو در نمونه‌های آسفالت متخلخل

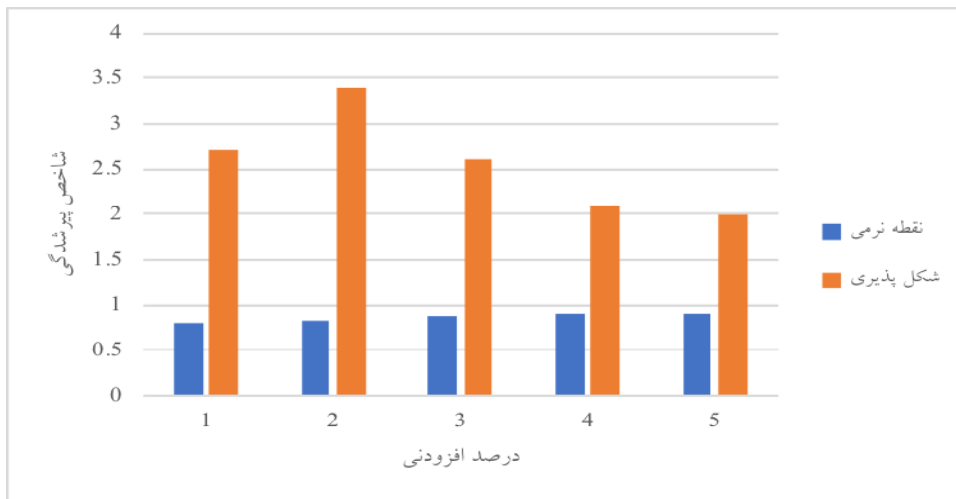


شکل ۷. نتایج پارامتر m-value

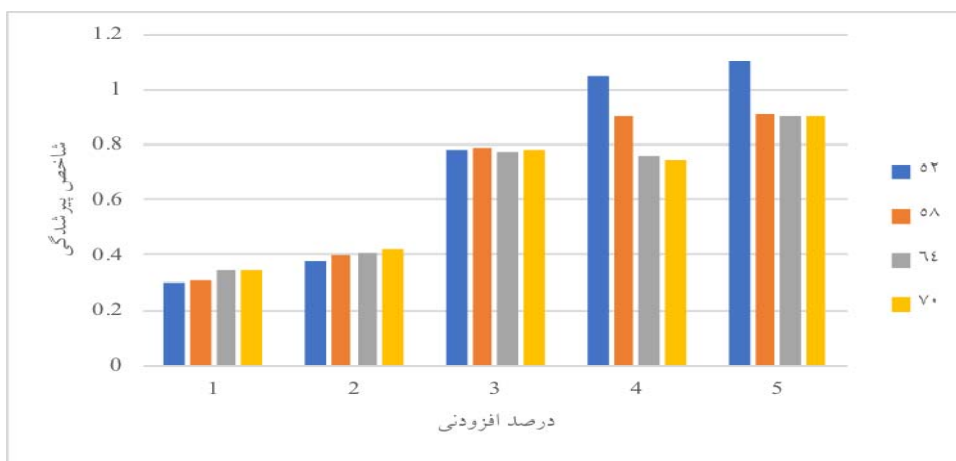
#### ۴-۴- عملکرد خصوصیات پیرشدگی

شاخص پیری قیر اصلاح شده مرکب با افزایش دوز کاهش می‌یابد و هر چه دوز بیشتر باشد، شاخص پیری به آسفالت اصلاح شده SBS نزدیک‌تر است. با افزایش درصد، منحنی شاخص پیری عامل شیارشدگی اساساً در دماهای مختلف یکسان است. این تداخل دما را حذف می‌کند و فاکتور پیری عامل شیار پس از RTFOT و PAV به نزدیک شدن به ۱ در زمانی که دوز افزایش می‌یابد ادامه می‌دهد. در همان زمان، همراه با شاخص پیری PAV قیر اصلاح شده با خرده لاستیک و شاخص پیری PAV قیر اصلاح شده SBS که در بالا ذکر شد، می‌توان دریافت که وقتی درصد مونت موریلونیت آلی ۳ درصد بود، شاخص پیری آن و قیر اصلاح شده SBS خیلی نزدیک هستند هنگامی که دوز بیش از ۳٪ بود، شاخص پیری آن بین ۰٫۵ تا ۱ بود و عملکرد ضد پیری بهتر از قیر اصلاح شده SBS بود. به طور خلاصه، اثر مونت موریلونیت آلی با درصد ۳ تا ۵ درصد بهتر بود.

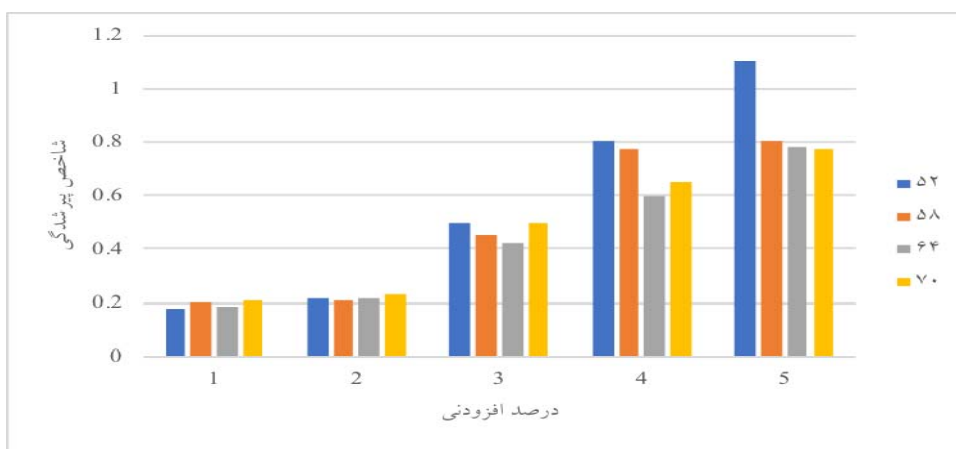
نتایج آزمون نقطه نرمی، شکل‌پذیری و عامل شیارشدگی قبل و بعد از پیری (شامل RTFOT و PAV) برای ارزیابی عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت پیری آسفالت مورد استفاده قرار گرفت. شاخص پیری (AI) به عنوان نسبت عملکرد آسفالت اصلی به عملکرد آسفالت پس از پیری تعریف شد. نتایج پارامتر AI درصدهای مختلف قیر اصلاح شده با ترکیب مونت‌موریلونیت آلی در اشکال ۸-۱۰ نشان داده شده است. در مقایسه با قیر اصلی، قیر بعد از RTFOT هیچ تغییر آشکاری در نقطه نرم شدن و شکل‌پذیری ندارد. قیر بعد از PAV در مقایسه با قیر اولیه دارای نقطه نرمی و شکل‌پذیری آشکاری بود و با افزایش درصد مونت موریلونیت آلی، افزایش نقطه نرمی کمتر بود. شاخص پیری به عنوان شاخصی برای قضاوت در مورد عملکرد ضد پیری قیر استفاده می‌شود. هر چه مقدار به ۱ نزدیکتر باشد، عملکرد ضد پیری قیر بهتر است. با افزایش درصد مونت‌موریلونیت آلی، شاخص پیری نقطه نرمی نیز افزایش یافت و به ۱ نزدیک شد.



شکل ۸. ارتباط بین شاخص پیرشدگی شکل پذیری و نقطه نرمی و درصد مونتموریلونیت



شکل ۹. شاخص پیرشدگی کوتاه مدت ضریب شیارشدگی و درصد مونتموریلونیت

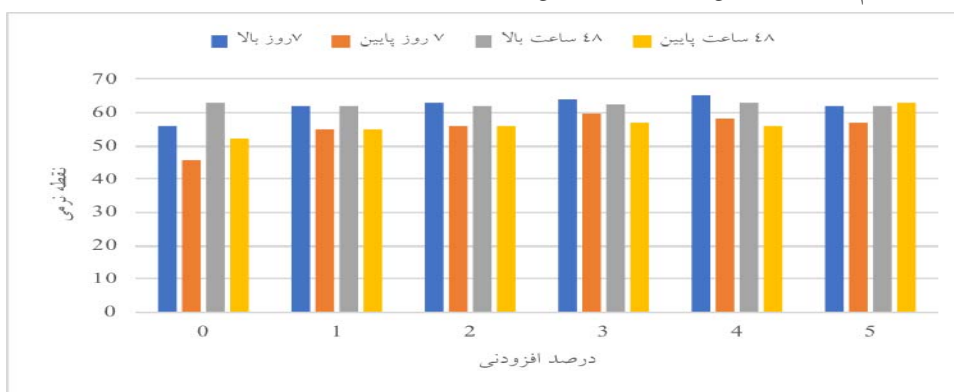


شکل ۱۰. شاخص پیرشدگی بلند مدت ضریب شیارشدگی و درصد مونتموریلونیت

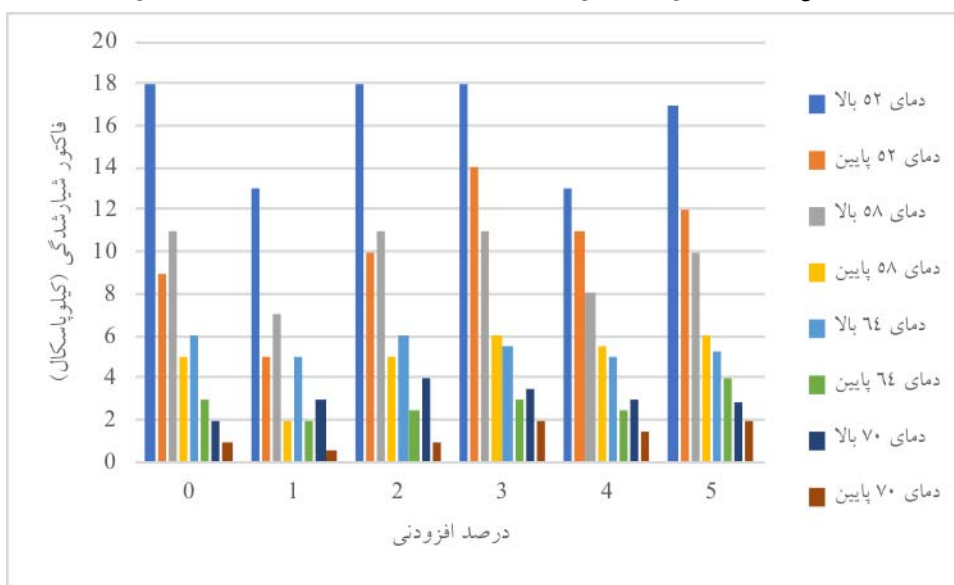
#### ۴-۵- شاخص پایداری

آسفالت بالا و پایین دو نوع لوله ذخیره سازی به تدریج نزدیک شد. تفاوت بین نقطه نرمی و فاکتور شیارگی به تدریج کاهش یافت و جداسازی کمتر شد که نشان دهنده بهبود پایداری حرارتی است. حداقل تفاوت بین نقطه نرم شدن قیر بالا و پایین لوله های ذخیره سازی ۴۸ ساعته و ۷ روزه به ترتیب در ۰.۳٪ و ۰.۵٪ مونت موریلونیت آلی رخ داد. برای تفاوت بین فاکتورهای شیاردار بالا و پایین لوله های ذخیره سازی ۴۸ ساعته و ۷ روزه در چهار دمای آزمایش، حداقل مقادیر زمانی رخ داد که درصد مونت موریلونیت آلی به ترتیب ۴ و ۳ درصد بود. بنابراین درصد مونت موریلونیت آلی ۳ تا ۴ درصد باعث بهبود پایداری حرارتی آسفالت می شود.

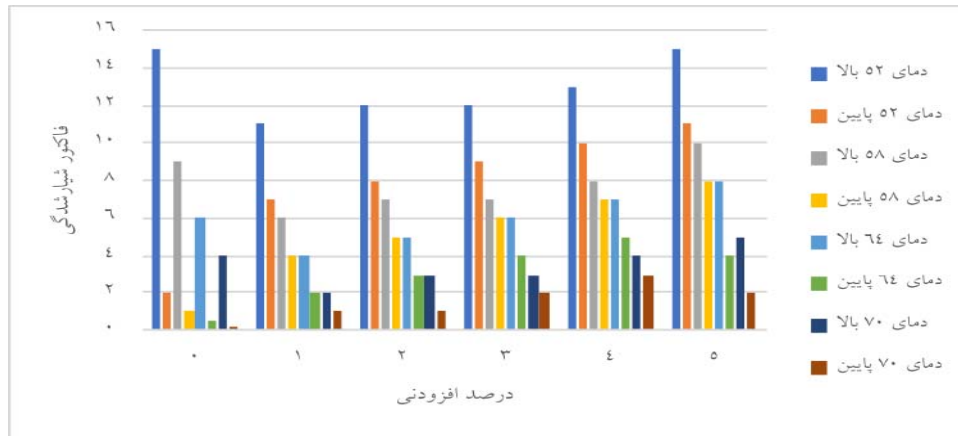
نتایج تست پایداری حرارتی قیرهای اصلاح شده ترکیبی در اشکال ۱۱-۱۳ نشان داده شده است. در بالای لوله ذخیره سازی ۴۸ ساعت، نقطه نرم شدن آسفالت به طور کلی افزایش یافت و نقطه نرمی آسفالت پایین کمی کاهش یافت. نقطه نرم شدن قیر در بالای لوله ذخیره سازی ۷ روزه و نقطه نرم شدن قیر پایین هر دو افزایش یافت. در چهار دمای آزمایش، ضریب شیارشگی قیر بالا و ضریب شیارندگی پایین لوله ذخیره سازی ۴۸ ساعت شکل موجی را نشان دادند و ضریب شیارشدن بالا و ضریب شیارندگی پایین لوله ذخیره سازی ۷ روز روند صعودی را نشان دادند. محتوای مونت موریلونیت آلی در قیر اصلاح شده ترکیبی افزایش یافت. در هر دما، نقطه نرم شدن و منحنی فاکتور شیارشدگی



شکل ۱۱. ارتباط بین نقطه نرمی ذخیره شده در ۷ روز و ۴۸ ساعت و درصد افزودنی



شکل ۱۲. پارامتر شیارشدگی ذخیره شده در ۴۸ ساعت



شکل ۱۳. پارامتر شیارشدگی ذخیره شده در ۷ روز

#### ۶-۴- درصد بهینه مونتوریلونیت

اصلاح شده SBS برتری دارد. عملکرد در دمای بالا و عملکرد ضد پیری بدتر از آسفالت اصلاح شده SBS بود و ویسکوزیته از آسفالت اصلاح شده SBS بیشتر بود، بنابراین اصلاح ترکیب مونتوریلونیت آلی برای آسفالت اصلاح شده با پودرلاستیک اعمال شد. در دمای یکسان، با افزایش درصد مونتوریلونیت آلی، عامل شیارشدن بیشتر شد. با افزایش درصد مونت موریلونیت آلی، نقطه نرم شدن نیز افزایش یافت. بنابراین، می‌توان توضیح داد که با افزایش محتوای مونت موریلونیت آلی، عملکرد آسفالت در دمای بالا بهتر می‌شود.

در دمای ۱۲-، ۱۸- و ۲۴- درجه سانتی‌گراد، منحنی‌های خزش آسفالت اصلاح شده با ترکیب لاستیکی آلی مونتوریلونیت با محتویات مختلف پس از تنش ناسازگار بود. با این حال، با افزایش محتوای مونتوریلونیت آلی، عملکرد دمای پایین بدتر شد. هر چه محتوای مونت موریلونیت آلی در آسفالت اصلاح شده مرکب بیشتر باشد، ویسکوزیته آسفالت اصلاح شده ترکیبی بیشتر است. هر چه مقدار مونت موریلونیت آلی در آسفالت اصلاح شده ترکیبی بیشتر باشد، هر چه شاخص پیری به ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد ضد پیری بهتری دارد. شاخص پیری زمانی بین ۰.۵ و ۱ بود که دوز بالاتر از ۳٪ بود و شاخص پیری از آسفالت اصلاح شده SBS بیشتر بود. هر چه درجه تفکیک در ۴۸ ساعت کمتر باشد، درجه تفکیک در ۷ روز کمتر و درجه تفکیک بیشتر زمانی که محتوای مونت موریلونیت آلی در آسفالت اصلاح شده ترکیبی افزایش یافت، بالاتر از ۴ درصد بود معرفی مونتوریلونیت اصلاح شده آلی به آسفالت اصلاح شده ترکیبی می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد در دمای بالا، عملکرد ضد پیری و عملکرد ذخیره سازی را بهبود بخشد، اما بهبود این خواص بر اساس فرض کاهش عملکرد در دمای پایین و افزایش خواص رئولوژیکی است. بنابراین، محتوای مونت موریلونیت آلی ۳ تا ۴ درصد توصیه شد.

استانداردهای فنی قیر اصلاح شده با خرده لاستیک در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون فوق، نقطه نرم شدن پنج درصد OMMT می‌تواند نیاز کلاس ۳ را برآورده کند. و هنگامی که درصد ۲٪ OMMT تا ۵٪ باشد، قیر اصلاح شده ترکیبی می‌تواند نیاز کلاس II را برآورده کند. اگر برای دستیابی به نیاز کلاس I نیاز باشد، یعنی نقطه نرم به ۶۰ درجه سانتی‌گراد برسد، درصد OMMT قیر اصلاح شده باید ۳-۴٪ باشد. در مورد شکل‌پذیری اندازه‌گیری شده در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و ویسکوزیته، این سه درجه به مقدار بیش از ۱۰ سانتی‌متر نیاز دارند و ویسکوزیته باید در محدوده ۱.۵-۷.۵ Pa·s باشد. تمام مقادیر شکل‌پذیری قیرهای اصلاح شده ترکیبی حاوی OMMT الزامات کلاس‌های I، II و III را برآورده می‌کنند. از نظر ویسکوزیته، تنها مقدار قیر اصلاح شده مرکب با درصد ۵ OMMT درصد بیشتر از مشخصات بود. از نظر عملکرد ضد پیری، قیر اصلاح شده ترکیبی با درصد OMMT بالاتر از ۳٪ الزامات مشخصات را برآورده می‌کند. با در نظر گرفتن عملکرد در دمای بالا و عملکرد دمای پایین به طور جامع، بهترین محتوای OMMT توصیه شده برای تهیه آسفالت اصلاح شده مرکب ۳-۴٪ است. از طریق آزمون‌های سه شاخص، ویسکوزیته بروکفیلد، DSR، RTFOT، PAV، BBR و سایر تحقیقات آزمون متعادل، داده‌های تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. درصد بهینه ۳-۴٪ OMMT بود. شاخص‌های قیر اصلاح شده ترکیبی تحت درصد بهینه (۳٪) با قیر پایه، قیر اصلاح شده SBS و آسفالت اصلاح شده با لاستیک خرده‌دار مقایسه می‌شوند. نتایج در جدول ۴ و ۵ نشان داده شده است. بر اساس تحقیقات قبلی و داده‌های جدول ۴ و ۵، نتایج زیر به دست آمده است.

با مقایسه عملکرد آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک با آسفالت اصلاح شده SBS، مشخص شد که عملکرد آسفالت اصلاح شده خرده لاستیک در دمای پایین نسبت به آسفالت

جدول ۳. استاندارد عملکردی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

شاخص	۱	۲	۳
نقطه نرمی	۶۰	۵۴	۴۹
درجه نفوذ	۷۴-۲۴	۷۴-۲۴	۹۹-۴۹
شکل پذیری	۱۰	۹	۹
ویسکوزیته	۷,۴-۱,۴	۷,۴-۱,۴	۷,۴-۱,۴
بازیابی الاستیک	۲۴	۱۹	۹
نقطه اشتعال	۲۲۹	۲۲۹	۲۲۹
شکل پذیری بعد از پیرشدگی کوتاه مدت	۳۹	۳۹	۳۹

جدول ۴. شاخص های عملکردی قیر پایه، قیر اصلاح شده پودر لاستیکی، اصلاح شده با SBS، اصلاح شده با مونت موریلونیت و پودر لاستیک

نمونه	درجه نفوذ	نقطه نرمی	شکل پذیری ویسکوزیته	فاکتور شیارشدگی	m-value	سختی خزشی
قیر پایه	۶۶	۴۷	۱۵.۳	۱۹۶	۰.۳۴	۲۲۷
قیر اصلاح شده پودر لاستیکی	۵۲.۱	۴۸	۲۹	۱۱۲۰	۰.۳۶	۱۰۵
اصلاح شده با SBS	۵۶.۸	۸۱	۳۶	۷۳۶	۰.۲۹	۲۶۸
اصلاح شده با مونت موریلونیت و پودر لاستیک	۴۲.۲	۶۱	۲۰	۷۶۵۰	۰.۳۶	۱۱۴

جدول ۵. شاخص پیرشدگی نمونه ها

نمونه	شاخص پیرشدگی کوتاه مدت		شاخص پیرشدگی بلند مدت	
	نقطه نرمی	شکل پذیری	نقطه نرمی	فاکتور شیارشدگی
قیر پایه	۰.۹۶	۰.۹۴	۰.۸	۲.۱
، قیر اصلاح شده پودر لاستیکی	۰.۹۴	۱.۰۵	۰.۷۷	۳.۲۵
اصلاح شده با SBS	۱.۰۳	۱.۰۵	۰.۹۳	۱.۵۳
اصلاح شده با مونت موریلونیت و پودر لاستیک	۰.۹۸	۱	۰.۸۸	۲.۷۷

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مونت موریلونیت آلی (OMMT) به عنوان یک اصلاح کننده ترکیبی برای اصلاح آسفالت اصلاح شده با لاستیک خرده دار استفاده شد. اثرات محتوای OMMT بر عملکرد جاده آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک مورد مطالعه قرار گرفت. برخی از نتایج را می توان به شرح زیر گرفت.

عملکرد در دمای بالا و عملکرد ضد پیری آسفالت اصلاح شده ترکیبی با مونت موریلونیت آلی توسعه داده شد، در حالی که عملکرد در دمای پایین بدتر شد. بنابراین، محتوای OMMT باید کنترل شود.

هنگامی که افزودن OMMT در محدوده خاصی از محتوا باشد، پایداری ذخیره سازی با مونت موریلونیت آلی بهبود یافت. با این حال، هنگامی که محتوای OMMT بیش از ۴٪ بود، پایداری ذخیره سازی بدتر شد، که ممکن است به دلیل پراکندگی سخت OMMT باشد.

با در نظر گرفتن تمامی عوامل پیشنهاد می شود که محتوای بهینه مونت موریلونیت آلی ۳ تا ۴ درصد است. در مطالعه بیشتر، آزمایش های میکرو برای توضیح تغییر ریزساختاری در سیستم OMMT-آسفالت با افزودن OMMT و تجزیه و تحلیل مکانیسم اصلاح OMMT انجام خواهد شد.

- 1- Organic Montmorillonite
- 2- Crumb Rubber Modified Asphalt
- 3- Dynamic Shear Rheological
- 4- Bending Beam Rheometer
- 5- Rolling Thin Film Ovens
- 6- Pressure Aging Vessel
- 7- Styrene Butadiene Styrene

۷- مراجع

crumb rubber- modified bituminous binders [J]. *Applied Sciences*, 8(10): 1760.

**doi:10.3390/app8101760**

-WEN Gui-an, Zhang Yong, Zhang Yin-xi, SUN Kang, FAN Yong-zhong. (2002). Improved properties of SBS-modified asphalt with dynamic vulcanization [J]. *Polymer Engineering & Science*, 42(5): 1070–1081.

**doi: 10.1002/pen. 11013**

WEI Hai-bin, LI Zi-qi, JIAO Yu-bo. (2017). Effects of diatomite and SBS on freeze-thaw resistance of crumb rubber modified asphalt mixture [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*. 1–14.

**doi: 10.1155/2017/ 7802035**

-Xu Ou-Ming, Xiao Fei-Peng, Han S, Amirkhanian S N, Wang Zhen-Jun. (2016). High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers [J]. *Construction and Building Materials*, 112: 49–58.

**doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.069**

-XIA Cheng-Dong, LV S, CABRERA M B, WANG Xiao- Feng, ZHANG Chao, YOU Ling-Yun. (2021). Unified characterizing fatigue performance of rubberized asphalt mixtures subjected to different loading modes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 279: 123740.

**doi: org/10.1016/j.jclepro. 2020.123740**

-Zhang Feng, HU Chang-bin, ZHANG Yu. (2018). Research for SEBS/PPA compound-modified asphalt [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(14): 46085.

-Zhang Feng, HU Chang-bin, Zhang Yu. (2018). Influence of montmorillonite on ageing resistance of styrene-ethylene/ butylene-styrene-modified asphalt [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(2): 893–905.

**doi 10.1007/s10973-018-7130-1**

-FANG Chang-qing, LI Tie-hu, ZHANG Zeng-ping, WANG Xin. (2008). Combined modification of asphalt by waste PE and rubber [J]. *Polymer Composites*, 29(10): 1183–1187.

**doi: 10.1002/pc.20424**

-LIU Chao-chao, LV S, PENG Xing-hai, ZHENG Jian-long, YU Miao. (2020). Analysis and comparison of different impacts of aging and loading frequency on fatigue characterization of asphalt concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9): 04020240.

**doi: 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0003317**

-LIU Chao-chao, LV Song-tao, JIN Dong-zhao, QU Fang- ting. Laboratory investigation for the road performance of asphalt mixtures modified by rock asphalt/styrene butadiene rubber[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

**doi.10.1061/(ASCE)MT1943-5533.0003 611**

-LI Pei-long, JIANG Xiu-ming, Ding Zhan, Zhao Jun-kai, SHEN Ming-han. (2018). Analysis of viscosity and composition properties for crumb rubber modified asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 169: 638–647.

**doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.174**

-Rezvan B, Hassan Z. (2017). Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives [J]. *Journal of Central South University*, 24(2): 360–373.

**doi: 10.1007/s11771-017-3438-4**

-Sienkiewicz M, BorzęDowska-Labuda K, Wojtkiewicz A, Janik H. (2017). Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: a review [J]. *Fuel Processing Technology*, 159: 272–279.

**doi: 10.1016/j.fuproc.2017.01.049**

-WANG Hao-peng, LIU Xue-yan, Apostolidis P, Scarpas T. (2018). Non-Newtonian behaviors of

# Experimental Investigation of the Effects of Organic Montmorillonite on the Performance of Asphalt Modified with Rubber Crumb

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

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

*E-mail: AminFarajollahi@gmail.com*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

In this research, organic montmorillonite (OMMT1) was added to powdered rubber modified bitumen 2 (CRMA) to improve high performance, anti-aging performance and storage stability. Different percentages of OMMT were studied on CRMA properties. Groove factor obtained by dynamic shear rheological test (DSR3) to evaluate high temperature performance in case of its use. Creep hardness and m value determined by bending beam rheometer test (4) were used to evaluate the performance at the bottom. The softening point, ductility, creasing factor before and after rotary thin glaze test (RTFOT)<sup>5</sup> and pressure aging vessel test (PAV)<sup>6</sup> are compared to characterize the aging properties. In addition, the separation test was conducted after reservation for 48 hours and 7 days, and the softening point and rutting factor of the top and bottom layers of the separation tube were established to evaluate the storage stability. The results showed that top performance and antiaging performance improved with increasing OMMT percentage, while bottom performance worsened. Storage stability by increasing the percentage of OMMT before this percentage exceeds 4%, improve and find that storage stability after finding. Considering all factors, it is suggested that the optimum percentage of OMMT is 3-4%.

**Keywords:** Modified Bitumen Containing Rubber Powder, Organic Montmorillonite, High Temperature Performance, Low Temperature Performance, Storage Stability